



Diseño e implementación de un controlador digital en espacio de estado de orden diferencial superior

Design and implementation of a digital controller in state space of higher differential order

Samuel Mar-Barón¹, José-Federico Chong-Flores¹, Rubén Salas-Cabrera¹, Mario Gómez-García¹, Christian-Emanuel Vicencio-Cruz¹

¹ Tecnológico Nacional de México – IT de Ciudad Madero, Tamaulipas, México.

Recibido: 20-10-2023
Aceptado: 12-12-2023

Autor correspondal: mario.gg@cdmadero.tecnm.mx

Resumen

En este trabajo se expone la implementación de un sistema de control digital micro procesado, para un horno de laboratorio químico, utilizado en el secado de muestras químicas para investigación de nuevos materiales, capaz del monitorear la temperatura en tiempo real y mantenerla en un valor deseado por el usuario sin presentar sobre impulsos o picos de temperatura no deseados, con esto se busca que los procesos de experimentación sean más eficiente, lo que se logra con el control de la temperatura sin esos umbrales, evitando problemas y descomposición de las probetas experimentales al llevar a cabo el proceso de secado de muestras, esto se logra mediante un sistema electrónico que interactúa con un diseño matemático y de control, un control digital que manipula un sistema de electrónica de potencia que mantendrá una temperatura altamente estable e inmune a perturbaciones del proceso experimental en los laboratorio químicos.

Palabras clave. Resistencia eléctrica, interfaz, control, PWM, sensado, aislamiento térmico, potencia, controlador digital, horno de secado.

Abstract

This paper presents the implementation of a microprocessor digital control system, for a chemical laboratory oven, used in the drying chemical samples for researching into new materials, capable of monitoring temperature in real-time and keeping it at a value desired by the user without presenting overshoots or unwanted temperature spikes, this is intended to make experimentation processes more efficient, which is achieved by controlling the temperature without these thresholds, avoiding problems and decomposition of experimental specimens when carrying out the sample drying process, this is achieved by an electronic system that interacts with a mathematical and control design, a digital control that manipulates a power electronics system will maintain a highly stable temperature and immune to perturbations of the experimental process in chemical laboratories.

Keywords. Electrical resistance, interface, control, PWM, sensing, thermal insulation, power, digital controller, drying oven

Introducción

A través de los años, el horno, instrumento utilizado comúnmente en el ámbito industrial, ha sido pilar importante en la generación de materiales que serán útiles para la mano de obra humana. Este mismo proceso ha tenido saltos totalmente notorios, ya que a medida que pasan los años, las tecnologías continúan favoreciendo los procesos obsoletos. Esto no solo ha contribuido a evitar accidentes hacia el usuario que se encargue de operarlo, sino también para la empresa que haga uso de dicho elemento para el proceso designado; llevando como resultado la implementación de sistemas que se continúan mejorando con el pasar de los años como ya se mencionaba.

Sin embargo, es de suma importancia realizar mucho hincapié en que en la actualidad hay un gran déficit en la eficiencia de los mismos, ya que se presentan incrementos de temperatura excesivos y no se tiene un control preciso sobre la temperatura, lo cual provoca que existan alteraciones innecesarias provocando que las pruebas que se lleven a cabo dejen mucho que desear.

Es por ello que las características que definen en la actualidad a un horno de alta calidad es el aislamiento, así como el circuito de potencia. Apartados que precisamente son abordados en este proyecto y que fundamentaran el uso de sistemas del área de control en combinación con la tecnología microcontrolada de última generación y sobre todo para un ámbito de mayor precisión como lo es el área de investigación y desarrollo de productos de la índole que se especifique por el usuario, siendo esto los laboratorios por citar un ejemplo en concreto. Aún más específicamente en rangos de 300 °C hasta los 800 °C.

Materiales y Métodos

La metodología utilizada consistió en la experimentación que más tarde arrojaría resultados que eventualmente fueron analizados, para determinar las desviaciones y proceder a la corrección, hasta lograr el objetivo planteado. Si embargo, para la construcción del circuito se tomó en cuenta lo siguiente:

- ✓ Diseño y construcción del circuito de potencia a base de IGBT (PWM), para generar en el interior del prototipo una temperatura desde la del medio ambiente, hasta 1000 °C máximo.

- ✓ Diseño y construcción de un chasis que cumpla los estándares normativos para uso de laboratorios de investigación de ingeniería química.

- ✓ Diseñar y construir de una interfaz HMI que se comunique con el circuito de control y posteriormente al circuito de potencia.

- ✓ Diseño y construcción de la instrumentación mediante el sensor de temperatura, acondicionamiento de señales y acoplamiento de la etapa digital.
- ✓ Caracterización del sistema en lazo abierto, mediante excitación controlada y obtención de graficas de respuesta.

Por otro lado, se detallan a continuación cada uno de los bloques que conforma a todo el sistema presentado para este proyecto.

Placa de desarrollo Arduino Mega

Microcontrolador en su placa de desarrollo, encargado de procesar el algoritmo matemático, aparte de manejar los sensores, actuadores y la interface gráfica, se caracteriza por su sencilla programación y el uso de su compilador, todo en software libre, lo que otorga prestaciones de muy bajo costo, pero de alta calidad, la placa de desarrollo se ilustra en la figura 1.



Figura 1.- Placa de desarrollo Arduino Mega 2560.

