

# Practica No.3 Caracterización y Control ON/OFF de un Sistema Térmico.

Nicolás David Pastran Zamora  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Bogotá, Colombia  
ndpastranz@correo.udistrital.edu

David Sebastián Rodríguez Jiménez  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Bogotá, Colombia  
dsrodriguezj@correo.udistrital.edu.co

Daniel E. A. Hernández Carreño  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Bogotá, Colombia  
deahernandezc@correo.udistrital.edu.co

**Abstract**—The characterization of a thermal system is performed using the step response method and an On-Off temperature control is implemented considering the stages of census, power and conditioning of the error signal.

**Resumen**—Se realiza la caracterización de un sistema térmico usando el método de respuesta al escalón y se implementa un control de temperatura On-Off considerando las etapas de censado, potencia y acondicionamiento de la señal de error.

**Palabras clave**— Caracterización, Control, Error, Potencia, Señal, Temperatura.

## I. INTRODUCCIÓN

En esta práctica de laboratorio se propone realizar el montaje, caracterización e implementación de un sistema térmico con un control de temperatura ON/OFF.

Para la construcción la planta térmica se precisa usar un bombillo de faro para motocicleta de 12 V y 20 W como fuente térmica, un sensor de temperatura LM35 para el medir la temperatura interna de la planta térmica, envases de icopor de 24 oz como aislamiento y cuerpo de la planta térmica; usando dos envases de icopor, en el interior de los cuales se coloca el bobillo y el sensor de temperatura fijos en su lugar con macilla epoxi, dejando las conexiones eléctricas de cada uno accesibles desde el exterior de la planta.

El sistema control ON/OFF consiste de una etapa acondicionamiento de la señal de voltaje del LM35 y un comparador con el valor de referencia, empleando los amplificadores operacionales TL084CN y LM353.

Para controlar el encendido y apagado del bobillo se precisa de una etapa de potencia conformada por un seguidor de voltaje y un transistor MOSFET IRFP250N.

La caracterización de la planta térmica se realiza en lazo abierto con el funcionamiento de las etapas de potencia y de comparación, teniendo un valor de referencia fijo entre 0 y 12 V.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para este laboratorio se implementa un sistema de lazo cerrado como el mostrado en la Fig. 1.

Donde la señal de entrada es un voltaje de referencia el cual representa la temperatura deseada y la salida es la temperatura que tiene la planta.

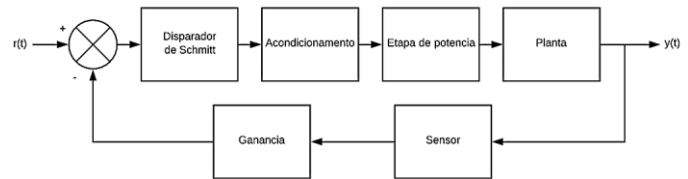


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado.

Para el diseño del primer bloque (el disparador de Schmitt), se utilizan las ecuaciones de diseño de un disparador de Schmitt no inversor como el de la Fig. 2, las cuales son:

$$\frac{R_f}{R_1} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{ON} - V_{OFF}}$$

$$V_{REF} = \frac{V_{ON} R_f + V_{OL} R_1}{R_1 + R_f}, \quad V_{REF} = \frac{V_{OFF} R_f + V_{OH} R_1}{R_1 + R_f}$$

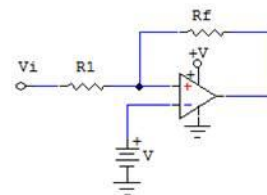


Fig. 2. Topología de disparador de Schmitt no inversor.

Para este diseño se decide usar una fuente  $V_{cc}^+$  de 18V para sobredimensionar pérdidas por la etapa de potencia y  $V_{cc}^-$  de -5V para sobredimensionar la mínima entrada negativa.

Con anterioridad se caracterizó  $V_{OH}$  y  $V_{OL}$  del lm que se utilizara para tener más precisión, los resultados fueron:

$$V_{OH} = V_{cc}^+ - 0.6 = 17.4V, \quad V_{OL} = V_{cc}^- + 1.6 = -3.4V$$

Para este diseño se sabe que  $V_{ON} = 0.1$  y  $V_{OFF} = -0.1$ , con estos datos se procede a hallar los valores de las resistencias:

$$\frac{R_f}{R_1} = \frac{17.4 + 3.4}{0.1 + 0.1} = 104, \quad R_f = 104 R_1$$

$$V_{REF} = \frac{0.1 \cdot 104 + (-3.4) \cdot 1}{1 + 104} = \frac{1}{15}$$

$$V_{REF} = \frac{(-0.1)104 + 17.4}{1 + 104} = \frac{1}{15}$$

El voltaje  $V_{REF}$  se hace haciendo un divisor resistivo con  $V_{cc}^+$  ya que la impedancia de entrada del amplificador operacional es muy alta, por lo la relación resistiva es la siguiente:

