

Facultad: Ingeniería.

Escuela: Electrónica.

Asignatura: Sistemas de Control Automático.

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

2 sesiones.

## Tema: El controlador ON-OFF

### Objetivos específicos

- Identificar las características de los controladores ON-OFF o de dos posiciones en los sistemas de control automático.
- Describir el efecto de la histéresis del regulador.
- Medir y calcular la amplitud y el período de tiempo de las oscilaciones.

### Materiales y equipo

- 1 Fuente de alimentación 15 vcd [SO3538-8D]
- 1 Referencia de voltaje [SO3536-5A]
- 1 Amplificador de potencia [SO356-7Q].
- 1 Sistema controlado de temperatura [SO3536-8T]
- 1 Controlador ON-OFF [SO3536-5R]
- 1 Voltímetro de bobina móvil [SO5127-1H]
- 1 Computadora con MATLAB, SIMULINK, control system toolbox y Run Intuilink Data Capture instalado
- 1 Osciloscopio digital [DSO1052B]
- 2 Puntas para el osciloscopio
- 1 Cable USB tipo A/B
- 17 Puentes
- 1 Switch
- Varios cables.

### Introducción teórica

La salida del controlador ON-OFF, o de dos posiciones, solo puede cambiar entre dos valores al igual que dos estados de un interruptor. El controlador no tiene la capacidad para producir un valor exacto en la variable controlada para un valor de referencia dado pues el controlador produce una continua desviación del valor de referencia.

La acción del controlador de dos posiciones tiene un simple mecanismo de construcción, por esa

razón este tipo de controladores es de los de más amplio uso, y comúnmente utilizados en sistemas de regulación de temperatura.

Los controladores mecánicos de dos posiciones normalmente poseen algo de histéresis, por el contrario los controladores electrónicos usualmente funcionan sin histéresis.

La **histéresis** está definida como la diferencia entre los tiempos de apagado y encendido del controlador.

El usar un controlador de acción de dos posiciones da como resultado una oscilación de la variable controlada,  $x$ .

Para determinar la regulación del controlador, son importantes los parámetros amplitud y período de tiempo de la oscilación. La oscilación depende de muchos factores, el período de tiempo está en función del tiempo muerto del sistema y la posible histéresis del controlador. La histéresis también está directamente influenciada por la amplitud de la oscilación la cual es adicionalmente dependiente de los valores del factor de histéresis  $Kis$  y la magnitud del escalón en la variable de entrada.

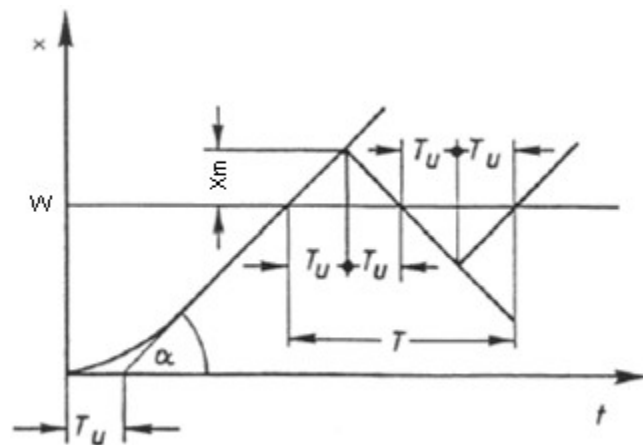


Figura 8.1 Planta integral con controlador ON-OFF sin histéresis.

