

# Control de Temperatura ON- OFF para Horno Eléctrico

**Resumen**—El presente informe, describe el análisis, diseño e implementación del control ON- OFF de Temperatura de un Horno eléctrico. Para poder establecer el Horno como una planta a controlar, es necesario definirlo en términos de la Transformada de Laplace, para tal fin, se obtuvo la función de transferencia del sistema en lazo abierto mediante la observación de su funcionamiento en el tiempo para sus dos modos de operación, calentamiento (acción positiva), y enfriamiento (acción negativa). Se encontró que el modelamiento del sistema en cada caso, es un sistema de primer orden, que se puede modelar con una función de transferencia aproximada ya conocida.

El sistema de control se implementó de forma analógica, mediante circuitos con amplificadores operacionales, conmutadores, un sensor de temperatura semiconductor, y otros componentes discretos. En las siguientes secciones se especificarán las condiciones de diseño del sistema y el hardware necesario para su funcionamiento, junto con la comparación entre las simulaciones realizadas en el software Simulink y los valores obtenidos en la caracterización del sistema real.

## I. INTRODUCCIÓN

LOS sistemas de Control presentan una infinidad de aplicaciones en todos los campos de la ingeniería y las ciencias aplicadas; en cierta forma, dejando de lado la rigurosidad técnica, cada interacción entre los seres vivos y su medio es un acto de control. Desde el punto de vista de la ingeniería sin embargo, los procesos industriales son la aplicación de mayor interés, puesto que al encontrar las variables que determinan el estado de estos, y ser capaz de acceder a ellas para su observación y control, se presentará la oportunidad de hacer que el sistema se comporte dentro de los parámetros requeridos por la industria, posiblemente logrando incrementar productividad y robustez de las operaciones.

En la teoría de control, una de las formas predilectas para la representación de un sistema son las funciones de transferencia, las cuales definen las relaciones de entrada-salida de los sistemas dinámicos Lineales e Invariantes en el Tiempo (LTI), con esto, a pesar de no conocer la estructura física del sistema, aprovechando las propiedades de los sistemas LTI (los representables mediante funciones de transferencia), basta con estudiar la salida o respuesta a diferentes entradas para conocer la naturaleza de este [1].

Para la realización de este proyecto se requiere implementar

un Control On- Off para un Horno eléctrico, en el cual se establece una temperatura de referencia, y, mediante un sensor de temperatura semiconductor LM35, poder realizar la comparación entre la temperatura deseada y la temperatura existente, determinando así el encendido y apagado de dos actuadores, que para el caso son una resistencia que realizará el calentamiento dentro del horno, y un ventilador, que, en caso de que la temperatura en el horno sea mayor a la requerida, extraerá el aire caliente del horno hasta llegar a la temperatura deseada.

Para realizar el modelamiento del sistema realimentado, se debe conocer en primera medida el modelo del sistema en lazo abierto (Planta), la cual, al presentar dos comportamientos diferentes, tendrá dos funciones de transferencia diferentes.

El diagrama de bloques para el sistema se aprecia en la Figura 1.

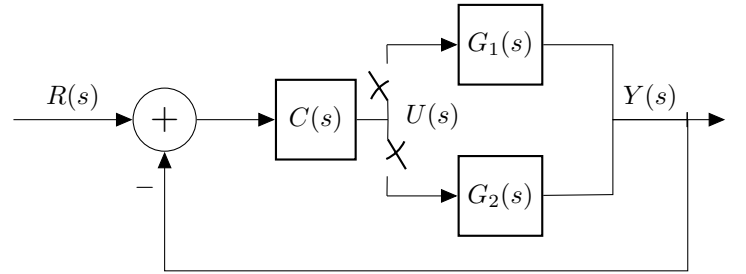


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema

## II. DESARROLLO

### A. Descripción del Funcionamiento

El presente trabajo describe un sistema de Control de Temperatura On- Off para un horno eléctrico, los actuadores del sistema son una resistencia eléctrica de  $100 \Omega$  con alimentación  $120 V_{AC}$ , @60 Hz la cual cumplirá la función de calentar el horno al conectarse a la red AC, y un ventilador de  $12 V_{DC}$ , que se encarga de extraer el aire caliente del horno; ambos conmutarán de forma complementaria para que la temperatura en el horno se mantenga alrededor de un valor de referencia. Para definir qué elemento debe estar encendido, se utiliza un comparador para saber si la temperatura dentro del horno es mayor o menor a la temperatura de referencia.