$$\frac{1}{15} = \frac{18V R_a}{R_a + R_b}, \quad \frac{R_b}{R_a} = 15 \times 18 - 1 = 269$$

$$R_b = 269 R_a$$

Dadas estas condiciones de diseño se buscan las resistencias adecuadas que cumplan esas características, para este caso se encontró que:

$$\text{Si } R_1 = 1.5K\Omega \text{ entonces } R_F = 156K\Omega = 100K\Omega + 56K\Omega$$

$$\text{Si } R_a = 820K\Omega \text{ entonces } R_b = 3.048K\Omega \approx 3K\Omega$$

El bloque de acondicionamiento es necesario dado que la salida del disparador será  $V_{OH} = 17.4$  y  $V_{OL} = -3.4$  pero la entrada de la etapa de potencia idealmente debería ir máximo hasta 12V ya que es el valor nominal del bombillo utilizado y mínimo 1.5V ya que este tendrá como  $V_{cc}^- = 0V$  por lo que la entrada mínima debe ser aproximadamente  $V_{IL} = V_{cc}^- + 1.5 = 1.5V$  además para este voltaje el bombillo aún no ha encendido así que no es necesario que el voltaje de entrada del seguidor sea 0, asimismo otra ventaja es que el transistor utilizado para la etapa de potencia tiene que soportar un voltaje equivalente a la siguiente ecuación:

$$V_{transistor} = V_{cc}^+ - V_{bombillo}$$

Por lo tanto, si el voltaje mínimo del bombillo es mayor a cero, el voltaje que debe soportar el transistor no será siempre menor al que entrega la fuente de polarización haciendo menos probable que este se queme.

Para el diseño de esta etapa se busca que cuando el voltaje de entrada sea -3.4V el voltaje de salida sea 1.5V y cuando el voltaje de entrada sea 17.4V el voltaje de salida sea 12V, los valores intermedios deben actuar de manera lineal, por lo que se halla la ecuación que describe la función lineal dados dos puntos:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{12 - 1.5}{17.4 + 3.4} = \frac{105}{208}$$

Hallada la pendiente se procede a hallar el punto de corte con el eje y (llamado b).

$$12 = \frac{105}{208} \times 17.4 + b$$

$$b = 12 - \frac{105}{208} \times 17.4 = \frac{669}{208}$$

De este modo la función deseada es:

$$y = \frac{105}{208} V_i + \frac{669}{208}, \quad y = \frac{105}{208} V_i + \frac{223}{1248} 18V$$

Se usa un multientradas para generar esa función de transferencia, por lo que se utilizan las ecuaciones del diseño de multientradas:

$$A^+ = A^- + 1, \quad A^+ = \frac{105}{208} + \frac{223}{1248} = \frac{853}{1248}$$

Como  $A^+ < 1$  entonces  $A^- = 0$  y falta agregar una ganancia positiva más para completar 1.

$$\frac{853}{1248} + A_a^+ = 1, \quad A_a^+ = 1 - \frac{853}{1248} = \frac{395}{1248}$$

Por lo que se evidencia que no es necesario hacer un multi entradas, sino que se puede hacer un acondicionamiento resistivo con tres resistencias y luego el seguidor de la etapa de potencia, donde  $R_a$  ira conectada a la salida del disparador,  $R_b$  a  $V_{cc}^+$  y  $R_c$  a tierra.

Para facilitar su cálculo se sigue tratando como un multi entradas con la siguiente ecuación:

$$y = \frac{105}{208} V_i + \frac{223}{1248} 18V + \frac{395}{1248} 0V$$

De donde la relación de resistencias será:

$$\frac{R_f}{R_a} = \frac{105}{208}, \quad \frac{R_f}{R_b} = \frac{223}{1248}, \quad \frac{R_f}{R_c} = \frac{395}{1248}$$

Con estos datos se pueden hallar las relaciones entre resistencias sin tener en cuenta  $R_f$ , dividiendo entre sí, de manera que:

$$\frac{R_a}{R_c} = \frac{395}{1248} \div \frac{105}{208} = \frac{79}{126}, \quad \frac{R_b}{R_c} = \frac{395}{1248} \div \frac{223}{1248} = \frac{395}{223}$$

Por lo que tenemos dos grados de libertad, de este modo buscamos valores adecuados para aproximarnos lo más posible a estas relaciones, para nuestro caso se escogieron:

$$R_a = 15K\Omega \quad R_b = 45K\Omega \quad R_c = 22K\Omega$$

Para la etapa de potencia se diseña un seguidor de voltaje de potencias con un amplificador operacional y un transistor MOSFET de potencia, como el de la Fig. 3. De forma que el voltaje  $V_{ref}$  a la entrada del amplificador operacional excitará la compuerta del MOSFET y el voltaje sobre el bobillo será próximo al voltaje  $V_{ref}$

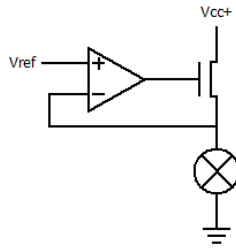


Fig. 3. Etapa de potencia. Seguidor de voltaje.