$T_u$  = Tiempo muerto del sistema

$w$  = Valor de referencia

$T$  = Período de la oscilación

$x_m$  = Ancho de sobreimpulso de la oscilación

La Figura 8.1 muestra las características dinámicas de un sistema de regulación, usando un controlador de dos posiciones en una planta integral sin compensación como un resultado del tiempo de retardo en la planta y con histéresis igual a cero, la oscilación se produce con un período de tiempo de:

$$T = 4Tu \quad \text{Ecuación 8.1}$$

La amplitud de oscilación está principalmente determinada por los valores característicos del factor de histéresis ( $K_{is}$ ) y la magnitud de cambio de la variable de entrada,  $\Delta y$ :

$$X_M = K_{is} \times \Delta y \times Tu \quad \text{Ecuación 8.2}$$

Donde:

$$K_{is} = vx / \Delta y, \Delta y = 10V \quad \text{Ecuación 8.3}$$

$$vx = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

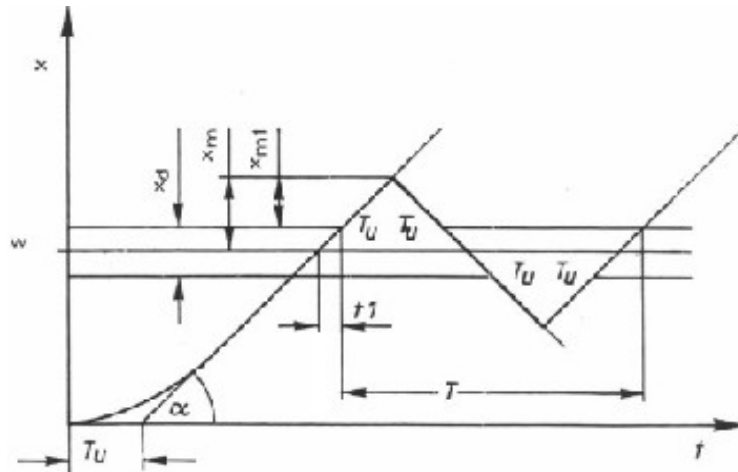


Figura 8.2 Planta integral con controlador ON-OFF con histéresis  $x_d$ .

Si el controlador de dos posiciones posee histéresis, entonces la amplitud y período de las oscilaciones están definidos por:

$$T = 4Tu + 4t_1 \quad \text{Ecuación 8.4}$$

y relacionando otras variables:

$$T = 4 \left( Tu + \frac{x_d}{2K_{is}\Delta y} \right) \quad \text{Ecuación 8.5}$$

Donde  $x_d$  es la banda de histéresis del controlador.

La variable  $x_d$  debe ser sumada a la amplitud de la oscilación, y está dada por:

$$X_M = K_{is} \Delta y T_u + \frac{x_d}{2} \quad \text{Ecuación 8.6}$$

Las fórmulas dadas solo son válidas para plantas que poseen idénticos tiempos de caída y subida de la variable controlada.

Para un sistema de orden superior con un controlador de dos posiciones y considerando una histéresis de cero, se puede aproximar la respuesta con las siguientes ecuaciones:

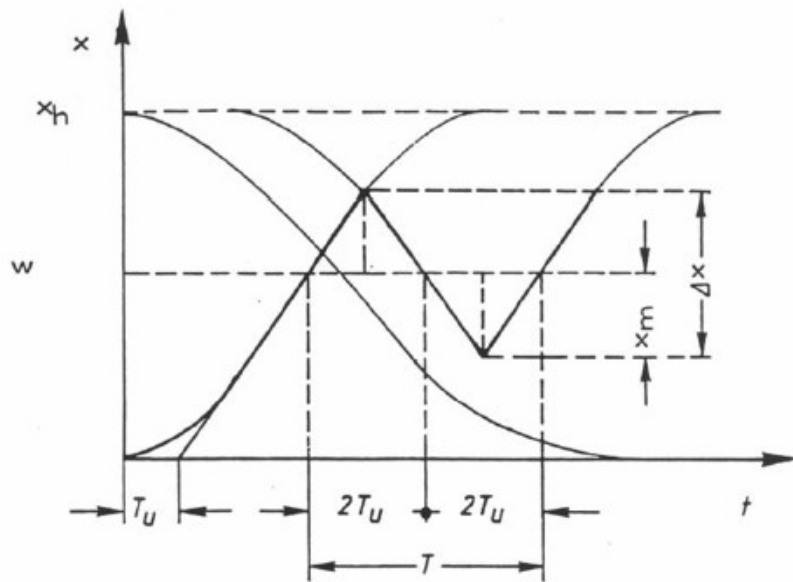


Figura 8.3 Sistema de orden superior con controlador ON-OFF sin histéresis.