En caso en que la referencia sea mayor, será conectada la resistencia, en caso contrario, el ventilador se encenderá, disminuyendo la temperatura en el interior del Horno.

Para realizar la comparación entre la señal de referencia y la señal del sensor, se implementa un circuito restador y un circuito comparador con Amplificadores Operacionales, alimentados por una fuente dual de  $\pm 12V$ .

El esquema de la Figura 2 muestra las principales elementos del sistema de control.

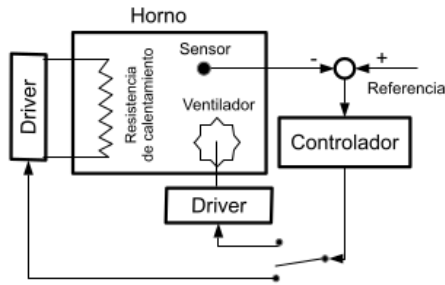


Fig. 2. Esquema físico del sistema, tomado de [2]

### B. Materiales y Descripción de Hardware

Los elementos utilizados para el desarrollo del Proyecto se describen a continuación:

- Nevera de Icopor: Es utilizada como cajón para el horno. La idoneidad del icopor radica en que este tiene propiedades de aislante térmico. El interior de la nevera es forrado en aluminio para evitar daños al icopor por las altas temperaturas.
- Resistencia de Calentamiento: Resistencia de 100W, usada para calentar el aire en el cajón, se le aplicará tensión para calentarla cuando la temperatura dentro del horno sea inferior a la temperatura de referencia.
- Ventilador 12  $V_{DC}$ : Utilizado para extraer el aire caliente del cajón, se activa cuando la temperatura de este, es superior a la temperatura de referencia.
- Amplificadores Operacionales: Son utilizados para el circuito de control, configurándolos como Restador y Comparador respectivamente.
- Relé 12  $V_{DC}$ : Se encarga de realizar el encendido o apagado de la resistencia.
- Diodos: Funciona como Diodo Volante para la conexión del ventilador y el Relé, evitando daños en el controlador por corrientes debidas a la conmutación de los elementos inductivos.
- Transistores de Potencia BJT (TIP 31C, TIP 32C): Son utilizados como switches para conmutar entre la activación de la Resistencia o del Ventilador.
- Potenciómetro Logarítmico: Es utilizado para variar el voltaje de referencia y por tanto para configurar la temperatura deseada.
- Resistencias: Utilizadas para ajustar las ganancias de voltaje en el restador, y para asegurar una corriente en la base de cada transistor BJT.

- Sensor LM35: Es utilizado para medir la temperatura dentro del Horno.

*NOTA: El diagrama esquemático del circuito total se presenta en el Apéndice I*

El desarrollo del proyecto consiste de las etapas de análisis, diseño e implementación del sistema de Control, aspectos que se abordarán a continuación.

### C. Diseño del circuito de Control

Teniendo en cuenta que para la realización del proyecto se especifica el diagrama esquemático del circuito a utilizar [2], sólo se requiere realizar el diseño del valor de los componentes que cumpla con las condiciones y funciones establecidas para cada elemento.

1) *Amplificador Multientrada*: Se requiere diseñar un amplificador Multientrada que realice la resta entre el valor de referencia (el cual se puede modificar mediante el potenciómetro) y el valor obtenido en el sensor LM35, dándole a este una ganancia previa.

En primera medida, se establece la ecuación de salida deseada partiendo de que el sensor a su salida presenta la relación  $10mV/^{\circ}C$ . Estableciendo como rangos de temperatura de referencia:  $T_{min} = 0^{\circ}C$  y  $T_{max} = 150^{\circ}C$ , se fija una ganancia para la salida del sensor de tal forma que cumpla las limitaciones de entrada del Amplificador operacional. Puesto que el circuito propuesto está alimentado por una fuente dual de  $\pm 12V$ , entonces:

$$V_{OH} = V_{cc} - 1,5V = 12V - 1,5V = 10,5V$$

Se fija una ganancia de 6.67, de tal forma que las tensiones estarían en los rangos  $V_{min} = 0V$  y  $V_{max} = 10V$ .

