

Control de perfiles de temperatura de un horno tipo mufla, para procesos de Pirólisis

Control of temperature profiles of a muffle-type furnace for pyrolysis testing

David Alejandro Ávila Alfonso¹ (estudiante programa de Ingeniería Mecánica)
Gabriel de Jesús Camargo Vargas² (docente programa de Ingeniería Mecánica)

¹0000-0002-3506-9329. Universidad Libre, Bogotá D.C., Colombia, davida-avilaa@unilibre.edu.co
²0000-0003-3721-0936. Universidad Libre, Bogotá D.C., Colombia, gabriel.camargov@unilibre.edu.co



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.10362>

Cómo citar: Ávila, D., & Camargo Vargas, G. D. J. (2023). Control de perfiles de temperatura de un horno tipo mufla para procesos de pirólisis. Avances investigación en ingeniería, 20(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.10362>

Resumen

Los requerimientos energéticos y las economías de escala usadas para las aplicaciones energéticas aportan valiosa información en los estudios de las transformaciones energéticas de diferentes residuos plásticos. El control adecuado de los reactores de pirólisis requiere de modelamientos matemáticos que permitan establecer variables y tiempos adecuados de calentamiento. En esta investigación se presentan los resultados de la simulación de un reactor de pirólisis para determinar el efecto de los parámetros físicos del sistema de calentamiento en el tiempo necesario para lograr una temperatura máxima que se pudiera controlar. Se usaron softwares especializados (Tipo CAE y MATLAB) para la simulación y comparar los perfiles de temperatura obtenidos mediante la simulación y contrastar estos datos con el registro de la temperatura de un reactor de pirólisis. La simulación en ANSYS se efectuó en estado transitorio. Los resultados obtenidos demuestran que el proceso de simulación y el calentamiento del horno de resistencias eléctricas permiten concluir que el sistema de ecuaciones usado en el proceso se ajusta al horno disponible.

Palabras clave: pirólisis, polímeros, modelación, horno, perfil de temperatura.

Abstract

In The energy requirements and economies of scale used for energy applications provide valuable information in studies on the energy transformations of different plastic waste. Proper control of pyrolysis reactors requires mathematical modeling that allows for the establishment of appropriate variables and heating times. This research presents the results of a simulation of a pyrolysis reactor to determine the effect of the physical parameters of the heating system on the time required to reach a maximum temperature that could be controlled. Specialized software (such as CAE and MATLAB) was used for simulation and to compare the temperature profiles obtained through simulation with the temperature record of an actual pyrolysis reactor. The ANSYS simulation was performed in a transient state. The results obtained demonstrate that the simulation process and the heating of the electric furnace lead to the conclusion that the system of equations used in the process is suitable for the availability furnace.

Keywords: Pyrolysis, Polymers, modelling, furnace, temperature profile.

1. Introducción

El grado de desarrollo de una sociedad está directamente vinculado con el consumo de energía de sus miembros. A un mayor consumo de energía un mayor desarrollo social y calidad de vida. El aumento de la población humana, el agotamiento de los combustibles fósiles y los problemas ambientales ocasionados por el uso de estos, han llevado a un desarrollo en fuentes alternativas de energía buscando que sean renovables, benéficas con el medio ambiente, y que proporcionen combustibles de calidad que permitan sostener los actuales estándares de vida [1].

La pirólisis es un proceso en el cual se toman biomazas tales como polímeros, desechos orgánicos entre otros, pero no metales, para ser transformados mediante un proceso termoquímico en ausencia de oxígeno, para esto son necesarias las temperaturas y presiones que se ejercen en el reactor de pirólisis ilustrado en la figura 1. Deben ser medidas con precisión ya que los resultados de la pirólisis son principalmente carbón, aceites y gases, los cuales varían directamente de la temperatura de trabajo y el tiempo de sostenimiento [2].