Convertidor para termopar MAX6675

Este convertidor es un módulo comercial de bajo costo, compatible para desarrollos con la placa de desarrollo Arduino, diseñado para interactuar con un termopar tipo k, recogiendo la temperatura con un convertidor analógico a digital de 12 bits, que a su vez convierte la señal en código que envía por comunicación I2C, con un rango de operación desde 0° hasta 1023°C, esta tarjeta de desarrollo se muestra en la figura 2

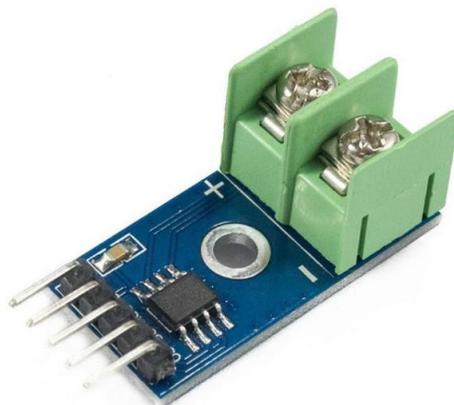


Figura 2.- Convertidor para termopar tipo K. **Fuente:** <https://electrocrea.com/>

Sensor ingresado en el horno eléctrico capaz de soportar altas magnitudes de temperatura. Se encuentra conformado por una varilla de dos metales distintos con los cuales, al exponer estos la unión a temperaturas altas, se dilatará generando una tensión eléctrica diferencial, la cual será enviada al convertidor max6675, la imagen del sensor se ilustra en la figura 3.



Figura 3.- Termopar tipo K. **Fuente:** <https://teii.mx/elemento-termopar/>

Pantalla Nextion NX8048T050_011

Pantalla TFT del tipo resistiva de aproximadamente 5 pulgadas, utilizada para interactuar con el microcontrolador, el sistema y el operador, mediante este dispositivo, se podrán observar los parámetros de interés, así como se introducirá instrucciones y el setpoint, se ilustra la pantalla en la figura 4.



Figura 4.- Pantalla NEXTION NX8048T05, **Fuente:** <https://uelectronics.com/>

El SSR (relevador de estado sólido)

El actuador de potencia, que recibe la modulación PWM desde el microprocesador con nivel de tensión en 5v y en su lado de potencia en 220VCA, donde se hará un control por paquetes de semiciclos para definir la temperatura en el horno. Los paquetes de CA, constan de 100 semiciclos para un 100% en el PWM, y de forma proporcional, se determina cualquier valor de PWM, considerando que pudiera existir un error por la desactivación del SSR en los cruces por cero, en este caso el erro sería un semiciclo de más, lo correspondiente a 8.33 milisegundos de excitación extra, siendo esta una cantidad de energía bastante despreciable para el sistema, por estar controlando una variable lenta, el SSR se muestra en la figura 5.



Figura 5.- Módulo SSR, Fuente: <https://uelectronics.com/>

Método de modelado dinámico

El conjunto de ecuaciones que establecen de manera única la relación entre la entrada, la salida y el estado se le llama ecuación dinámica. Para el sistema físico que se pretende controlar, se estudian las ecuaciones dinámicas que tienen la siguiente estructura general y de la que se debe particularizar, [1].

$$\dot{x}(t) = \mathbf{h}(x(t), \mathbf{u}(t), t) \dots \dots \dots Ec. 1$$

$$y(t) = g(x(t), \mathbf{u}(t), t)$$

O de forma explícita:

$$\dot{x}_1(t) = h_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t)$$

$$\dot{x}_2(t) = h_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t)$$

⋮

⋮

⋮

$$\begin{aligned} \dot{x}_n(t) &= h_n(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ y_1(t) &= g_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ y_2(t) &= g_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ y_q(t) &= g_q(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \end{aligned}$$

Donde $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ es el estado, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$ es la salida y $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T$ es la entrada. La salida \mathbf{y} , la entrada \mathbf{u} y el estado \mathbf{x} son funciones vectoriales que asumen valores en el conjunto de los números reales y que dependen de \mathbf{t} definidas en el intervalo $(-\infty, \infty)$. El espacio vectorial del vector de estado en (1) es un espacio vectorial real n-dimensional; entonces el conjunto de ecuaciones (1) se le llama ecuación dinámica n-dimensional.

Resultados

Diagrama a bloques del sistema

Enfatizando que el proceso de control consta de un lazo de control cerrado el sistema obedece a los siguientes bloques principalmente:

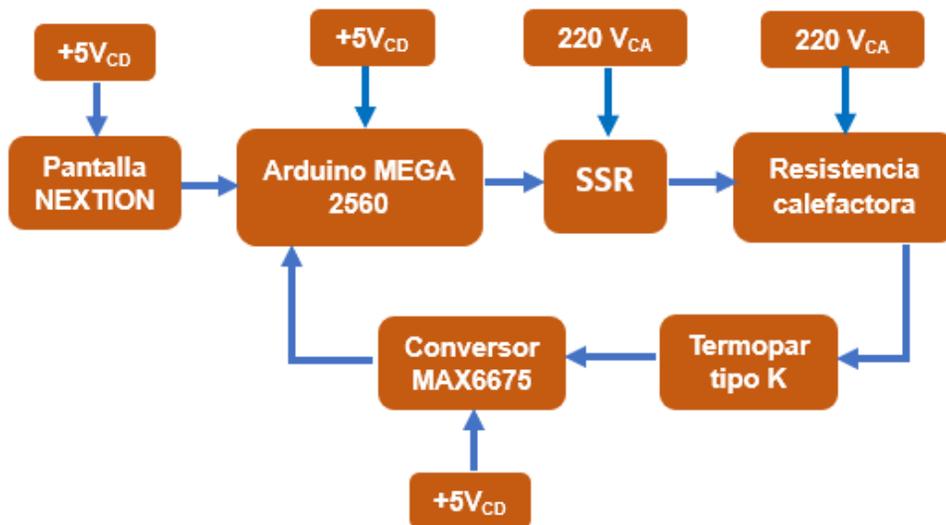


Figura 6.- Diagrama a bloques del sistema de control para el horno.

Fuente: Elaboración propia.

En este esquema a bloques, se observa la interacción de todas las etapas descritas anteriormente, pueden destacarse el Arduino mega, que funge como el cerebro del sistema de control y que manipula al actuador por medio del SSR de potencia, para excitar la resistencia calefactora de potencia, la cual de forma natural emite energía térmica, la que se resguarda y aprovecha en el chasis a base de cerámica y cemento, que dentro del receptáculo concentra toda esa energía, para calentar las muestras en su túnel, donde alberga un tubo de vidrio, para procesar las muestras en probetas contenedoras.

El chasis se muestra en la figura 6, es en el que se integran los componentes y que funciona como carcasa del horno.