Estableciendo la ecuación de salida deseada:

$$V_o = V_{ref} - 6,67V_{sns}$$

Donde  $V_{ref}$  es el voltaje de referencia, y  $V_{sns}$  es el voltaje de salida del sensor.

Para realizar el diseño de este Amplificador, se deben cumplir dos condiciones que permiten que el circuito funcione de la manera deseada. La primera de estas condiciones es la de balance matemático, la cual establece que:

$$A^+ = A^- + 1$$

Donde  $A^+$  es la sumatoria de ganancias en la entrada no inversora, y  $A^-$  es la sumatoria de ganancias en la entrada inversora, para nuestra ecuación de salida se tiene que:

$$A^+ = 1$$

$$A^- = 6,67$$

Dado que no se cumple la condición de balance matemático, se modifica el circuito añadiendo una ganancia de compensación conectada a 0V:

$$V_o = V_{ref} + 6,67(0V) - 6,67V_{sns}$$

El diagrama circuital del amplificador multientrada se muestra en la Figura 3.

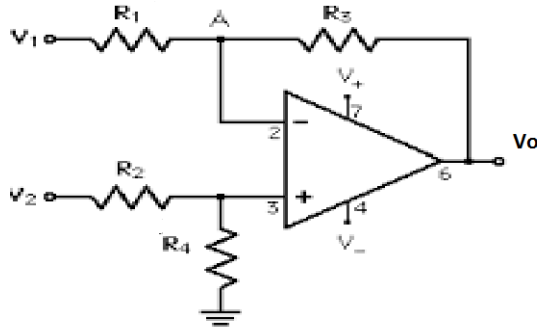


Fig. 3. Circuito Amplificador Sumador restador

La segunda condición a cumplir es el balance eléctrico, que establece que:  $R_{eq}^+ = R_{eq}^-$ , condición que para nuestro circuito se logra haciendo que:

$$\frac{R_3}{R_1} = 6,67; \frac{R_3}{R_2} = 1; \frac{R_3}{R_4} = 6,67$$

Se asume el valor de la resistencia de realimentación negativa  $R_3$  y a partir de esta se obtienen las demás.

Con  $R_3 = 120k\Omega$ , se obtienen:  $R_1 = R_4 = 18k\Omega$ ;  $R_2 = 120k\Omega$ .

2) *Voltaje de Referencia*: Tal como se mencionó anteriormente, se establece que el rango de temperaturas está entre  $0^\circ C$  y  $150^\circ C$ , por lo tanto, el voltaje al cual se fijará la referencia con la que se comparará el sensor de temperatura, se encuentra en el rango de voltajes entre 0V y 10v. A partir del esquema guía del circuito, se obtiene que el voltaje de Referencia estará dado por un divisor de tensión como el mostrado en la Figura 4.

Para obtener estos rangos de valores, se escoge un potenciómetro de  $20k\Omega$  y se obtienen  $R_1$  y  $R_3$  despejando de las siguientes ecuaciones:

$$V_{ref_{min}} = 0V = \frac{12 \times R_3}{R_3 + 20k\Omega + R_1}$$

$$V_{ref_{max}} = 10V = \frac{12 \times (R_3 + 20k\Omega)}{R_3 + 20k\Omega + R_1}$$

Resultando en  $R_1 = 4k\Omega$  y  $R_3 = 0\Omega$  (Corto circuito a tierra).