Figura 1. Reactor de Pirólisis (Laboratorios de ingeniería Universidad Libre)

El constante desarrollo tecnológico permite seguir también en la búsqueda de mejorar la regulación y control de sistemas, tales como calderas, tanques, procesos industriales, entre otros. Este artículo se centra en observar el comportamiento térmico ejercido sobre el reactor de pirólisis.

Las transformaciones termoquímicas de los residuos urbanos y agrícolas ofrecen la oportunidad de obtener combustibles que no comprometan la cadena alimenticia, que reduzcan sustancialmente la generación de residuos sólidos, que constituyen vectores de roedores e insectos. Una de estas transformaciones termoquímicas es la pirólisis. Uno de los contaminantes sólidos de mayor impacto ambiental como residuo son los polímeros, que al año en Colombia generan 1.4 millones de toneladas [3].

Teniendo en cuenta lo anterior, la pirólisis es un proceso de descomposición química en el que un material orgánico y todos los tipos de materiales, exceptuando los metales y el vidrio, por calentamiento a altas temperaturas en ausencia del oxígeno se descomponen, lo que dice que se pueden utilizar y reciclar biomazas, lo cual genera un factor a favor para este proceso, ya que se pueden utilizar polímeros tales como PS (poliestireno) PEAD (polietileno de alta densidad) y PET (polietileno tereftalato) los cuales son del común de plásticos utilizados en todos los productos de envasado de comida, detergentes, químicos, entre otros, y son desechados cada día lo que genera grandes masas de contaminación; entonces, esos plásticos desechables se pueden triturar y transformarlos mediante la reacción termoquímica de la pirólisis; de este modo se obtiene como resultado carbón, líquidos, entre estos aceites, y gases muy preciados ya que pueden ser utilizados como combustible; de esta manera se da así una reutilización energética de los polímeros [4], [5].

Tomando en consideración la información relevante de pirólisis con polímeros [6], se pueden obtener datos relevantes para la

creación de un perfil de temperaturas, para transformar polímeros en el reactor de pirólisis usando como fuente de calor un horno tipo mufla de resistencias eléctricas, como el que se observa en la figura 2.

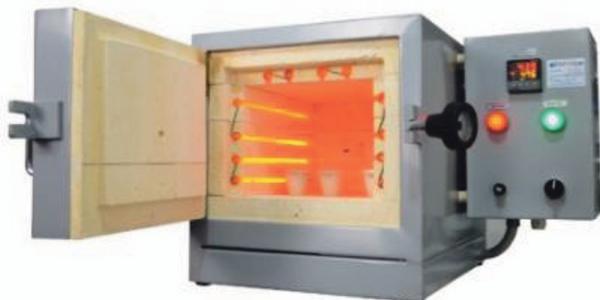


Figura 2. Horno mufla de resistencias eléctricas.

2. Metodología

2.1. Parámetros del horno mufla

El horno mufla de resistencias eléctricas trabaja bajo condiciones específicas en las cuales se estudian su potencia, valor de las resistencias eléctricas, entre otros parámetros, para establecer como base unas condiciones reales en donde al someter las simulaciones de los perfiles de temperatura se puede realizar una comparación directa de la transferencia de calor y las temperaturas en el reactor pirólisis.

Se toma de la literatura y se compara con el modelo real del laboratorio de ingeniería y se obtienen los parámetros del horno, en donde se extraen las tablas de los parámetros de la referencia [7], y se comparan con los parámetros de los hornos mufla a disposición de la facultad, para encontrar los valores reales del modelo y de esta manera realizar los estudios térmicos de la transferencia de calor al reactor de pirólisis.

Como principal objetivo de estudio la temperatura y transferencia de calor al reactor de pirólisis, es indispensable conocer los parámetros físicos de un horno mufla de resistencias eléctricas, para ser adaptados en un perfil de temperaturas ideal al proceso.

Tabla 1. Parámetros de las resistencias eléctricas de un horno mufla.