Para proporcionar la corriente necesaria para encender el bombillo en el rango de 0 V a 12 V, se sobre dimensiona el diseño y se escoge trabajar con un el transistor de potencia IRFP250N, que soporta una corriente  $i_D$  de 30 A y una disipación de potencia de 214 W.

Dada la realimentación negativa del operacional  $V^+ = V^-$  el voltaje sobre el bobillo (el cual se tratará como una resistencia R), será  $g_m v_{gs} R$ , por lo tanto

$$V^+ = V^- = g_m v_{gs} R, \quad v_{gs} = \frac{V^-}{g_m R}$$

$$v_o = v_{gs} + V^-, \quad v_o = V^- \left( 1 + \frac{1}{g_m R} \right)$$

Según [3], el valor de  $g_m$  para el IRFP250N es de 17 S y el valor de resistencia del bombillo a 12 V es de 6.1  $\Omega$ . El límite de operación se encontrará cuando  $v_o$  se acerque al valor de la fuente de polarización, es decir, cuando Vref sea 12 V

$$v_{o,max} = 12 \left( 1 + \frac{1}{17 * 6.1} \right) = 12.12 \text{ V}$$

Para el caso del TL084CN con polarización  $+V_{cc} = 18 \text{ V}$  y  $-V_{cc} = 0 \text{ V}$ , el valor de voltaje  $v_{o,max}$  y  $v_{o,min}$  que se podrá tener a la salida antes que se sature el amplificador operacional es de 17 V y 1 V respectivamente [4]. Por lo tanto, el seguidor de voltaje de potencia se comportará de manera lineal en el rango de 1.5 V a 12 V.

Para la etapa de censado se emplea un sensor de temperatura de LM35, para este se tiene un rango de temperatura operación de temperatura de -55 °C a 150°C, con una precisión de 1 °C a temperatura ambiente y de 1.5°C a la temperatura máxima. El LM35 puede ser polarizado como máximo con una fuente de 30 V y requiere un voltaje mínimo de polarización de 3.5 V para realizar medidas a 75 °C. [2]

Para polarizar el amplificador operacional se usa un rectificador de voltaje a 5.1 V, como el de la Fig. 4, para asegurar que el sensor realice mediaciones estables y certeras ene l rango de 25°C a 75°C. También se toma la sugerencia del fabricante para usar el sensor con una sola fuente junto con un amortiguador RC, para disminuir el ruido eléctrico de alta frecuencia en la salida del sensor. [2]

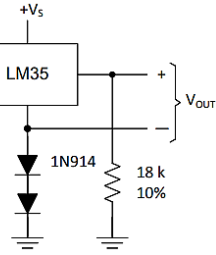


Fig. 4. Sensor LM35 polarizado con una fuente. [2]

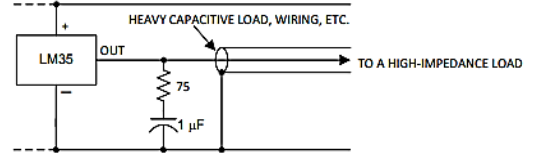


Fig. 5. Sensor LM35 con amortiguador RC. [2]

La respuesta del sensor al aire quieto tarda 4 minutos en llegar al 100% del valor final, este aspecto que se ve incluido en la caracterización de la planta más adelante. [2]

Posterior a la etapa de censado, por datos del diseño se debe adecuar la salida del sensor para que el voltaje que entre al restador sea de  $100 \frac{mV}{^\circ C}$  dado que el sensor utilizado tiene como salida  $10 \frac{mV}{^\circ C}$  es evidente que es suficiente con amplificar la salida 10 veces, para esto se utilizara la topología del amplificador no inversor como el mostrado en la Fig. 3 cuya ecuación que describe su comportamiento es:

$$V_o = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 10$$

$$\frac{R_f}{R_1} = 9$$

Para cumplir esta condición se escogen los siguientes valores resistivos:

$$R_f = 9K\Omega = 18K\Omega // 18K\Omega$$

$$R_1 = 1K\Omega$$

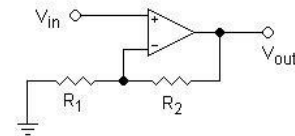


Fig. 6. Topología de amplificador no inversor.

Por último, se procede al diseño del restador como el visto en la Fig. 4.

