

DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE UN HORNO PARA PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE ALTA TEMPERATURA

Posgrado en Energía y Medio Ambiente UAM-I

Alexis Ríos Villanueva, Ing. Físico, alexisriosvillanueva@gmail.com,

Luis Antonio Guzman Flores, Ing. en Energía, cbi2213801026@xanum.uam.mx

Juan Daniel Macias. Dr. en Físicoquímica, jdanielmacias@gmail.com

Hernando Romero Paredes, Prof. Inv., hrp@xanum.uam.mx



INTRODUCCIÓN

Es difícil pensar a nuestro mundo sin energía siendo el principal problema más que la producción, su almacenamiento, una solución a esto son los sistemas propuestos de almacenamiento térmico que básicamente sigue las leyes de la termodinámica, donde el fluido caliente cede calor al más frío. Uno de estos sistemas es el almacenamiento termoquímico el cual se basa en reacciones redox reversibles el cual se genera por medio de tres pasos: el periodo de carga donde se absorbe energía, seguido del almacenamiento de energía y finalmente el periodo de descarga, por lo cual se subsanan la intermitencia en las fuentes renovables de generación de energía y se puede competir contra las fuentes convencionales. Actualmente se utilizan procesos redox a alta temperatura para producir combustibles como el hidrógeno y almacenar calor mediante la reducción química de óxidos metálicos.

OBJETIVOS

- Diseño y desarrollo de un horno eléctrico para procesos termoquímicos redox.
- Instrumentación del horno eléctrico.
- Diseño del sistema de control.
- Obtención de la función de transferencia del sistema de calentamiento y enfriamiento.
- Sintonización del controlador de temperatura PID.
- Programación en software de código abierto del algoritmo de control con rampas de temperatura con velocidades de calentamiento programables de 5 a 40 °C/min.
- Análisis de transferencia de calor y simulaciones térmicas.
- Determinación de la distribución de calor dentro del horno.

METODOLOGÍA

01 Diseño

El horno diseñado está constituido por cuatro elementos principales, el reactor termoquímico (TQ), el sistema de calentamiento, y el sistema de refrigeración, todos ellos están alojados en una camisa adiabática de lana de alúmina y una carcasa de acero.

02 El reactor termoquímico

El reactor termoquímico consta de un tubo de acero (AISI 304) con dos cabezales desmontables de bronce y acero inoxidable que permiten tanto la circulación del gas reductor como el intercambio de reactivos y productos. La longitud total del reactor es de 0.56 m. El crisol que se utiliza para contener la muestra durante las reacciones consta de una cesta de malla de alambre que está diseñada para no obstaculizar la difusión de gases.

03 El sistema de calentamiento

El horno utiliza una resistencia eléctrica (longitud 11,1 m, diámetro: 1,6 mm) basada en una aleación comercial FeCrAl como elemento calefactor. El alambre está dispuesto en forma helicoidal en la superficie exterior de un tubo de alúmina, que transfiere la energía térmica al tubo del reactor que contiene el crisol.

04 El sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento del reactor consta de un tubo en forma de espiral; un intercambiador de calor que utiliza agua como fluido de trabajo y una bomba de accionamiento. La forma en espiral mejora la transferencia de calor ya que no hay líneas rectas en el tubo.

05 Diseño del sistema de control

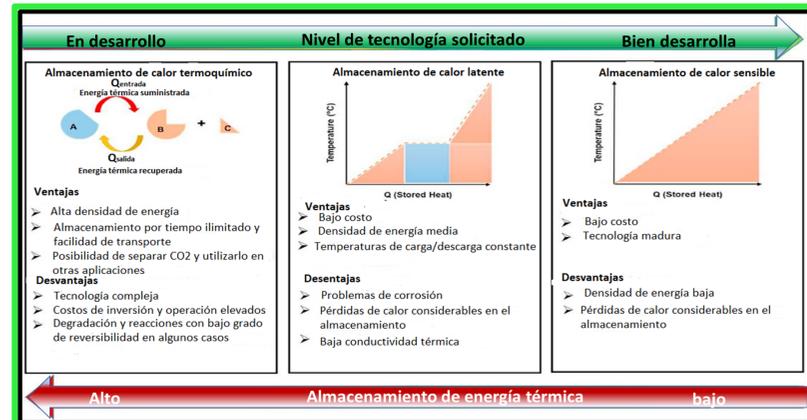
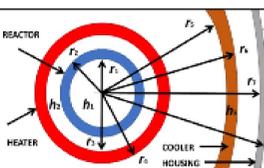
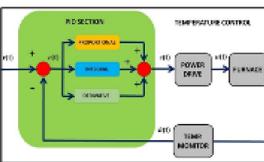
El controlador PID se compone de tres elementos que proporcionan una acción proporcional, integral y derivativa. La señal de referencia $r(t)$ representa la temperatura deseada y la salida $y(t)$ es la temperatura real del sistema controlado, que cambia con el tiempo. La señal $e(t)$ representa el error e indica al controlador la diferencia entre el estado deseado o referencia $r(t)$ y el estado real del sistema medido por el sensor, la señal $h(t)$. Los parámetros k_p , k_i , y k_d son: 0.18, 18.86, 0.00099, respectivamente.