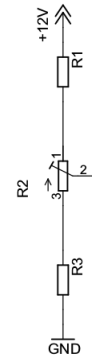


Fig. 4. Divisor de tensión para la tensión de referencia

#### D. Caracterización de la Planta

Para la etapa de Análisis es necesario obtener la función de Transferencia del sistema en Lazo Abierto, para de esta manera obtener la respuesta del sistema, sin control ni realimentación. Teniendo en cuenta que la planta tiene dos comportamientos diferentes (enfriamiento y calentamiento), se obtiene la función de Transferencia de cada uno de los comportamientos. La caracterización de la Planta se obtiene observando el funcionamiento del Horno durante el proceso de Calentamiento y enfriamiento, tomando los valores de temperatura mediante la medición de la salida del sensor LM35. Para garantizar que la resistencia se estabilice antes de  $150^\circ C$  (temperatura máxima a la que opera el Sensor y temperatura máxima establecida para el sistema), se alimenta la resistencia con un valor menor a la proporcionada por la red. Se establece como voltaje de alimentación  $60 V_{AC}$ , @60Hz.

Realizando un muestreo de la temperatura cada 10 segundos aproximadamente, se obtienen las gráficas Temperatura vs. Tiempo que caracterizan el comportamiento de la planta:

1) *Calentamiento*: La gráfica obtenida para el comportamiento de calentamiento de la planta a una entrada constante se muestra en la Figura 5.

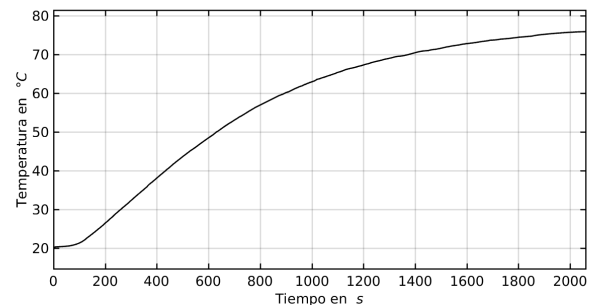


Fig. 5. Curva de temperatura vs. tiempo partiendo de temperatura ambiente

A partir de esta curva, restando el error de estado cero debido a la temperatura ambiente, se obtiene una función de

transferencia aproximada como:

$$G_1(s) \approx \frac{ke^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

En donde: la expresión  $e^{-Ls}$ , representa el retardo por transporte,  $\tau$  es la constante de tiempo y  $K$  la ganancia de  $G_1(s)$ , que coincide con el valor final de  $g_1(t)$ .

Para obtener a partir de la gráfica de calentamiento los parámetros  $\tau$  y  $L$  se emplea el método descrito por Ziegler y Nichols en [1]. Se traza una recta tangente al punto de inflexión, que es el punto donde la gráfica cambia de concavidad, tal como se aprecia en la Figura 6.

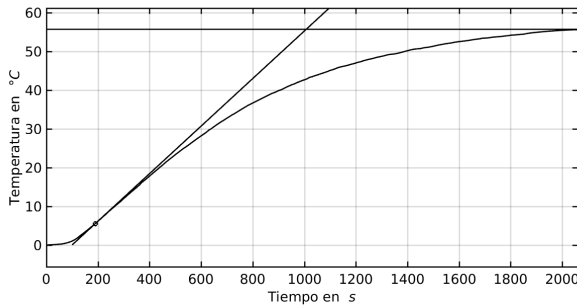


Fig. 6. Obtención de parámetros  $\tau$  y  $L$

La distancia desde  $X = 0$  hasta el punto donde la recta tangente corta el eje  $X$  es el valor del tiempo de retardo  $L$ . La distancia entre  $L$ , y el punto en  $X$  donde la recta tangente corta la recta constante en  $Y = K$  es el valor de la constante de tiempo  $\tau$ . Entonces:

$$\begin{aligned} L &= 100s \\ \tau &= 1010 - L = 910s \\ K &= 55,7 \end{aligned}$$

Por lo que la función de transferencia  $G_1(s)$  para el comportamiento de calentamiento resultante es:

$$G_1(s) \approx \frac{55,7e^{-100s}}{910s + 1}$$

2) *Enfriamiento:* La gráfica que representa el comportamiento de la planta de enfriamiento con una entrada constante, se muestra en la Figura 7.