Temperatura máxima del trabajo	1.100°C
Temperatura de fusión	1.400°C
Potencia específica a 1000°C	2 W/cm ²
Resistencia a 20°C	1.1 Ω mm ² /m
Coefficiente de resistividad a 1.200°C	1.045
Resistividad	1.77*10 ⁻⁶ Ω M
Coefficiente de temperatura	0.00013
Densidad específica	8.412

Observando los valores de la tabla 1, se puede intuir que la temperatura máxima del horno mufla puede ser menor a la investigada por lo que no son suficientes los parámetros de las resistencias eléctricas. A continuación, se toman los parámetros ilustrados en la tabla 2 del horno mufla, por ser este el más aproximado al modelo real modificado estudiado, para realizar pruebas piloto de pirólisis en donde se destaca la frecuencia y voltaje de trabajo, para poder realizar un perfil de temperaturas adecuado al proceso y obtener mejores resultados de las simulaciones de la transferencia de calor; los parámetros se extrajeron de diferentes fabricantes de hornos mufla.

Esos parámetros publicados en los manuales de uso, se compararon con la referencia [8] y se calcularon dichos valores de un horno mufla construido de manera casera bajo los mismos parámetros al modelo de referencia del estudio.

Tabla 2. Propiedades del horno mufla.

Temperatura máxima del trabajo	850°C
Frecuencia monofásica	50 – 60 hz
Potencia del horno	2500 W
Resistencia en ohmios de los filamentos	
14,66 Ω	
Voltaje	110v

2.2. Temperaturas y tiempo de reacción

En el proceso de pirólisis ocurren varias transformaciones termoquímicas que, dependiendo del resultado que se desea obtener, se deben modificar y controlar las temperaturas y los tiempos de reacción pues son estos los más importantes del proceso. Para el estudio utilizando polímeros se tomaron diversas fuentes en la literatura, en donde se destacan las temperaturas sometidas en diferentes residuos plásticos, y la concentración de estos [9].

Es muy importante aclarar que el enfoque debe ser el rendimiento de líquidos y gases en el proceso, ya que estos son indispensables en la reutilización energética; para esto se observaron los datos en la figura 3. donde a temperaturas entre 350°C a 500°C se obtuvo un porcentaje de rendimiento líquido en los tiempos de 0 a 120 minutos de la reacción. En el estudio realizado se utilizaron los polímeros ya mencionados, y se obtuvieron de acuerdo con [10]. Los tiempos de 40 minutos y 60 minutos aproximadamente para el ensayo [11].

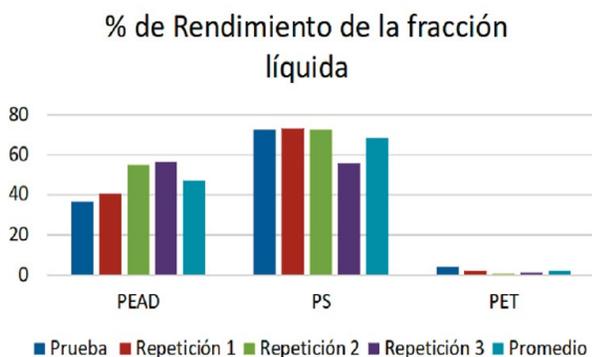


Figura 3. Porcentaje de rendimiento de la fracción líquida.

En la emulación de las temperaturas transferidas por el horno al reactor de pirólisis, se tomarán 45 minutos como tiempo transitorio para obtener resultados del control de perfil de temperaturas. En la figura 3 se puede observar cómo el polietileno de alta densidad (PEAD) y el poliestireno (PS) son los que más aportan un resultado en estado líquido al finalizar el proceso de pirólisis.

2.3. Punto de reacción termoquímica

La pirólisis puede ser realizada en diferentes rangos de temperatura, que varían entre los 300°C hasta los 800°C. Es muy importante definir un rango menor, en el, que se puedan controlar las temperaturas máximas y obtener el mayor costo - beneficio del proceso de reutilización energética, a menor temperatura del proceso, menor tiempo y calor consumido [12].