06 Hardware y Software

El hardware y software para el control de temperatura se desarrolló en una plataforma de código abierto basada en el microcontrolador ATmega328P. La etapa de potencia incluye un relé de estado sólido (SSR-50VA) con potencia máxima de 50 A/250 V; el dispositivo está montado en un disipador de calor para una disipación de adecuada de energía. Todo el tiempo el valor de temperatura se monitorea con un termopar tipo K, la señal de medición analógica de milivoltios se amplifica (HW-550) y se envía a la placa del controlador.

07 Análisis de transferencia de calor

La fuente de calor del tubo del reactor es la pared interior del tubo de alúmina y se denomina simplemente calentador para facilitar el análisis. La energía térmica se transmite principalmente por radiación dentro del tubo del reactor. La cantidad de calor intercambiado en estas secciones depende de la temperatura, el área de la superficie y la emisividad de las superficies.



JUSTIFICACIÓN

En los procesos de alta temperatura las partículas se agrupan formando grandes aglomerados que causan el aumento de la longitud en el camino de difusión del oxígeno hacia el material termoquímico, esto debido a la naturaleza del proceso, causan que el elemento termoquímico tenga un ciclo de vida corto y una tasa de reoxidación reducida.

Para evitar este problema se desarrolló una estrategia de acuerdo a lo que sugiere la literatura, como lo es controlar las velocidades de calentamiento y enfriamiento con el fin de minimizar los efectos de la aglomeración de partículas. Esto permitirá mejorar la operación y el diseño de los reactores para futuras investigaciones.

RESULTADOS

Se obtuvo una sintonización aceptable del control PID. La grafica en color rojo representa la rampa de calentamiento y el pulso PWM corresponde a la curva de color azul (controla la potencia de la resistencia) El pulso PWM se mantiene en un promedio en el valor de 2.5 volts que corresponde a la potencia máxima de 2 kW.

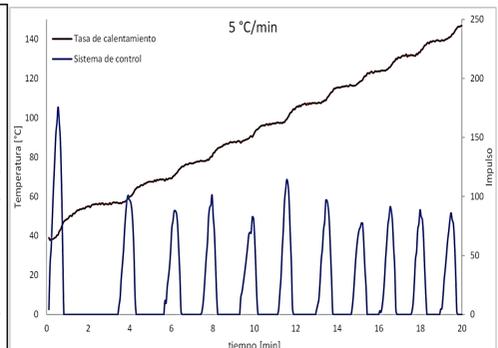


Figura 1.- Rampa de temperatura a 5°C/min y pulsos PWM del PID

Las tasas de calentamiento son aproximadamente lineales. El proceso isotérmico dura 25 minutos y posee un error de borde debido a la velocidad de muestreo. El enfriamiento se realiza con agua como fluido de trabajo a 10 °C durante 20 minutos.

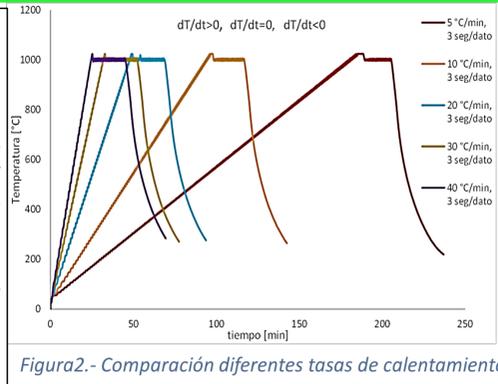


Figura 2.- Comparación diferentes tasas de calentamiento

Las curvas de control PWM para cada tasa de calentamiento son favorables, a pesar de que las tasas de calentamiento en magnitud son diferentes, por lo que la programación PID cumple la función deseada. Se determino que para una potencia de 2 kW la intensidad de corriente fijada en de 11.3 A es funcional.

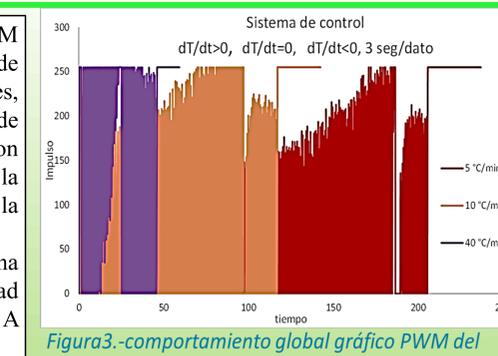


Figura 3.- comportamiento global gráfico PWM del sistema de control

Referencias

M. Ouyang, Y. Wang, F. Wu, and Y. Lin, "Continuous Reactor Temperature Control with Optimized PID Parameters Based on Improved Sparrow Algorithm," Processes, vol. 11, no. 5, 2023.
 K. Ogata, Modern Control Engineering, 5th ed. Pearson, 2009.
 H. Trentelman, A. Stoerovogel, M. Hautius, and L. Dewell, "Control Theory for Linear Systems," Appl. Mech. Rev., vol. 55, no. 5, pp. B87-B87, Sep. 2002.
 Arduino, "UNO R3." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc>.
 Arduino, "HW-550 K-Type Thermocouple Amplifier." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc>.
 Guzman Flores, L. A., Ríos Villanueva, A., Macias, J. D., & Paredes Rubio, H. R. (2023). Design and Instrumentation of a Furnace for High-Temperature Thermochemical Processes. International Energy Conference.