Figura 7.- Forma física del horno junto con la interfaz HMI para el control de lazo cerrado. **Fuente:**
Elaboración propia.

Para el diseño del controlador digital, que posee una estrategia proporcional más integral, sintonizado mediante la técnica de reubicación de polos, es necesario el uso de la metodología RSC[13], la cual se explica a continuación:

1. Caracterización del sistema físico a controlar.

En esta actividad es necesario conocer la dinámica del sistema totalmente integrado, obteniendo gráficas de respuesta durante su proceso transitorio, en lazo abierto, en el que se obtienen la mayor cantidad de datos y se construyen sus gráficas con respecto al tiempo, haciendo un monitoreo en lazos de tiempo constante, tiempos de muestreo, definidos según la velocidad de la variable, en este caso se definió en un segundo, pues la variable temperatura es muy lenta.

Para la excitación del sistema físico, se introducen escalones fraccionados del rango total de temperatura deseado, en porcentajes y se obtiene el monitoreo desde el inicio, hasta que la variable medida llega a su valor constante, directamente definido por el escalón proporcionado en el setpoint.

2. Obtención de un modelo dinámico aproximado del sistema.

En este proceso, se obtienen diversas gráficas de respuesta, obtenidas con el sistema en lazo abierto en el proceso anterior de caracterización, que mediante un estudio comparativo de cada respuesta, se logran algunos datos y características que permiten una mejor aproximación, nótese que por el hecho de ser una aproximación, será por lo tanto un modelado imperfecto, con la seguridad que mediante la acción proporcional más integral del controlador en lazo cerrado, será lo que permitirá un control muy cercano al deseado de forma práctica.

El modelo aproximado se puede obtener en dos formas: una primera, obteniendo un promedio de las respuestas gráficas obtenidas y una segunda, tomando como modelo imperfecto, alguna gráfica de respuesta ubicada en la parte central del rango deseado en el sistema físico.

3. Obtención del modelo discretizado.

Con la definición del modelo aproximado de respuesta en lazo abierto del sistema físico, se procede a la construcción de una ecuación matemática de segundo orden, que se aproxime a la forma de respuesta real aproximada, procediendo a la discretización de este modelo matemático de la respuesta, que con ayuda del MatLab, se obtiene un modelo discretizado de segundo orden.

4. Integración de la estrategia proporcional más integral.

Con el modelo digital, ya discretizado, se integra la expansión matricial que permite integrar de forma digital la estrategia de control en el modelado digital, ahora ya en lazo cerrado, lo que se llevara a un proceso de reubicación de polos, igual con el apoyo de MatLab, para obtener las ganancias del sistema

en lazo cerrado, siendo este el objetivo principal para asegurar un comportamiento deseado del modelo físico.

Cabe hacer mención, que esta metodología nos ha permitido en todo momento, diseñar controladores digitales de muy alta eficiencia, pero con muy baja exigencia de hardware para implementar en la solución de controladores de muy altas prestaciones.

A continuación, se muestran una serie de gráficas, en las que se ilustra un setpoint como un porcentaje del rango posible de temperatura a controlar, en la que se puede observar la curva del transitorio que se lleva a cabo desde el punto cero, hasta un nivel de temperatura, que no precisamente es proporcional al rango total de la temperatura del sistema.

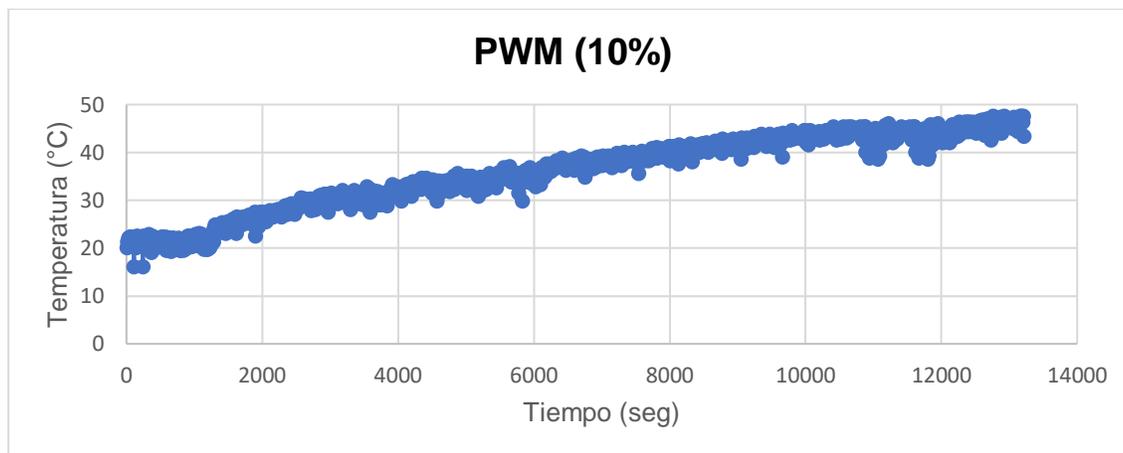


Figura 8. - Respuesta al PWM al 10%. **Fuente:** Elaboración propia.

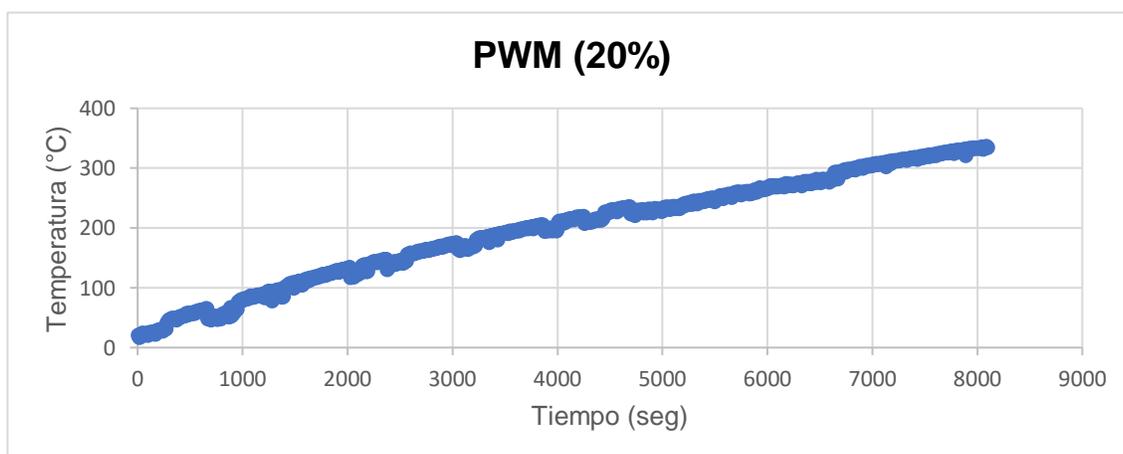


Figura 9.- Respuesta al PWM al 20%. **Fuente:** Elaboración propia.