Ajustando la ecuación para que cumpla que  $A^+ = A^- + 1$  se tiene que:

$$y = Va - Vb + 1$$

Donde  $V_a$  es la entrada del sistema y  $V_b$  es la salida del sensor amplificada. Con estos datos se procede a hallar la relación de resistencias adecuadas para satisfacer la ecuación:

$$\frac{R_f}{R_1} = 1 \quad \frac{R_f}{R_2} = 1 \quad \frac{R_f}{R_3} = 1$$

Por lo que para satisfacer la ecuación todas las resistencias deben ser iguales.

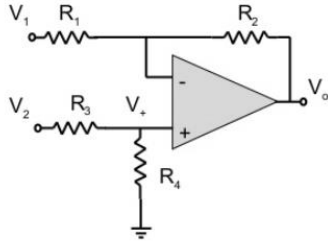


Fig. 7. Topología de multientradas (restador).

### III. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Para identificar el sistema descrito en la Fig. 1 de forma analítica, se planteará el modelamiento del sistema dinámico por medio de variables de estado, una vez obtenidas estas encontrar la ecuación característica del sistema, donde la entrada será el voltaje de la resistencia y la salida la temperatura del recipiente.

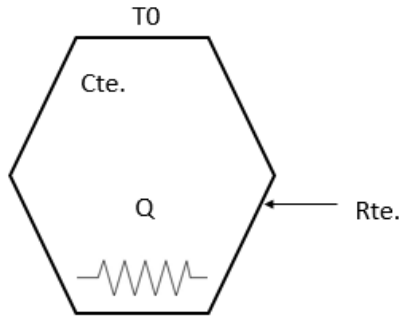


Fig. 8. Figura Representativa para el sistema.

### Modelamiento Teórico

Para modelar el sistema se deben identificar los elementos que componen al mismo, estos son la resistencia al flujo de calor en el recipiente, característica por las dimensiones del recipiente y el material del mismo; el otro elemento del sistema es la capacitancia inherente de los cuerpos al almacenar calor en forma de energía interna, esta propiedad existe debido al fluido que almacenado en el recipiente y de su volumen. Antes de empezar el modelamiento se realizara el calculo de estos elementos para el sistema particular. Para el elemento disipador de energía:

$$Rh = \frac{A}{l * \rho}$$

Donde:

$Rh$ , Es la Resistencia terminal

$A$ , Es el Área del recipiente la base, la tapa y las laterales

$l$ , Es el espesor del recipiente

$\rho$ , Es la conductividad del material en este caso poliestireno expandido

$$Rl = \frac{2 * \pi * 6cm * 24cm}{2m * m * 0.041 \frac{W}{K * m}} = 1103.38 \frac{K}{W}$$

$$Rb = \frac{\pi * (6cm)^2}{2m * m * 0.041 \frac{W}{K * m}} = 137.92 \frac{K}{W}$$

$$Rt = \frac{\pi * (6cm)^2}{2m * m * 0.041 \frac{W}{K * m}} = 137.92 \frac{K}{W}$$

$$Rh = Rs |Rb| |Rt = 64.90 \frac{K}{W}$$

Para el elemento que almacena energía potencial:

$$Ch = p * V * Cp$$

Donde:

$Ch$ , Es la Capacitancia Térmica

$V$ , Es el Volumen del recipiente

$p$ , Es la densidad del fluido en este caso aire

$Cp$ , Es el calor específico del fluido en este caso aire

$$Ch = \pi * (6cm)^2 * 24cm * 1.225 \frac{kg}{m^3} * 1012 \frac{J}{kg * K}$$

$$Ch = 3.36 \frac{J}{K}$$

Ecuaciones características del sistema

$$\begin{aligned} Q_{int} &= Q_{RH} + Q_{CH} \\ Q_{int} &= \frac{T}{Rh} + Ch * \frac{dT}{dt} \\ Q_{int} &= T \left( \frac{1}{Rh} + Ch * S \right) \\ T &= \frac{Q_{int} * Rh}{1 + Ch * Rh * S} \end{aligned}$$

Como  $Q_{int}$  es la potencia disipada por el bombillo se puede expresar como

$$Q_{int} = \frac{V^2}{R}$$

Donde:

$V$  es la tensión de salida del sistema de control

$R$  es la resistencia eléctrica del Bombillo  $R = 7\Omega$

$$T = 0.042 * \frac{V^2}{4.58 * 10^{-3} + S}$$

## Modelamiento Experimental

Para realizar el modelamiento de forma experimental, se realizó un análisis al comportamiento del mismo ante una entrada escalón unitario. Una vez el sistema tuviera una temperatura estable se aumenta 1 voltio la tensión del bombillo, de tal manera que este aumentara la potencia entregada al sistema en forma de calor y el sistema generara una respuesta. Se empezaron a ajustar los valores de tensión del bombillo desde 4 voltios en adelante ya que a un voltaje menor que este el bombillo no encendía. A continuación, se muestra los resultados obtenidos en el osciloscopio usando la etapa de censado (LM35) y el amplificador por 10.