El periodo de la oscilación será:

$$T = 4T_u \quad \text{Ecuación 8.1}$$

Al mismo tiempo  $X_M$  está dado por:

$$X_M = x_h \frac{T_u}{T_g} \quad \text{Ecuación 8.7}$$

Donde  $x_h$  es el máximo valor que toma la salida, en los módulos del laboratorio es 10V.

Sin embargo los sistemas de primer orden presentan un crecimiento exponencial, por lo que se presenta el siguiente método de cálculo para la amplitud:

$$X_M = \frac{x_h}{2} (1 - e^{-Tu/Tg}) \quad \text{Ecuación 8.8}$$

Si el controlador tiene histéresis, la amplitud de la oscilación será:

$$X_M = \frac{x_h}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2x_d}{x_h} \right) e^{-Tu/Tg} \right] \quad \text{Ecuación 8.9}$$

La planta usada en este ejercicio presenta una desviación de las consideraciones teóricas. En la teoría se asume que la respuesta al escalón en ambas direcciones es la misma, pero en la planta usada aquí se presentan grandes diferencias.

### 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 con la Parte I y el otro grupo hará la parte II, luego se intercambian.

## PARTE I. SISTEMA HIDRÁULICO DE PRIMER ORDEN

1. Digite el comando simulink y espere que cargue la ventana del buscador de librerías de SIMULINK.
2. Cree un nuevo modelo ("File" -> "new" -> "Model") con el sistema que se muestra en la Figura 8.4. En la Tabla 8.1 se muestran las librerías donde están los elementos del sistema.

Elemento	Librería de Simulink
Transfer Fcn	Continuous
Step	Sources
Sum	Math Operations
Scope	Sinks
Mux	Signal Routing
Relay	Discontinuities

Tabla 8.1. Librerías donde se encuentran los elementos del circuito de la Figura 8.4.

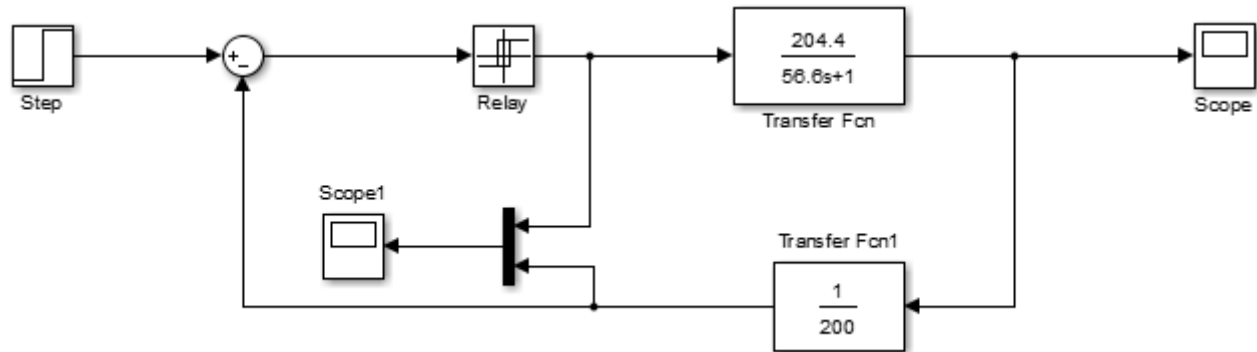



Figura 8.4. Diagrama de bloques de un sistema de control de presión de líquido.