De acuerdo con los hallazgos del proceso de pirólisis [13], se puede encontrar un rango de temperaturas menor de 450 - 525°C, para la transformación energética de los polímeros; para esto se tiene en cuenta la gráfica Differential Thermal Analysis (DTA) y Derivative Thermogravimetry (DTG) ilustradas en las figuras 4. y 5. donde se realizó el estudio y se determinaron los cambios de calor específico en una muestra de polímeros triturados [14].

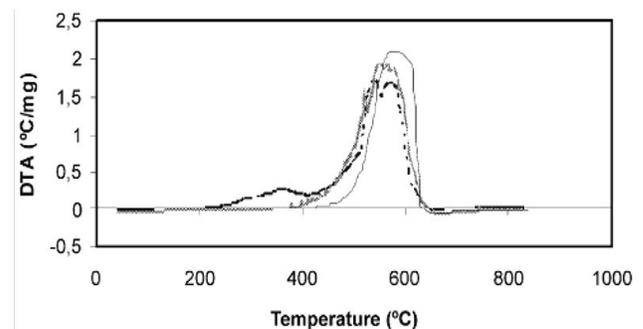


Figura 4. Análisis térmico diferencial (DTA).

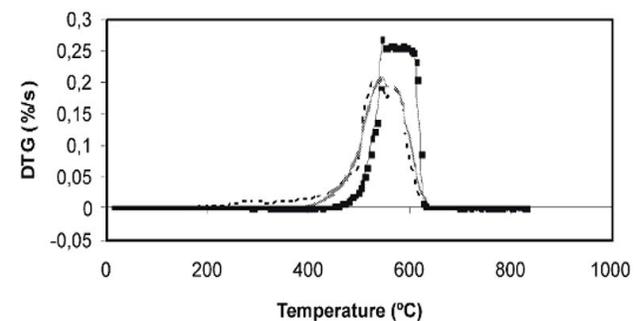


Figura 5. Derivada termogravimétrica (DTG).

Las gráficas ilustradas en las figuras 4 y 5 son de gran relevancia porque indican para los diferentes polímeros a estudiar en el proceso de pirólisis, la temperatura en donde se obtiene la transformación de los

polímeros dentro del reactor de pirólisis; este rango de temperatura cerca de los 500° C permite obtener la temperatura máxima y de sostenimiento para la creación del perfil de temperatura del horno mufla.

2.4. Modelo de transferencia de calor

Para la transferencia de calor generada por el horno mufla de resistencias eléctricas al reactor de pirólisis, de acuerdo con el modelo ilustrado en la figura 6, obtenida de la referencia [15], se obtiene el siguiente modelo de referencia para la transferencia de calor, el cual ilustra las paredes del reactor de pirólisis.

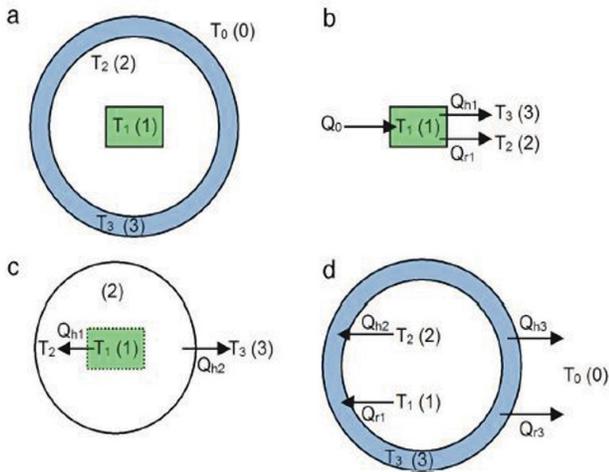


Figura 6. Modelo de transferencia de calor.