Cabe resaltar que la respuesta del sistema es muy variable debido a condiciones ambientales y errores en la medida, como la inestabilidad de la etapa de censado, el offset característico de los amplificadores operacionales, el ruido blanco que interfiere la medida o inestabilidad en la fuente que le entrega energía al sistema para este caso la etapa de potencia descrita anteriormente. Por estas razones algunas medidas fueron tomadas hasta que las mediciones fueran estables y congruentes, en la mayor parte de los casos antes de llegar al estado estable estacionario.

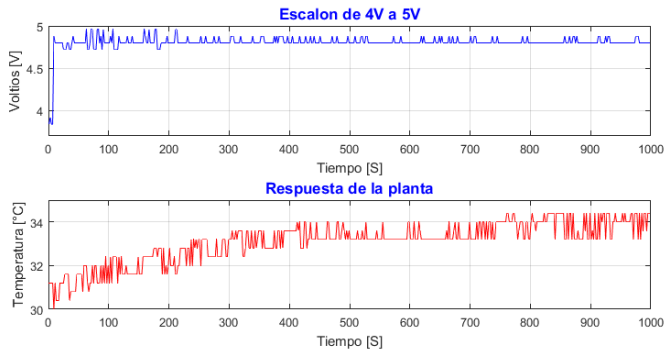


Fig. 9. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 4 V a 5 V

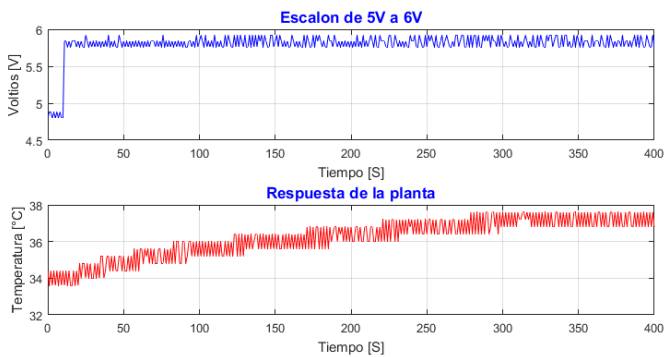


Fig. 10. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 5 V a 6 V

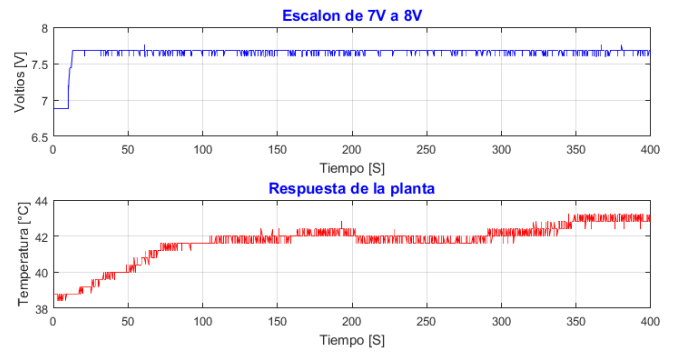


Fig. 11. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 7 V a 8 V

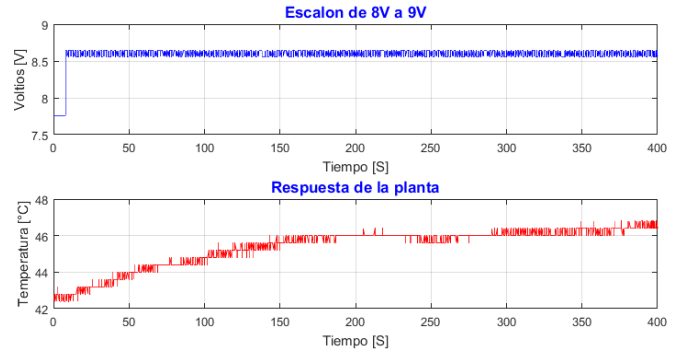


Fig. 12. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 8 V a 9 V

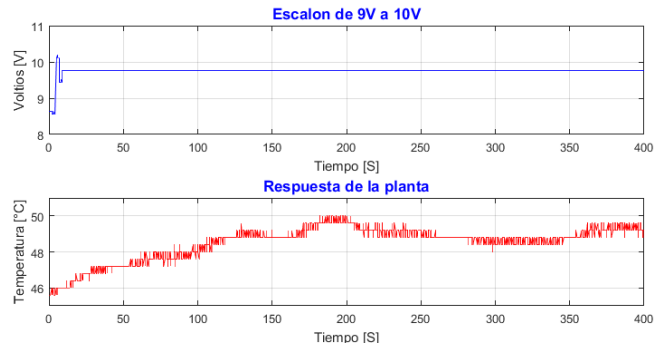


Fig. 13. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 9 V a 10 V

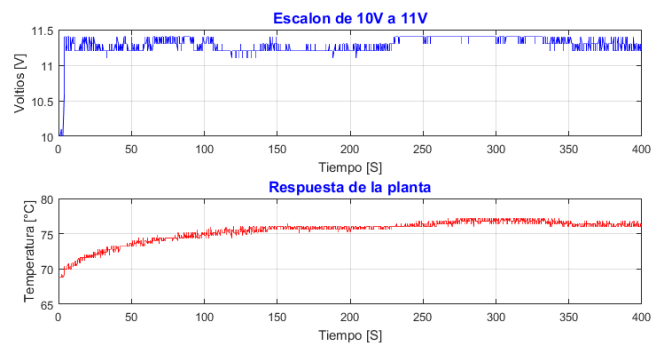


Fig. 14. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 10 V a 11 V

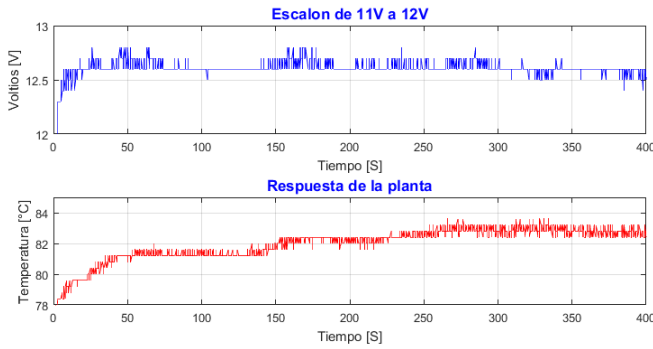


Fig. 15. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 11 V a 12 V

Como dato adicional se tomo la medida de un escalon mayor a un voltio, para obtener un mayor rango de valores mas amplio lo que permite una mejor visualizacion, en la siguiente figura se puede ver sus resultados:

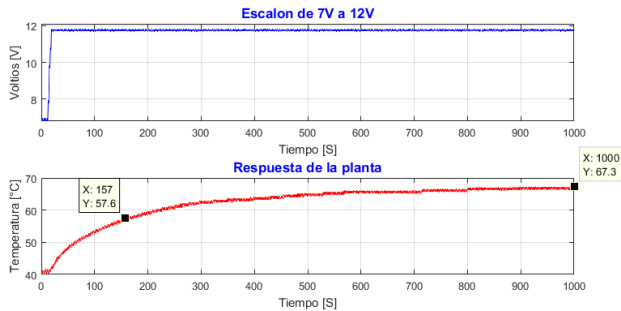