*Nota: En el sistema de la Figura 8.4, el bloque "Relay" representa un controlador on-off con histéresis, el módulo "Transfer Fcn" representa el modelo matemático de un tanque de primer orden, el módulo "Transfer Fcn1" representa al transductor con una relación de 200Pa/V, "Step" representa el valor de referencia en voltios aplicado con una función escalón; los "Scopes" son instrumentos para visualizar la respuesta del sistema, "Scope" muestra el resultado en Pascales y "Scope1" con ayuda de un "mux" permite ver en la misma gráfica la respuesta de la planta en voltios junto con la salida del controlador.*

3. Para que el sumador de la realimentación quede con uno de los signos negativo, de doble clic sobre este y en "List of signs" coloque: |+-.
4. Configure los parámetros de los elementos como se indica a continuación (lo que está en paréntesis no se coloca solo es para referencia del usuario):
  - **Step:**  
 Step Time: 1  
 Initial Value: 0  
 Final Value: 6.0 (voltios)
  - **Transfer Fcn:**  
 Numerator coefficients: [204.4]  
 Denominator coefficients: [56.6 1]
  - **Transfer Fcn1:**  
 Numerator coefficients: [1]  
 Denominator coefficients: [200]
  - **Relay:**  
 Switch on Point: 0.1  
 Switch off Point: 0  
 Output when on: 10  
 Output when off: 0
5. Cambie el tiempo de simulación a 70.0 s y simule el sistema, si ha hecho todo correctamente deberá ver en "Scope1" las gráficas que se muestra en la Figura 8.5 ( Presione el icono  para ver mejor las gráficas).