Se puede ver que una buena aproximación a la función es:

$$g_2(t) \approx Ke^{-\alpha t}$$

Removiendo el error de estado cero debido a la temperatura ambiente, se puede considerar que la salida tiende a cero, el máximo de la función estaría en  $g_2(0) = 56,16$ . Con lo que se puede determinar el valor de  $K$  cuando  $t = 0$  como:

$$K = g_2(0) = 56,16$$

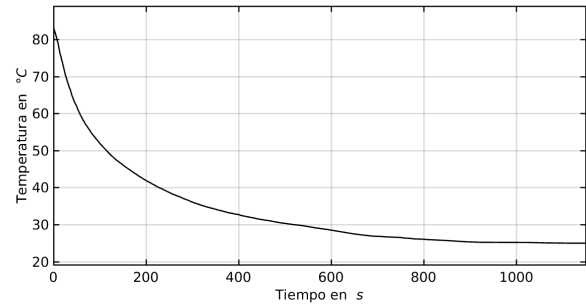


Fig. 7. Curva de temperatura vs. tiempo partiendo de alta temperatura

Para determinar  $\alpha$ , tomamos un punto en la curva, lo reemplazamos en la función aproximada, y despejamos. Tomando  $t = 200s$  tenemos:

$$\begin{aligned} g_2(200) &= 56,16e^{-200\alpha} = 41,89 \\ \ln\left(\frac{41,89}{56,16}\right) &= -200\alpha \\ \alpha &\approx 0,001466 \end{aligned}$$

Puesto que la entrada era constante, al hacer la transformada debemos considerar a la función de transferencia como multiplicada por una función escalón en el dominio de la frecuencia, con lo que obtenemos:

$$\frac{G_2(s)}{s} = \frac{56,16}{s + 0,001466}$$

Por lo que la función de transferencia de la planta en lazo abierto aproximada es:

$$G_2(s) = \frac{56,16s}{s + 0,001466}$$

### III. SIMULACIONES

Luego de obtener las funciones de transferencia respectivas para el calentamiento y el enfriamiento, se procede a realizar las simulaciones correspondientes. Éstas fueron realizadas en la herramienta de MATLAB Simulink, en donde se modela el sistema a modo de diagramas de bloques. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.

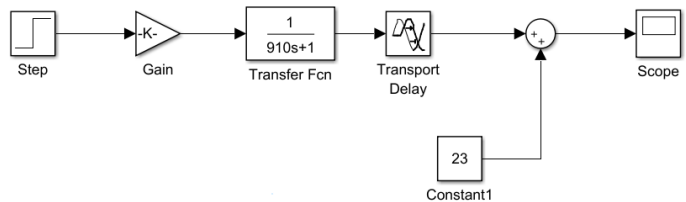


Fig. 8. Modelo simulado para el calentamiento en lazo abierto

Al sistema se le aplica una entrada escalón que simula el momento en el que se conecta la resistencia, es decir, cuando comienza a calentar, multiplicada a su vez por 55,7, que es el valor obtenido de  $K$ . Se coloca un bloque de retardo

para simular el retardo de calentamiento de la resistencia, representado con la función exponencial en la función de transferencia. Por último, se suma un bloque constante el cual representa la temperatura del ambiente. Teniendo éste modelo, se procede a visualizar la salida mostrada con el bloque "Scope"(Figura 9.)

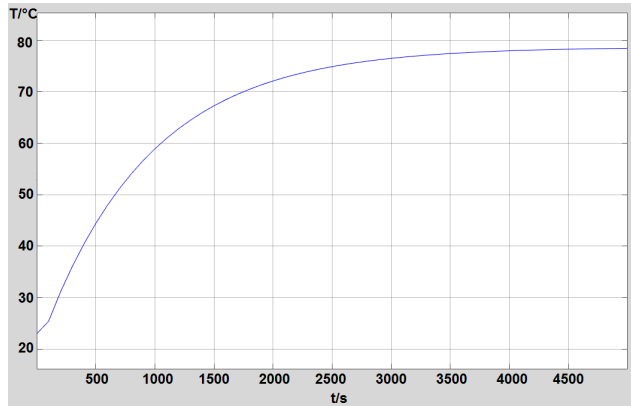


Fig. 9. Curva simulada obtenida del calentamiento en lazo abierto

Luego, se procedió a realizar la simulación del sistema de enfriamiento en lazo abierto. El modelo utilizado se observa en la Figura 10.