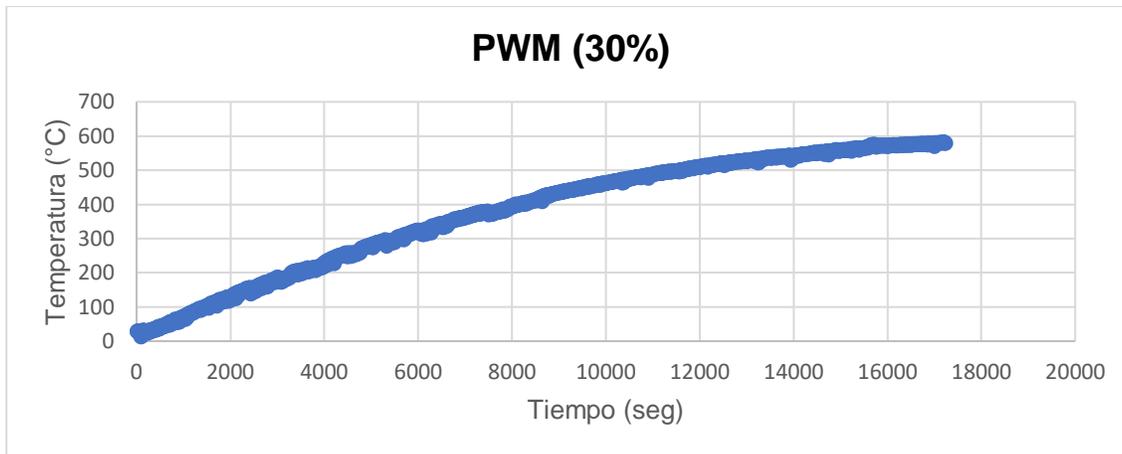


Figura 10.- Respuesta al PWM al 30%. **Fuente:** Elaboración propia.

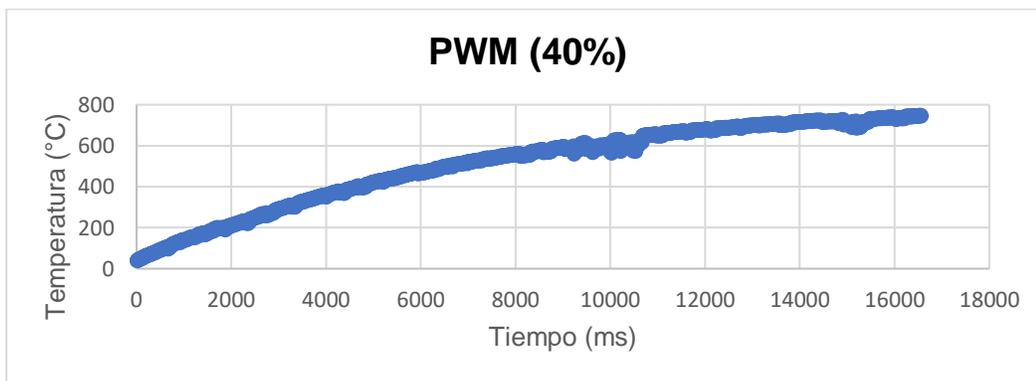


Figura 11.- Respuesta al PWM al 40%. **Fuente:** Elaboración propia.

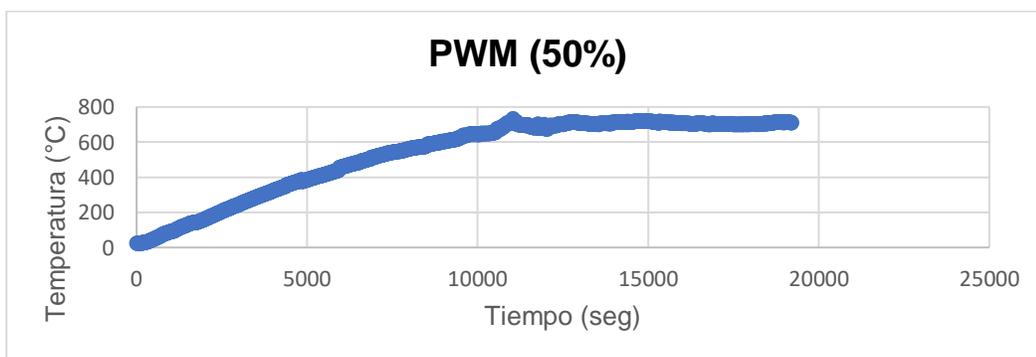


Figura 12.- Respuesta al PWM al 50%. **Fuente:** Elaboración propia.