De acuerdo con el modelo de transferencia de calor considerado, se obtienen las siguientes ecuaciones para las 3 paredes del reactor de pirólisis [15].

$$C1 = \frac{Q0}{m1Cp1} \quad (1) \quad C2 = \frac{1.32A1c}{\frac{1}{deq^4} m1Cp1} \quad (2)$$

$$C3 = \frac{\sigma SBA1r(\epsilon1\epsilon3A3i)}{(m1Cp1)(\epsilon1A1r(1 - \epsilon3) + \epsilon3A3i)} \quad (3)$$

$$C4 = \frac{1.32A1c}{\frac{1}{deq^4} m2Cp2} \quad (4) \quad C5 = \frac{1.32A3i}{di^{1/4} m2Cp2} \quad (5)$$

$$C6 = \frac{1.32A3i}{di^{1/4} m3Cp3} \quad (6)$$

$$C7 = \frac{\sigma SBA1r(\epsilon1\epsilon3A3i)}{(m3Cp3)(\epsilon1A1r(1 - \epsilon3) + \epsilon3A3i)} \quad (7)$$

$$C8 = \frac{1.32A3o}{do^{1/4} m3Cp3} \quad (8)$$

$$C9 = \frac{\sigma SB\epsilon3A3o}{m3Cp3} \quad (9)$$

$$\frac{dt_1}{dt} + c_1(T_1 - T_2)^{5/4} + c_3(T_1^4 - T_3^4) = c_1 \quad (10)$$

$$\frac{dt_2}{dt} - c_4(T_1 - T_2)^{5/4} + c_5(T_2 - T_3)^{5/4} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dt_3}{dt} - c_6(T_2 - T_3)^{5/4} - c_7(T_1^4 - T_3^4) + c_8(T_3 - T_0)^{5/4} + c_9(T_3^4 - T_0^4) = 0 \quad (12)$$

Fundamento en las ecuaciones ec 1, a la ec 12, se puede generar un modelo matemático de transferencia de calor teniendo en cuenta los tiempos y el rango de temperatura.

3. Resultados y discusión

3.1. Ejecución virtual de la transferencia de calor

Se construye un código en MATLAB, del modelo matemático de la transferencia de calor a las paredes del reactor de pirólisis.

```
function[Tp1, Tp2, Tp3]=horno (Vd, Ta, Tb, Tc)
To=298
m1=0.14
m2=2.4e-3
m3=0.387
cp1=0.9
cp2=1
cp3=0.7
A1c=10.5e-3
A1r=9.48e-3
deq=3e-3
A3i=70.7e-3
A3o=75.4e-3
di=75e-3
sb=5.67*10e-8;
em1=0.4
em3=0.93
%constantes de C1 a C9
C1 = Vd/(m1*cp1);
C2 = (1.32*A1c)/((deq^(0.25)*m1*cp1));
C3=(sb*A1r*em1*em3*A3i)/
((m1*cp1)*(em1*A1r*(1-em3)+em3*A3i))
C4= (1.32*A1c)/((deq^(0.25)*m2*cp2))
C5=(1.32*A3i)/((di^(0.25)*m2*cp2))
C6= (1.32*A3i)/((di^(0.25)*m3*cp3))
C7=(sb*A1r*em1*em3*A3i)/
((m3*cp3)*(em1*A1r*(1-em3)+em3*A3i))
C8= (1.32*A3o)/((do^(0.25)*m3*cp3))
C9= (sb*em3*A3o)/(m3*cp3)
```

Se obtiene la siguiente función de transferencia en la figura 7, la cual es una ecuación que se utiliza como modelo de relación entre las condiciones de entrada y salida de un sistema, en el que el sistema tratado aquí es el horno de resistencias eléctricas.

$$\frac{6.04}{520 s + 1.14}$$

Figura 7. Función de transferencia del horno mufla.

Considerando el modelo matemático y la función de transferencia, es generado el siguiente circuito en SimuLink, para observar el comportamiento de la temperatura en las paredes del reactor pirólisis.