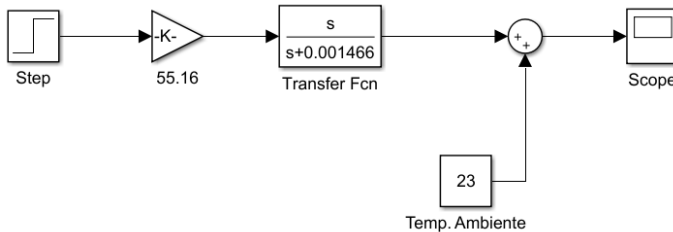


Fig. 10. Modelo simulado para el enfriamiento en lazo abierto

Nuevamente, se aplica una entrada de tipo escalón, luego se aplica la ganancia  $K$  de 56.16, se ubica la función de transferencia correspondiente al ventilador y por último, se suma la temperatura ambiente. Con esto, se puede visualizar la curva característica en la Figura 11.

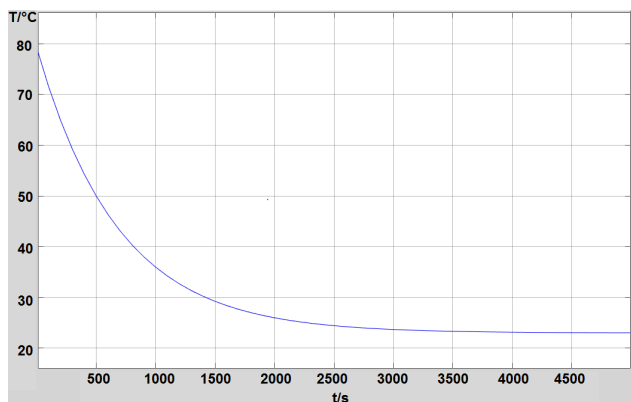


Fig. 11. Curva simulada obtenida del enfriamiento en lazo abierto

Por último, se modela el sistema equivalente a la planta en lazo cerrado. El diagrama de bloques implementado se muestra en la Figura 12.

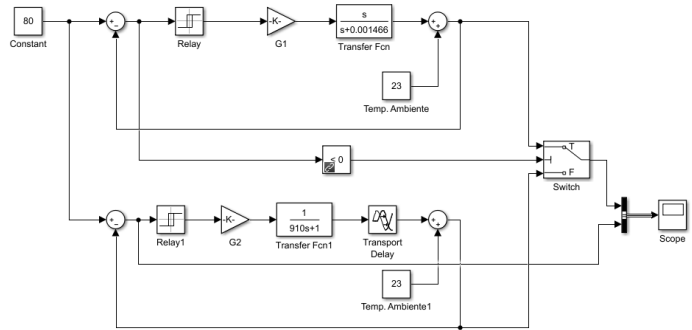


Fig. 12. Modelo implementado para simulación de la curva de temperatura de la planta en lazo cerrado vs. error

Los bloques mostrados anteriormente en lazo abierto se implementan como un sólo sistema añadiendo un lazo de realimentación negativa, un par de relés y un conmutador, el cual se acciona según la condición a su entrada. En este caso, si el error obtenido en el modelo de enfriamiento es menor que cero, quiere decir que debe calentar, hasta que la condición se cumpla. Bajo estas condiciones se muestra la salida del sistema en la Figura 13.

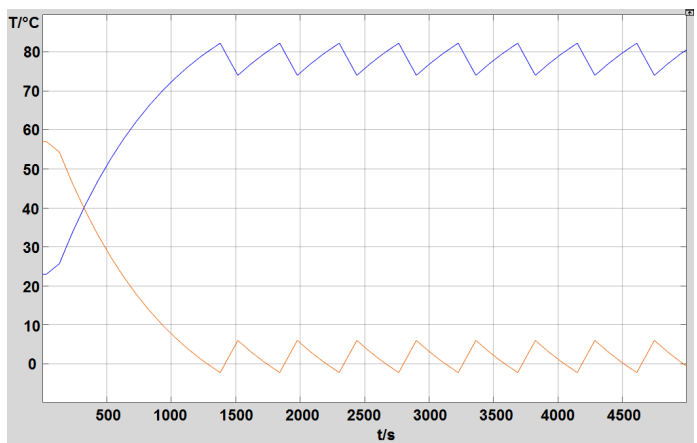


Fig. 13. Curva de temperatura de la planta en lazo cerrado vs. error

Se puede observar que el sistema cuando trata de estabilizarse presenta oscilaciones. Con éstas oscilaciones se puede calcular la frecuencia de oscilación del sistema, por lo que se hace un análisis de la misma. Podemos visualizar un periodo de oscilación en detalle en la Figura 14.