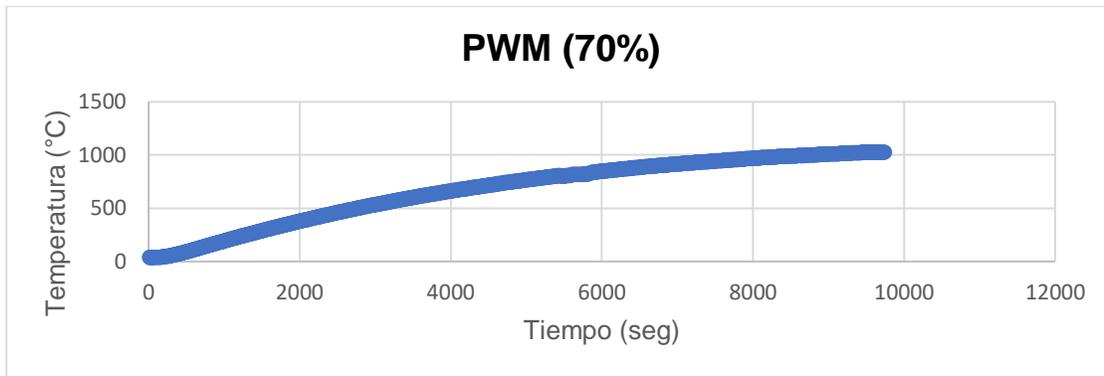


Figura 13.- Respuesta al PWM al 70%. **Fuente:** Elaboración propia.

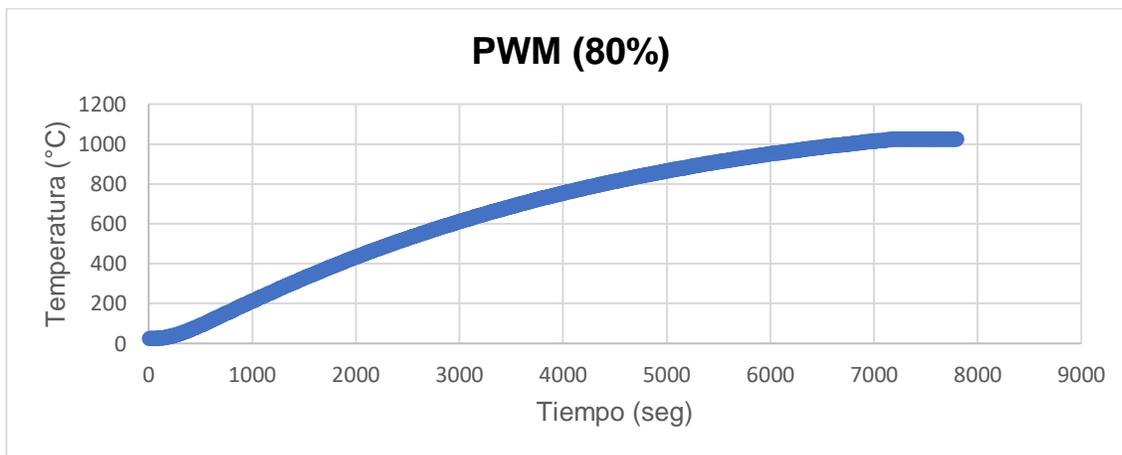


Figura 14.- Respuesta al PWM al 80%. **Fuente:** Elaboración propia.

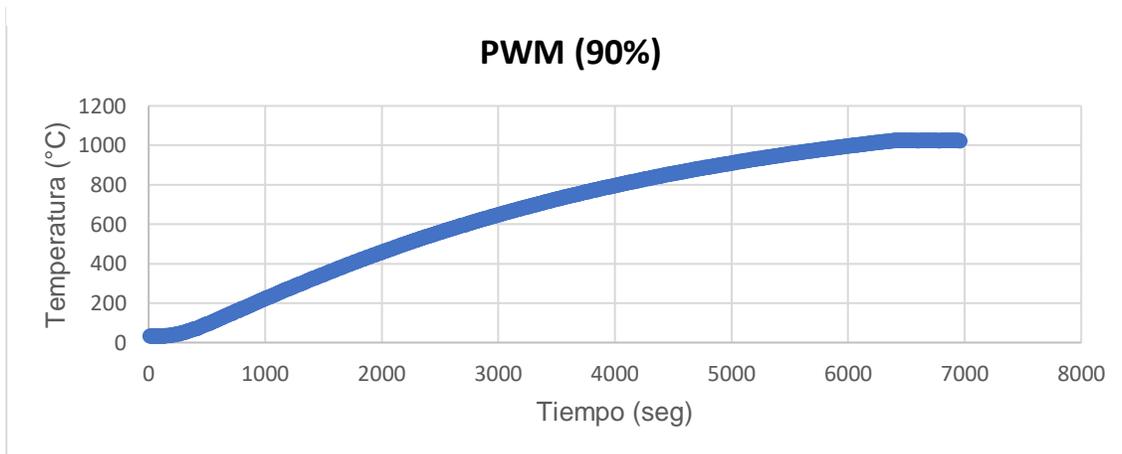


Figura 15.- Respuesta al PWM al 90%. **Fuente:** Elaboración propia.

En esta serie de gráficas, se puede observar como una constante, la forma peculiar de la respuesta de un sistema térmico, que, en el proceso transitorio, desde cero, hasta el valor máximo alcanzado, describe una gráfica de cualquier sistema de segundo orden, por lo que es posible hacer una aproximación matemática discreta, haciendo uso de la metodología RSC y las herramientas de MatLab.

A partir de una gráfica promedio de todos los valores obtenidos en las diferentes curvas, se obtiene una curva aproximada, la cual se ilustra en la figura 16, denotando la gráfica color café, mientras que, en color azul, de esta misma figura, se observa una gráfica aproximada, generada por MatLab.

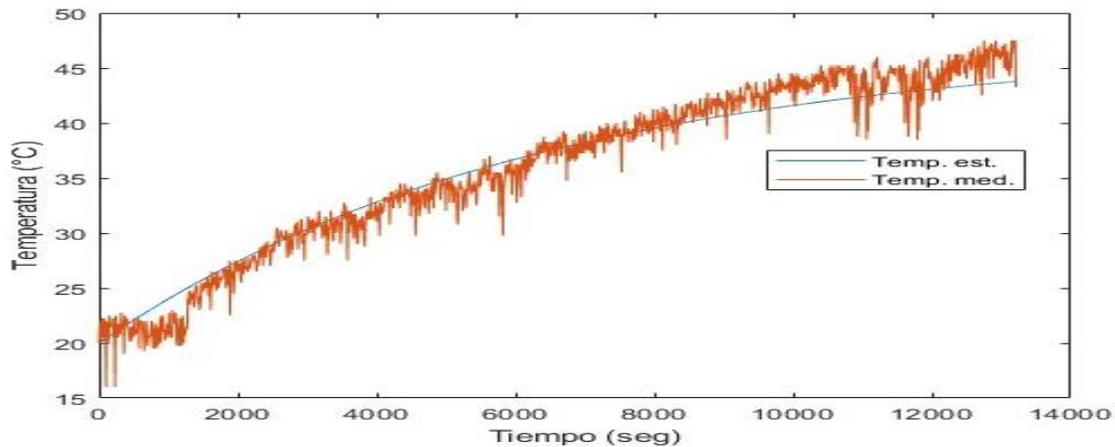


Figura 16.- Gráfica comparativa promedio de respuestas en lazo abierto(café) y la gráfica aproximada(azul) **Fuente:** Elaboración propia.