Fig. 16. Respuesta del sistema para Voltaje de entrada de 7 V a 12 V

Para comparar la respuesta del sistema para cada entrada se hace una gráfica, restando el valor inicial de cada respuesta. Por efectos visuales se realiza la gráfica con solo 4 escalones:

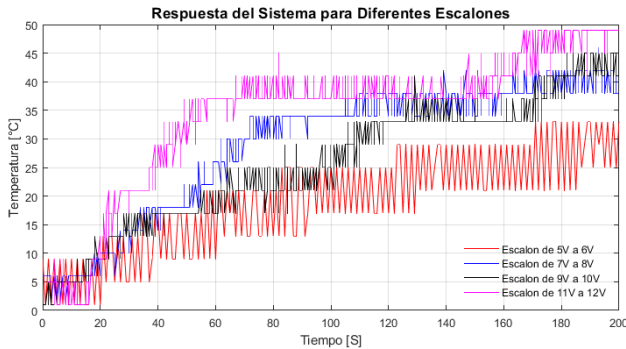


Fig. 17. Respuesta del sistema para Diferentes Escalones

A partir de las gráficas obtenidas con anterioridad y sabiendo que el sistema es de primer orden, gracias al análisis teórico. Se puede estimar la ecuación característica del sistema. Para este análisis se usará la gráfica de la figura 2 y de la figura 9, el estado estable estacionario llega después de haber pasado cerca de 1000 segundos, a partir de este valor podemos calcular el  $\tau$  característico del sistema. El sistema llega al estado estable después de  $5\tau$  aproximadamente de modo que:

$$5 * \tau = 1000, \quad \tau = 200$$

Otra opción para calcular el  $\tau$  característico del sistema usando la figura 9, aplicando el siguiente criterio. En el 63% del valor de estado estable estacionario, el tiempo transcurrido es igual a  $\tau$ , de modo que podemos hacer el calculo de la siguiente forma:

$$V_{67\%} = 0.63(V_{t_{est}} - V_{t0}) + V_{t0}$$

$$V_{67\%} = 0.63(67.3^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}) + 40^{\circ}\text{C} = 57.46$$

$$\tau = 157 \text{ s}$$

Haciendo un análisis general de todas las gráficas podemos observar que cierto tiempo después de haber el escalón, el sistema presentaba oscilaciones debido a las condiciones ambientales en las que se encontraba el mismo, por tales razones se hace complicado observar el estado estable estacionario.