Se observa que las oscilaciones presentan un periodo de aproximadamente 462 segundos, y por ende, una frecuencia de oscilación de  $2,164\text{mHz}$ .

Ahora bien, se observa el tiempo y el valor pico del sistema, mostrada en la Figura 15.

En ésta imagen se puede apreciar que tenemos un tiempo pico

de casi 1400 segundos, es decir aproximadamente 23 minutos. El valor pico de la señal por su parte fué de  $82,24^{\circ}\text{C}$ , por lo que se tiene un valor de máximo sobrepico de:

$$M_p = \frac{y_f - y_p}{y_f} = 2,8\%$$

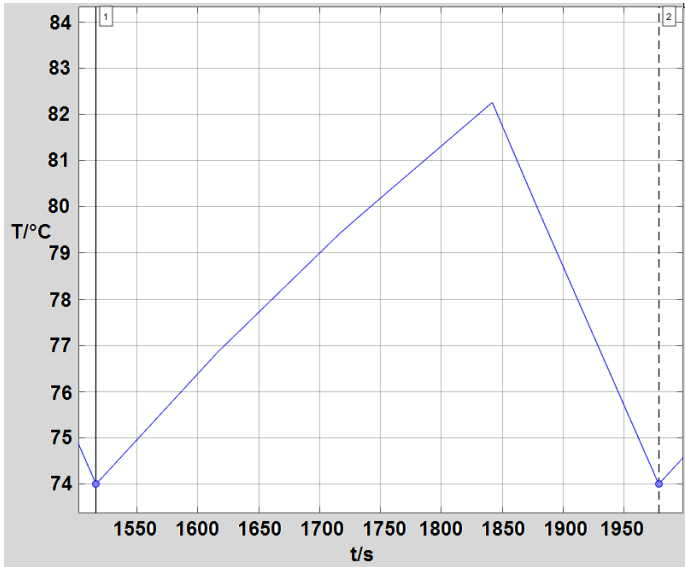


Fig. 14. Oscilaciones de la curva simulada de la planta en lazo cerrado

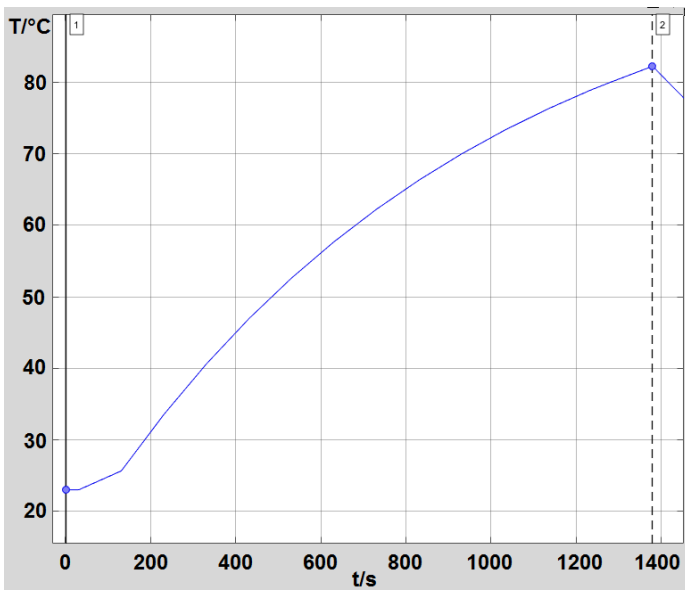


Fig. 15. Tiempo pico y Valor pico de la curva simulada de la planta en lazo cerrado

#### IV. RESULTADOS