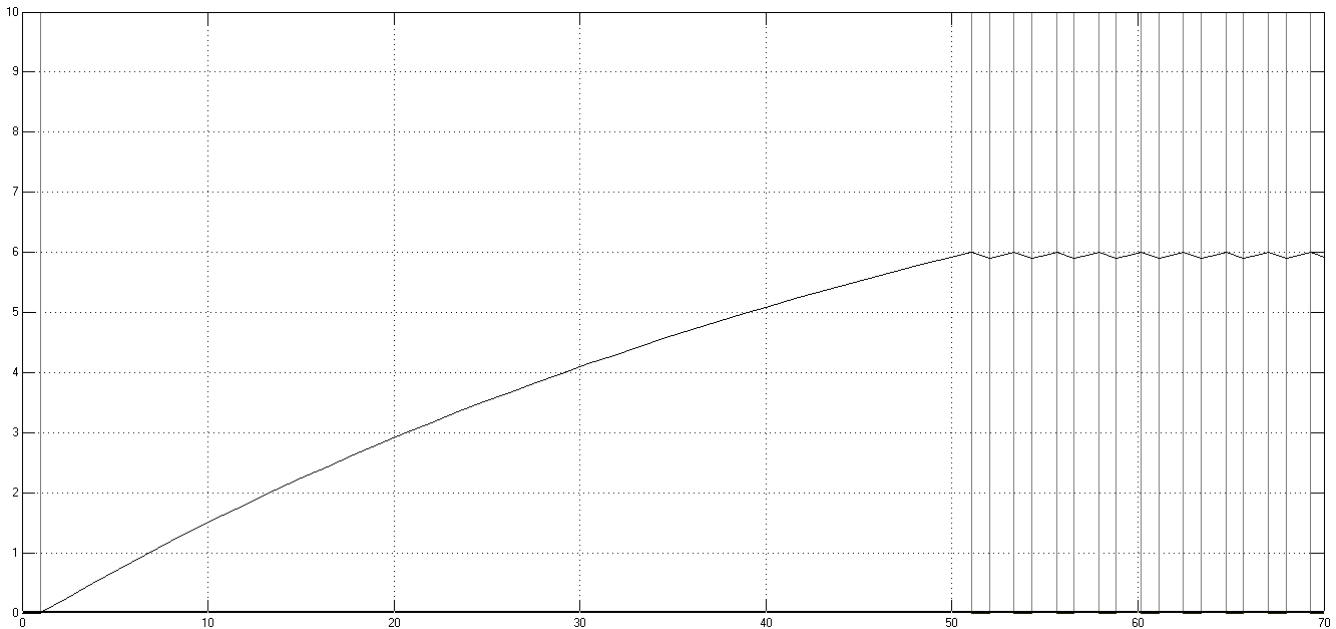



Figura 8.5. Gráficas de "Scope1": Salida del controlador y salida de la planta en voltios.

- Para calcular de manera más exacta el período y amplitud de las oscilaciones se exportará la gráfica al espacio de trabajo de MATLAB para ser graficadas de nuevo ahí y poder utilizar los cursores que las gráficas de SIMULINK no permiten, para ello en la gráfica de clic en el icono de "Parameters" que tiene la siguiente forma , luego vaya a la pestaña "History", deselectione la opción "Limit data points to last", seleccione la opción "Save data to workspace"; coloque como "Variable name": grafsimulink, en "Format" seleccione la opción "Array" y presione el botón "OK".

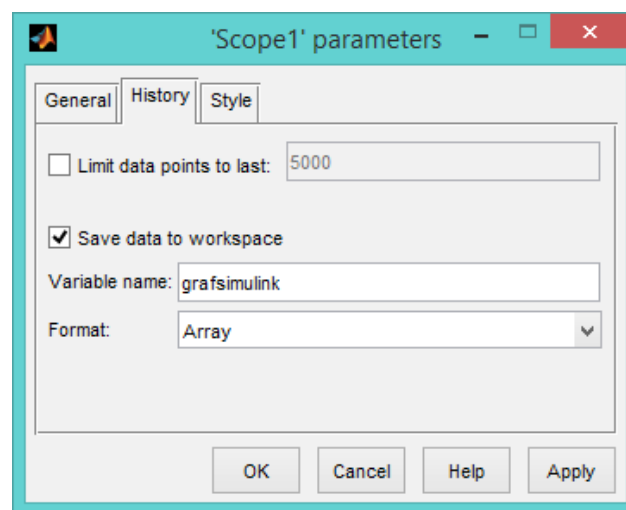


Figura 8.6. Configuración para almacenar las gráficas en el espacio de trabajo de MATLAB.

- Corra de nuevo la simulación para que los datos se exporten al espacio de trabajo de MATLAB,

guarde estos datos en una variable llamada graf1 y luego grafiquelos utilizando los comandos mostrados a continuación:

```
>> graf1=grafsimulink;
>> plot(grafsimulink(:,1),grafsimulink(:,3))
```

8. En la gráfica que se obtiene puede ampliar la parte donde quiere tomar los datos, seleccionar el icono de “Data Cursor” y con Alt + click dar clic sobre los puntos de la gráfica donde se desea fijar los cursores, tal como se muestra en la Figura 8.7. Anote el valor del período y amplitud de las oscilaciones:

$T = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $X_M = \underline{\hspace{2cm}}$ .