Con las ecuaciones del controlador diseñado, se implementa en el microprocesador, quedando según se muestra en las ecuaciones [2] y [3].

$$XI(K + 1) = XI(0) + Tactual - SP \quad [2]$$

$$PWM(\%) = -K1 * XI(K + 1) - K2 * Tactual \quad [3]$$

Donde:

XI .- es el escalar integrador inicial.

Tactual.- Temperatura tomada del sensor.

SP.- Temperatura deseada (set-point).

PWM(%).- Valor del PWM en porcentaje.

$K1$ y $K2$.- Ganancias del controlador según la reubicación de los polos del sistema.

Con la ecuación implementada, ubicando los polos según las gráficas de la figura 17, en la que un sistema idealmente controlado presenta una salida estable, sus polos deben encontrarse en el primer cuadrante, pero sobre el eje de los números reales, pues la idea es que no exista ningún sobre impulso en la temperatura controlada, pues podría dañar las muestras dentro del horno.

Consideremos también, que la ecuación que describe el modelo dinámico del sistema, fue aproximada, por lo que dispone exactamente la teoría de control moderno, no sucederá y debemos ajustar, simulando las posibles respuestas, proponiendo valores de los polos, muy cercanos a la unidad, para así observar la exigencia física al sistema, tratando de no exceder tensiones o corrientes que pudieran dañar los dispositivos electrónicos, en este caso, no exigimos que se alcance el setpoint en tiempos exagerados, por conocer la respuesta de la temperatura, considerada una variable lenta y que al PWM de excitación, siempre se encuentre dentro del rango del 0 al 100%

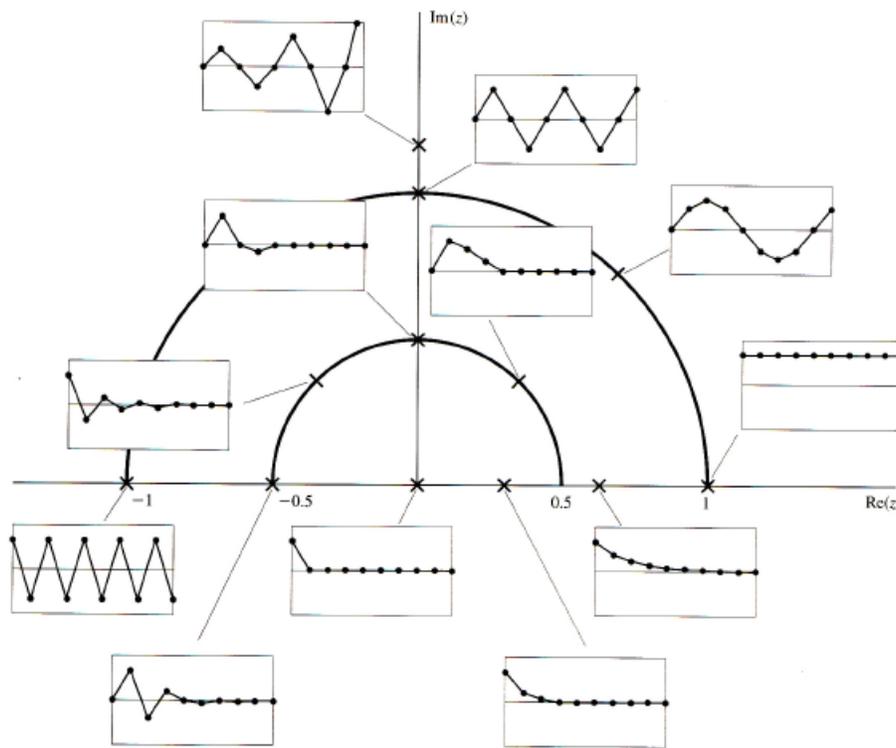


Figura 17.- Gráfica de ubicación de los valores propios en el plano complejo z y sus comportamientos cualitativos en el dominio del tiempo discreto [10].

Bajo estos criterios, ya implementando el controlador, se deben cumplir parámetros como el error máximo permitido, el que se propone calcular con la ecuación [4].

$$error = \frac{SP - T_{actual}}{SP} * 100\% [4]$$

En la figura 18, se observa la respuesta del sistema, proponiendo un set point de 500 grados, donde puede notarse que existe un sobre impulso, casi a 550 grados, llegando a su estado estable en 360 segundos, un tiempo aproximado a 6 minutos, manteniendo el sobre impulso casi 250 segundos, con $K1 = -0.00367$ y $K2 = -0.000523$.

Para efectos prácticos, existe la posibilidad de mejorar las prestaciones de tiempo, ya que el error mostrado es aceptable, menor 3%.