Para obtener la función equivalente del sistema partimos del hecho que existe que todos los sistemas térmicos tienen una temperatura inicial, la cual traducimos a voltaje de modo la función de transferencia de la siguiente forma:

$$T(V) = \frac{k}{T * s + 1} Vin(V) + Ta(V)$$

De la etapa de censado junto con el acondicionamiento respectivo y asumiendo la temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ , tenemos que:

$$T(V) = \frac{k}{T * s + 1} Vin(V) + 0.25V$$

Aplicando el teorema del valor final tenemos que:

$$T(V) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{k}{T * s + 1} Vin(V) + 2.5V = k * Vin(V) + 0.25V$$

A partir del supuesto anterior pasamos a calcular k:

TABLE I. REGRESION LINEAL PARA ENCONTRAR VALOR DE K

Vin	Vout	Vin*Vout	Vin
5	3.4	17	25
5.8	3.8	22.04	33.64
7.6	4.27	32.452	57.76
8.6	4.64	39.904	73.96
9.8	5.5	53.9	96.04
11.4	7.6	86.64	129.96
Total			

<sup>a</sup>. Tabla 1 Regresión lineal para hallar valor de K

La grafica correspondiente junto con la línea de tendencia:

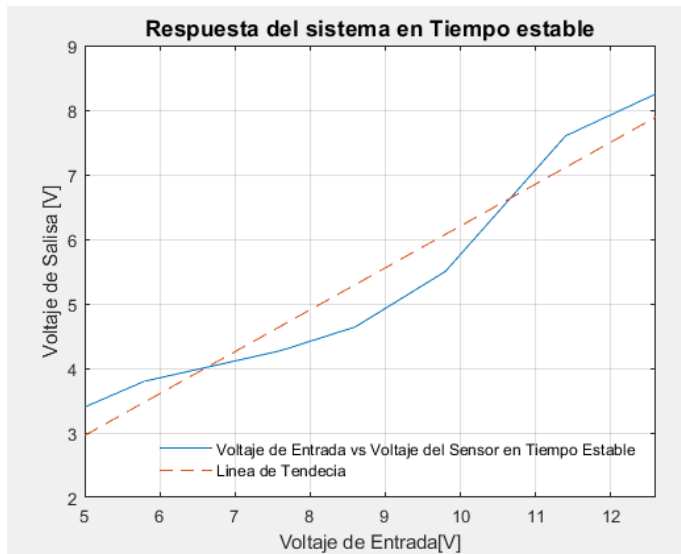


Fig. 18. Respuesta del sistema aplicando el teorema del valor final

Se realiza mínimos cuadrados perfectos obtenemos el valor de la pendiente equivalente a  $k$ .

$$k = 0.6489$$

Se obtiene la función de transferencia equivalente:

$$T(V) = \frac{0.6489}{T * s + 1} Vin(V) + 0.25V$$

#### IV. RESULTADOOS

Una vez implementado el control ON-OFF, se observó la respuesta del sistema para diferentes voltajes de referencia, obteniendo los siguientes resultados:



Fig. 19. Respuesta de la planta para un voltaje de referencia 3.4V equivalente a 34°C

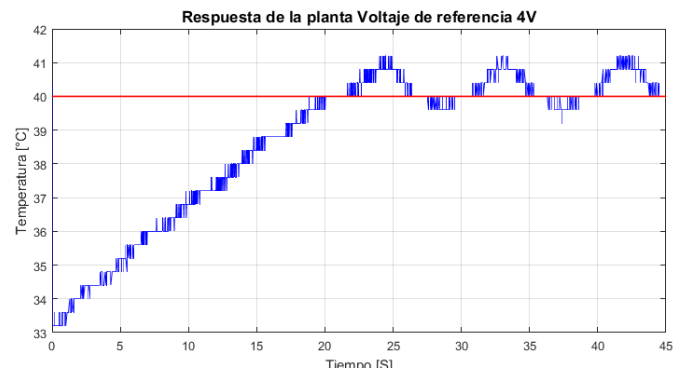


Fig. 20. Respuesta de la planta para un voltaje de referencia 4V equivalente a 40°C