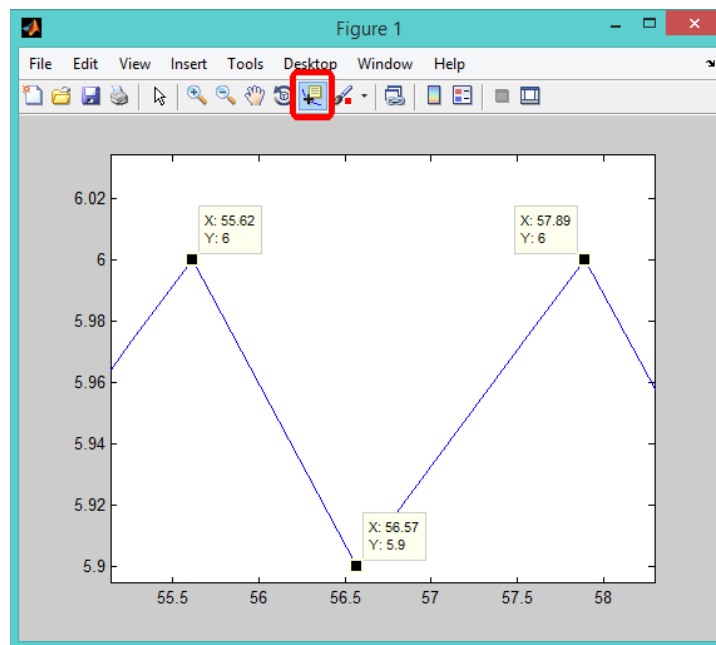


Figura 8.7. Cálculo de amplitud y período de las oscilaciones por medio de cursores.

9. Aumente la histéresis del controlador a 1V cambiando los siguientes parámetros del bloque “Relay”:

Switch on Point: 1  
Switch off Point: -1

10. Aumente el tiempo de simulación a 200 s y simule el sistema. Como se dejó activada la opción “Save data to workspace” cada vez que se corre la simulación la variable grafsimulink se sobrescribe y se exporta al espacio de trabajo, por lo que para calcular el nuevo período y amplitud de las oscilaciones de la respuesta de la planta con este nuevo valor de histéresis, simplemente grafique de nuevo la variable utilizando el mismo comando plot, coloque los cursores y anote los valores obtenidos.

$T = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $X_M = \underline{\hspace{2cm}}$ .



11. Guarde en una variable llamada graf2 a la variable grafsimulink.
12. En muchos sistemas de control a la variable controlada le toma cierto tiempo alcanzar su nuevo valor estable después de que el controlador envía una orden al dispositivo de corrección o actuador, pero al menos “cierta” respuesta parcial se recibe inmediatamente, pero existen casos donde no se percibe absolutamente ninguna respuesta en la variable controlada durante un cierto período de tiempo después de que el controlador envía una señal al dispositivo de corrección. La situación por lo general se presenta cuando la ubicación física del dispositivo de corrección está muy alejada de la ubicación física del dispositivo de medición, en un sistema de llenado de tanque puede deberse a que se debe esperar a que el fluido recorra una tubería de cierta longitud. Para simular esa situación modifique el sistema añadiendo un bloque de retraso de transporte (ubicado en la librería Continuos de SIMULINK) tal como se muestra en la Figura 8.8.

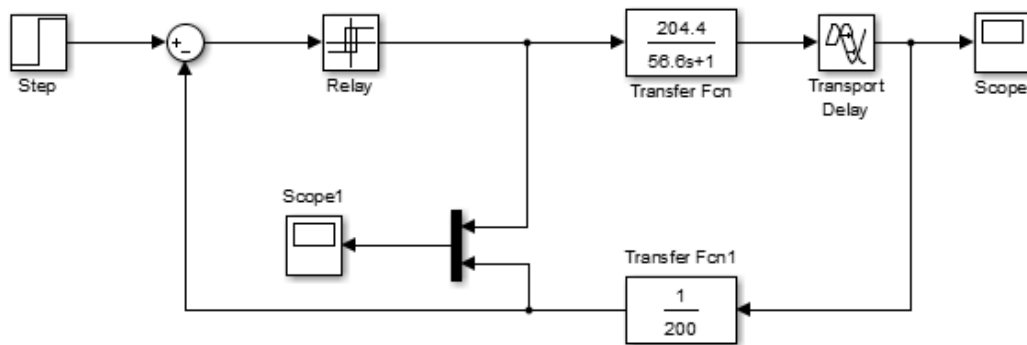


Figura 8.8. Sistema con tiempo muerto.