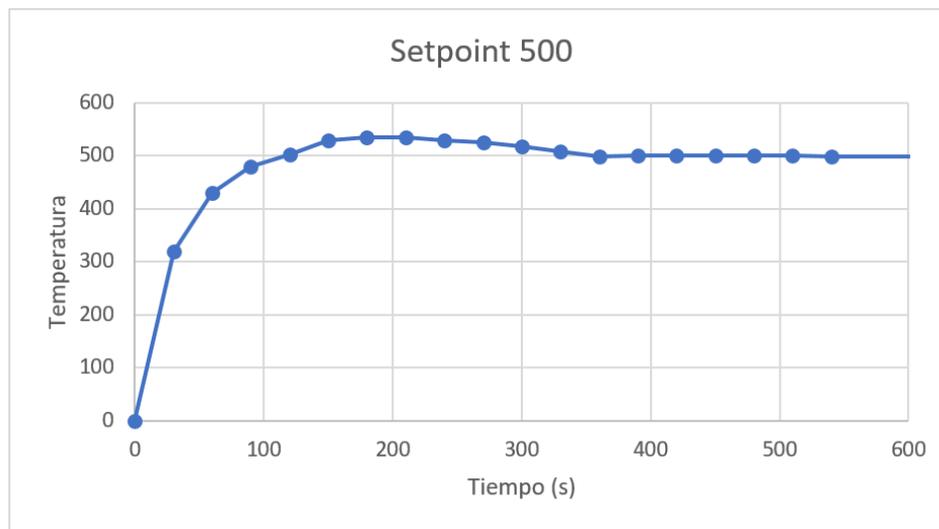


Figura 18.- Gráfica con referencia de 500 grados, con sobre impulso y tiempo de establecimiento en 360 segundos. **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 19, se muestra una segunda respuesta de salida del sistema, ahora con valores de ganancias $K1 = -0.00452$ y $K2 = -0.000329$, entregando un sobre impulso de aproximado de 530 grados, sostenido en un tiempo de 130 segundos aproximadamente, llegando a una salida estable a los 300 segundos, equivalente a 5 minutos, presentando un error máximo de 2.5%.

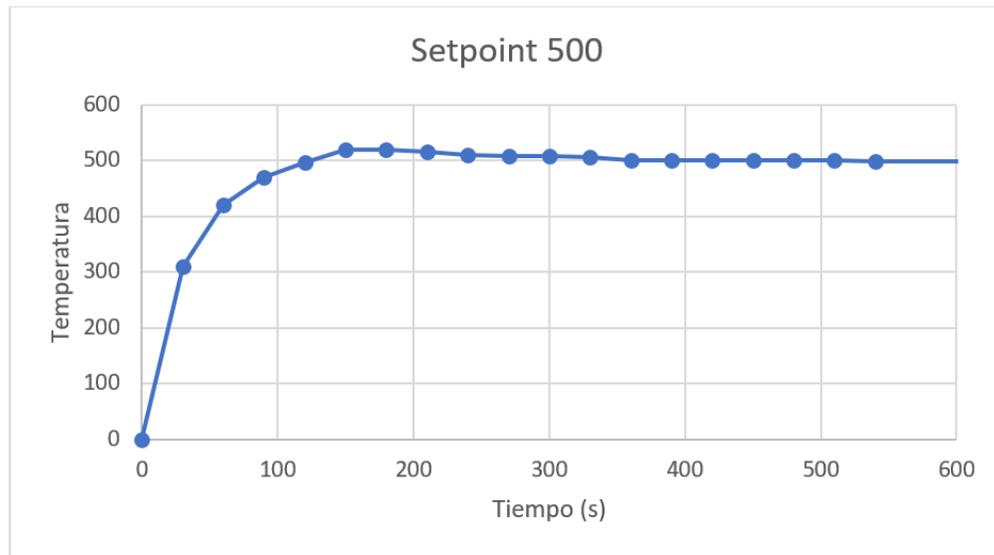


Figura 19.- Gráfica con referencia de 500 grados, con sobre impulso y tiempo de establecimiento en 300 segundos. **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 20, nuevamente se prueba constantes diferentes, para buscar eliminar el sobre impulso y asegurar el tiempo de establecimiento de la variable controlada, en un menor tiempo posible, con $K1 = - 0.00212$ y $K2 = - 0.000819$, se observa la eliminación del sobre impulso, el establecimiento en 210 segundos, entregando un error menor al 2%.

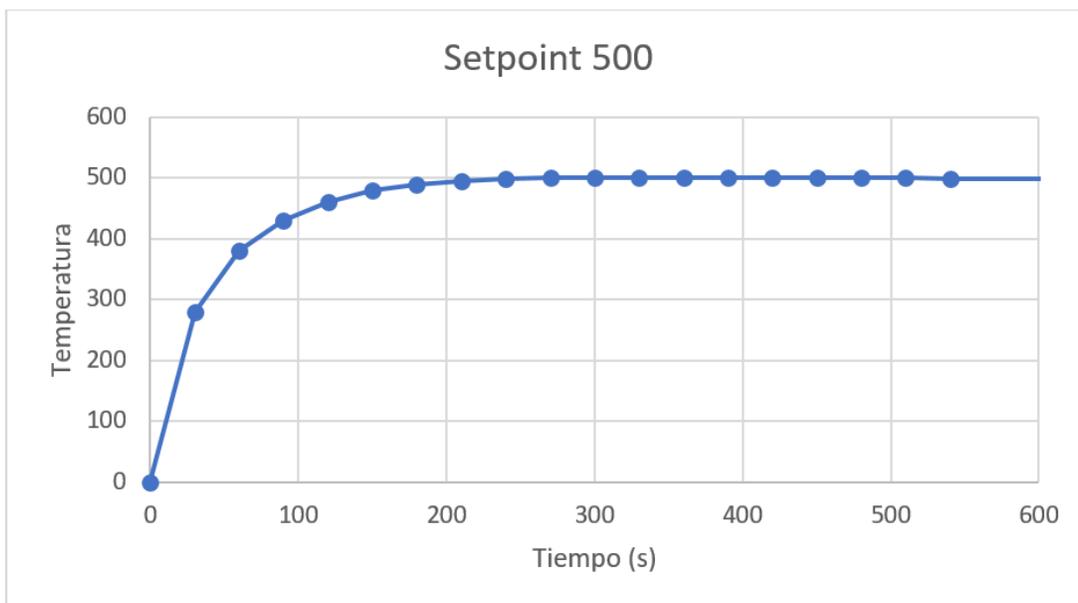


Figura 20.- Gráfica con referencia de 500 grados, sin sobre impulso y tiempo de establecimiento en 210 segundos. **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 21, encontramos la opción con ganancias $K1 = -0.00357$ y $K2 = -0.000431$, con un tiempo de establecimiento de 90 segundos, sin sobreimpulso y con un error menor al 1%.