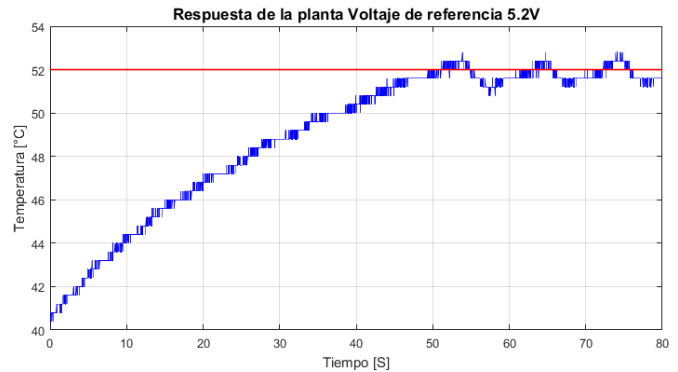


Fig. 21. Respuesta de la planta para un voltaje de referencia 5.2V equivalente a 52°C

#### V. CONCLUSIONES

Para caracterizar un sistema no solo basta con conocer la respuesta al escalón, ya no se tiene certeza del orden del mismo, puesto que un sistema de segundo orden con  $\xi > 1$  tiene una respuesta similar a un sistema de primer orden, entonces se hace necesario hacer el modelamiento dinámico del mismo por medio de variables de estado, hasta hallar la ecuación característica del mismo.

Durante la implementación se destaca la necesidad de usar el circuito retardador RC para la salida de voltaje del sensor LM35, como se observa en las figuras 9 y 10 dada la gran variación que se presenta en la medición se requiere disminuir estas las fluctuaciones de voltaje para garantizar el buen comportamiento de los sistemas de control que se deseen implementar en la planta; como se observa en la figura 16, la implementación del circuito retardador RC permite obtener un señal más estable útil para la comparación con un voltaje de referencia.

A la hora de implementar un control ON-OFF es más optimo implementar un arreglo de transistores push-pull que una etapa seguidora de voltaje, ya que el consumo de potencia es menor debido a que los transistores que están únicamente en corte o en saturación en donde la potencia disipada por los mismos es mínima. Por el contrario, al implementar un seguidor de potencia, se trabaja en la zona activa de los transistores, en donde tenemos el mayor consumo de potencia de estos.

El sistema térmico presenta diferentes características dinámicas en función de la temperatura interna de la planta térmica, como se puede observar en la figura 18 a 20, a medida que aumenta la temperatura interna de la planta térmica, se observa un comportamiento de saturación térmica por lo cual la temperatura aumenta con menor velocidad.

Como se puede apreciar en la figura 18 al contrastarla con la Figura 19 el tiempo que tarda en enfriarse la planta es mayor que el tiempo que tarda en calentarse para temperaturas de referencia más bajas y a su vez el tiempo que tarda en calentarse es menor.

En las Figuras 17,18,19 se observa como la pendiente de subida de la temperatura es menor para mayores valores de

voltaje de referencia y del mismo modo la pendiente negativa es menor entre menor sea el valor de voltaje de referencia.

#### REFERENCIAS

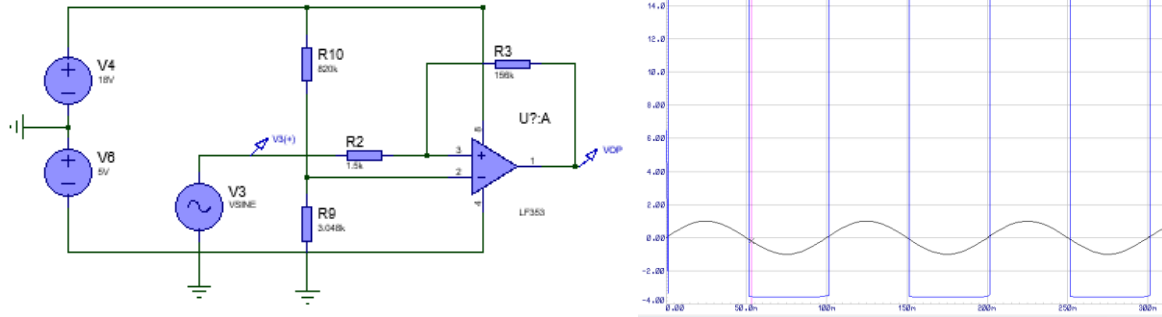
- [1] Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson Educación. Quinta edición.
- [2] "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors", Texas Instruments, 2017. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.
- [3] "IRFP250N N-Channel Power MOSFET", Fairchild semiconductor, 2002. [Online]. Available: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/IRFP250N.pdf>.
- [4] "TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers", Texas Instruments, 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082.pdf>.
- [5] Apuntes de clase de control I, dictado por IE. Diana Marcela Ovalle Martínez, PhD en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.



## ANEXOS

### SIMULACIONES BLOQUES CARACTERÍSTICOS DEL SISTEMA DE CONTROL

#### Disparador de Smith



#### Control On-Off