13. Ajuste en el bloque “Transport Delay” el parámetro “Time delay” a 5 (segundos).
14. Simule el sistema y en el espacio de trabajo de MATLAB grafique la variable exportada con el mismo comando plot para obtener el período y amplitud de las oscilaciones.

$$T = \underline{\hspace{2cm}}, \quad X_M = \underline{\hspace{2cm}}.$$

15. Guarde la variable grafsimulink que ahora contiene estos últimos datos en otra variable llamada graf3.
16. Finalmente para que pueda observar mejor los efectos que se producen en las oscilaciones de la variable controlada al aumentar la histéresis o añadir tiempo muerto al sistema grafique las tres respuestas juntas ejecutando el siguiente comando:

```
>>plot(graf1(:,1),graf1(:,3),'b',graf2(:,1),graf2(:,3),  
'g',graf3(:,1),graf3(:,3), 'r')
```

17. Guarde las gráficas obtenidas y apague la computadora.

## PARTE II. SISTEMA DE CONTROL DE DOS POSICIONES EN UN SISTEMA TÉRMICO.

1. Arme el sistema en lazo abierto que se muestra en la Figura 8.9, observe que ahora el switch 1 se ha colocado en la unión del amplificador de potencia y el sistema térmico, ya que si se pone como siempre entre el voltaje de referencia y el punto suma no tendrá efecto, pues al estar el sistema a lazo abierto esté el switch abierto o cerrado la señal de error es siempre positiva por lo que el controlador estará siempre en ON (10V), en cambio en la posición de la Figura 8.9 si está abierto impedirá el paso de corriente al sistema térmico aunque el controlador esté en ON; también coloque un puente con agujero entre el amplificador de potencia y el sistema térmico.

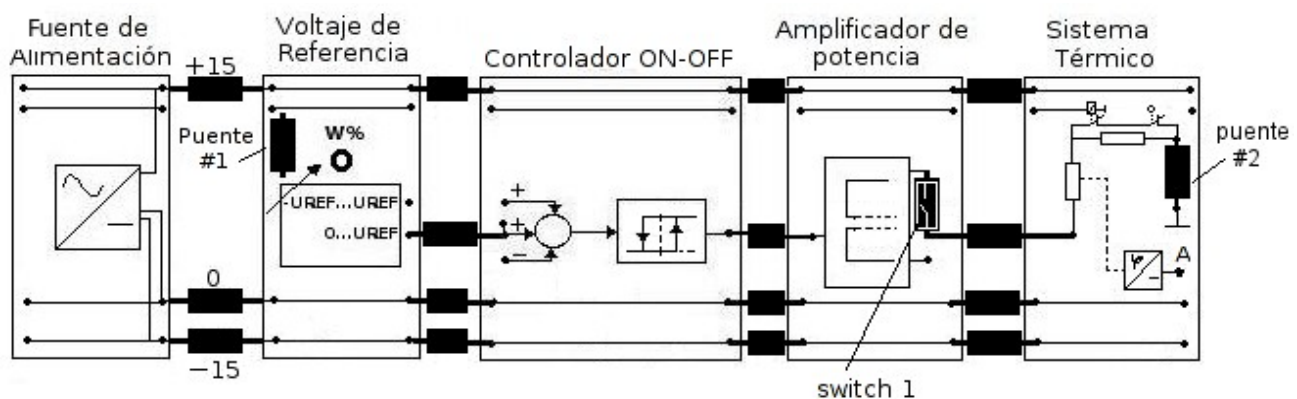


Figura 8.9 Sistema térmico con regulador ON-OFF.

2. Deje abierto el switch 1 y el interruptor que cortocircuita la resistencia.
3. Conecte el canal 1 del osciloscopio al puente con agujero que colocó entre el amplificador de potencia y el sistema térmico y el canal 2 a la salida del "transductor temperatura/voltaje".
4. Realice los siguientes ajustes:

### Controlador ON-OFF:

- $X_u$ : 0V.