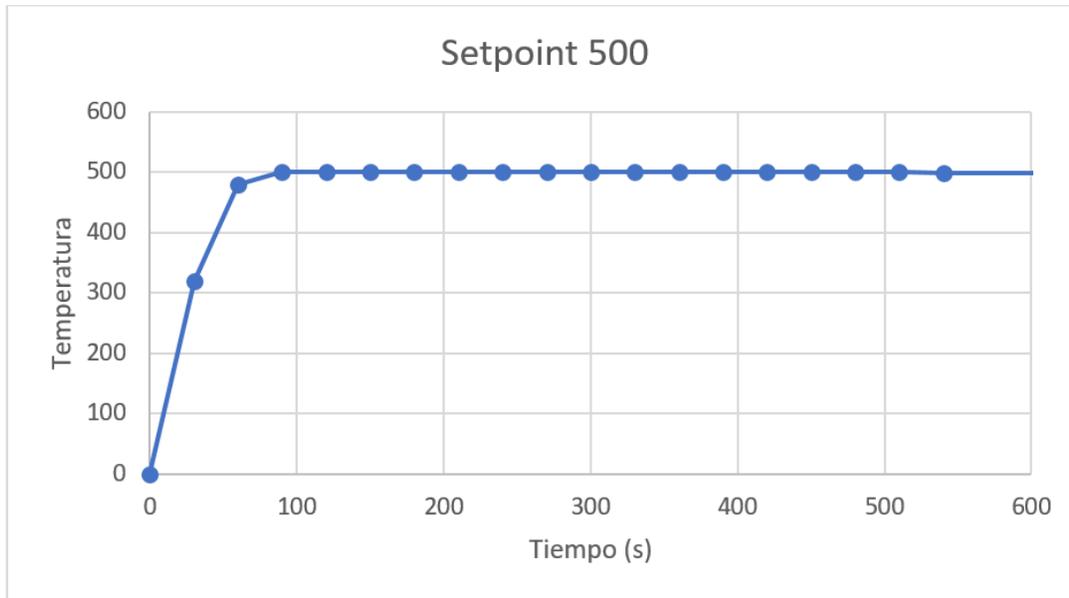


Figura 19.- Gráfica con referencia de 500 grados, sin sobre impulso y tiempo de establecimiento en 90 segundos. **Fuente:** Elaboración propia.

Cabe mencionar, que el tiempo de establecimiento pudo ser disminuido hasta 45 segundos, pero no fueron valores de PWM implementables, ya que exigía un PWM de 300%, lo que excedía las características físicas del sistema y que de cierta forma, ocasionaría un mal funcionamiento o posible daño en los componentes, así como el malfuncionamiento del controlador.

Conclusiones

El sistema físico, que consiste en un horno para secado de muestras en un laboratorio de pruebas químicas, ha sido la comprobación de los aspectos teóricos del control moderno, que simplificadas mediante una aproximación muy cercana del modelo matemático del modelo físico, una aplicación muy acertada y validada, ya que es un controlador digital muy sencillo, consistente en un par de ecuaciones implementables en un microprocesador de baja gama, entregando prestaciones muy competentes a nivel industrial, como un tiempo de establecimiento, ya sea desde un inicio en temperatura ambiente, hasta alcanzar el set point, en 90 segundos, o en el caso de cualquier perturbación debida a la operación de equipo durante las pruebas en el laboratorio, entregando tiempos de establecimiento menores a 20 segundos, las mediciones de la temperatura entregada, con respecto al set point, un error porcentual menor al 1%, de igual forma con las pruebas de repetibilidad con incrementos positivos o incrementos

negativos, considerando que en la pendiente de descenso de temperatura, influye en la velocidad para alcanzar el nuevo set point, de la temperatura ambiente, pues el sistema no posee un sistema de enfriamiento de tiro forzado.

Con la implementación de esta metodología RSC, se ha logrado un controlador de muy altas prestaciones, que cumple los requerimientos metrológicos que presentan los equipos de alta gama que se pueden encontrar disponibles en el mercado.

Agradecimientos

Agradezco con ímpetu al M.C. Samuel Mar Barón por brindarme su apoyo y asesoría para el diseño y construcción del horno.

Al Ing. José Federico Chong Flores y el Dr. Rubén Salas Cabrera, quienes me guiaron en todo momento para diseñar el controlador digital implementado en la HMI.

Referencia bibliográfica

- [1] Fundamentos del control industrial
- [2] Oficial Mexicana NOM-001-SCFI-2018. Aparatos electrónicos requisitos de seguridad y métodos de prueba, 2019.
- [3] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 5a ed. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN.
- [4] Ossenbrink H. 2003 Calibration procedures—state of the art. Proceedings of the 3rd WCPE (Osaka, Japan) 2177–2181.
- [5] Gabriel Jaime Posada Hernández, ELEMENTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA EL ANALISIS DE DATOS, Medellín, Colombia, Editorial Luis Amigo, 2016.
- [6] Controlador Arduino Mega 2560 (Datasheet).
- [7] Módulo de censado MAX6675 (Datasheet)

- [8] Pantalla Nextion NX8048T050_011 (Datasheet)

- [9] Chi-Tsong Chen, Linear System Theory and Design, CBS College Publishing, Holt. Rinehart and Winston, 1984.

- [10] Hassan K. Khalil, Nonlinear Systems, Prentice Hall, 3 edition, 2001.

- [11] Unknown autor. Network Humor.

- [12] Steven M. Lavalle, Planning Algorithms, Cambridge University Press, 2006.

- [13] Rubén Salas-Cabrera, Personal communication, 2009-2015.

- [14] Tayfun Cimen, [www.researchgate.net/post/What does affine in the control mean when used to describe a system](http://www.researchgate.net/post/What_does_affine_in_the_control_mean_when_used_to_describe_a_system), 2015.