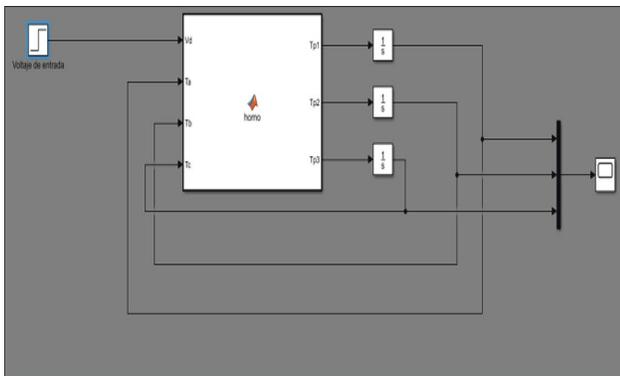


Figura 8. Circuito de temperaturas Simulink.

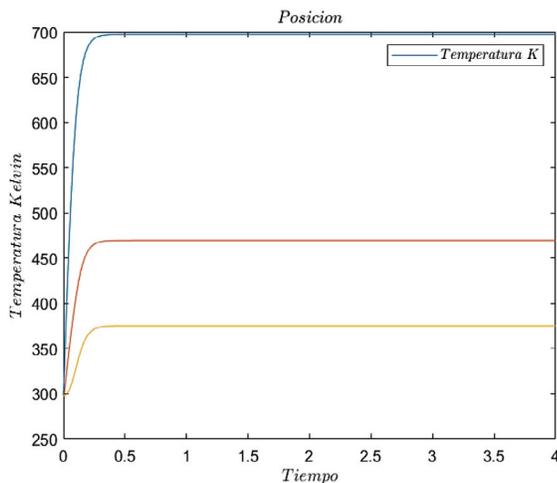


Figura 9. Temperaturas de las paredes del reactor.

Considerando la aplicación de las ecuaciones y la función de transferencia se obtienen los resultados en la figura 9, donde se observa una respuesta de la temperatura inmediata a una excitación en el sistema de 520°C , alcanzado como pico máximo de 700°K o $426,85^{\circ}\text{C}$ en el reactor, durante la transferencia de calor en la pared principal del reactor de pirólisis.

Este modelo de transferencia de calor indica que se obtienen pérdidas significativas, las cuales son atribuidas a las condiciones y el modelamiento realizado.

La transferencia de calor dentro del sistema no solamente puede ser estudiada desde el punto visto por Matlab, ya que se debe considerar el calor aportado por la radiación y convección dentro del sistema; para esto se debe realizar otro estudio utilizando las herramientas de ingeniería asistida por ordenador o software CAE, esperando obtener resultados aproximados al modelo real de referencia y dentro del rango de temperaturas establecido.

3.2. Simulación de la transferencia de calor

Para la simulación de la transferencia de calor se obtiene un modelo 3D observado en la figura 10, el cual se realizó a escala 1:1 del prototipo Real.



Figura 10. Modelo 3D del reactor de pirólisis.

El archivo es exportado al software de ANSYS donde en se procede a utilizar los recursos máximos del equipo; en este caso se logra realizar un enmallado de la pieza en la figura 11., tomando en consideración que, a más cantidad de nodos, mejores serán los resultados obtenidos por la simulación de calor en estado transitorio.

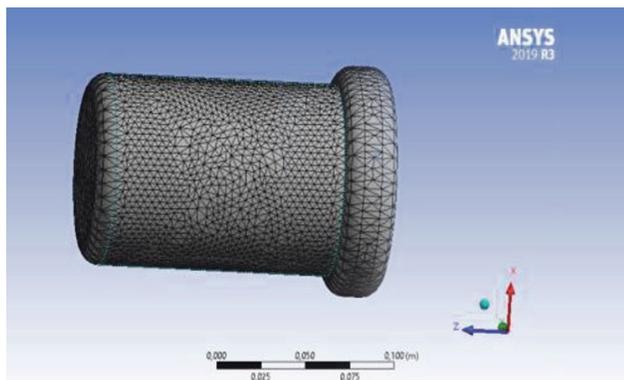


Figura 11. Proceso de enmallado del reactor de pirólisis.