### Voltaje de Referencia:

- %W: 80%

### Osciloscopio:

- Escala de tiempo: 20.00 s/
- Referencia de voltaje: Penúltima línea horizontal de la pantalla
- Escala de voltaje canal 1: 2.00V/
- Escala de voltaje canal 2: 2.00V/
- Persistencia: Infinito

5. Obtenga la gráfica de la respuesta temporal de la variable controlada y establezca el tiempo muerto y la constante de tiempo del sistema térmico.

$T_u$ =\_\_\_\_\_,  $T_g$ =\_\_\_\_\_.

6. Apague el sistema. Ahora si coloque el switch 1 entre el voltaje de referencia y el punto de suma y donde estaba este un puente común, además conecte la punta del canal 1 del osciloscopio a la entrada positiva del punto suma (la misma donde está conectado el switch 1).
7. Cierre el lazo de realimentación, encienda el sistema y obtenga la gráfica de la respuesta al escalón.
8. Para un estado de oscilación constante establezca el periodo y la amplitud de la variable controlada teórica y prácticamente.

$T$  (teórica)= \_\_\_\_\_,  $X_M$  (teórica)= \_\_\_\_\_.

$T$  (práctica)= \_\_\_\_\_,  $X_M$  (práctica)= \_\_\_\_\_.

9. Encuentre el porcentaje de error entre los valores teóricos y prácticos:  $\%e$ = \_\_\_\_\_.
10. Ajuste la histéresis del controlador de dos posiciones a  $X_u = 0.5V$ , grafique la respuesta en el tiempo de la variable controlada, establezca el periodo y la amplitud de la variable controlada teórica y prácticamente y encuentre el porcentaje de error entre los valores teóricos y prácticos:

$T$  (teórica)= \_\_\_\_\_,  $X_M$  (teórica)= \_\_\_\_\_.

$T$  (práctica)= \_\_\_\_\_,  $X_M$  (práctica)= \_\_\_\_\_.

$\%e$ = \_\_\_\_\_.

11. Reduzca todas las perillas del voltaje de referencia y del controlador ON-OFF al mínimo, apague la alimentación en todos los equipos utilizados, desconéctelos y guarde los puentes y cables en su lugar.

### Análisis de Resultados

1. ¿Indique como afecta la histéresis y el tiempo muerto a la amplitud y período de las oscilaciones?
2. ¿Cree conveniente ajustar una banda de histéresis grande para procesos que no aceptan desviaciones del punto de referencia excesivas? Explique.
3. Presente las gráficas obtenidas y las respuestas a las preguntas que se le hicieron en el procedimiento, dejando constancia de **todos** los cálculos realizados.

### Investigación Complementaria

- ◆ Investigue dos controladores ON-OFF mecánicos comunes en la industria.

### 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.

## Guía 8: El controlador ON-OFF.

Alumno:

Puesto No:

Docente:

GL:

Fecha:

## EVALUACIÓN

	%	1-4	5-7	8-10	Nota
CONOCIMIENTO	25	Conocimiento deficiente de los siguientes fundamentos teóricos: -Características del controlador ON-OFF -Concepto de Histéresis. -Concepto de tiempo muerto	Conocimiento y explicación incompleta de los fundamentos teóricos.	Conocimiento completo y explicación clara de los fundamentos teóricos.	
APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO	70	Cumple solamente con uno de los criterios: -Obtiene correctamente de manera práctica el período y amplitud de las oscilaciones de la variable controlada. -Calcula correctamente los valores teóricos de amplitud y período de las oscilaciones. -Utiliza correctamente SIMULINK para simular sistemas con controlador on-off. -Exporta correctamente las gráficas de SIMULINK al entorno de trabajo de MATLAB para analizar mejor.	Cumple con dos o tres de los criterios	Cumple con los cuatro 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					