Generando el estudio geométrico y verificando que el software no tenga problemas de superficie con el modelo 3D CAD del reactor, se realiza un enmallado del cual se obtienen 32.030 Nodos.

Se somete a una convección forzada por áreas donde el valor de la convección es de $27.8 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y para la radiación se obtiene un valor utilizando la ecuación (13) de radiación,

$$Q_r = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (13)$$

donde σ es el coeficiente de Stefan Boltzmann, $\epsilon = 5,67037 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot \epsilon)$ es la emisividad del nicromo (0.08) y T el delta de temperaturas. obtenido de esta manera un coeficiente de calor por radiación de $1683.3 \text{ W}/\text{m}^2$, para la simulación térmica transitoria ilustrada en la figura 12.

La temperatura máxima obtenida bajo estas condiciones fue de $482,33 \text{ }^\circ\text{C}$, que es superior a la obtenida bajo el modelamiento de ecuaciones en MATLAB que indicó una buena temperatura para realizar las pruebas de pirólisis.

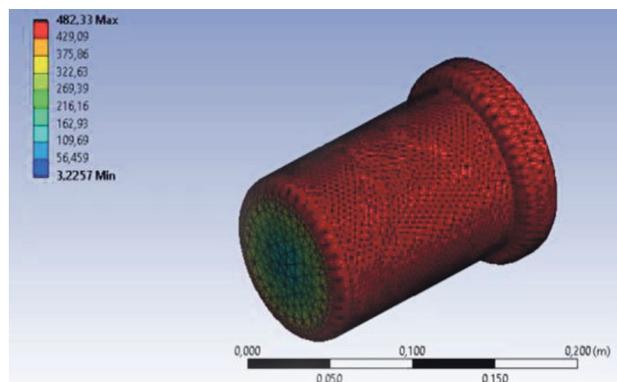


Figura 12. Análisis transitorio de la transferencia de calor.

En el tiempo de muestreo de resultados observados en la figura 12, se tomó de referencia un tiempo de 45 minutos para obtener el perfil simulado; estos datos se pueden comparar con los datos reales tomados del horno mufla real, y de esta manera se espera tener una aproximación a los perfiles ideales para los ensayos de pruebas piloto de pirólisis.

Considerando el tiempo para llegar a la temperatura ideal para el proceso, se estima un tiempo de transformación del material, de acuerdo con los estudios de la figura 3; el tiempo está aproximado a los 40 – 45 minutos de sostenimiento a las temperaturas máximas, para lo cual es necesario simular un control de temperatura del horno mufla.

3.3. Respuesta de la señal de control

Fundamentado en las observaciones realizadas en la referencia [16], se toma el siguiente modelo, para producir una señal de control a la excitación del sistema ilustrado en la figura 13.

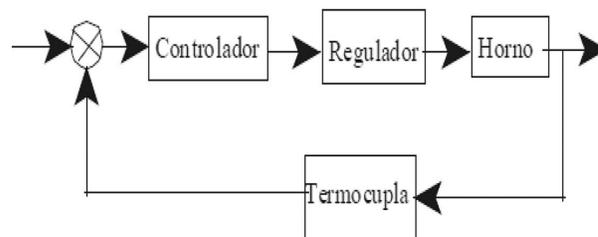


Figura 13. Modelo de control del horno mufla.

Tomando la función de transferencia ilustrada en la figura 7. Se diseña la planta y circuito en Simulink.

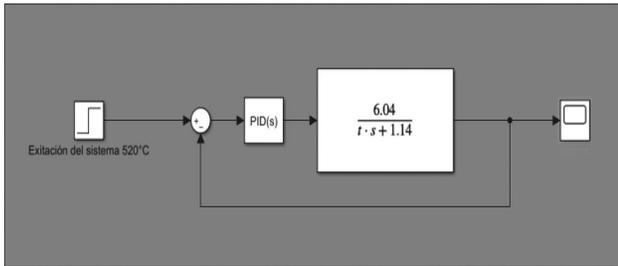


Figura 14. Circuito generado control PID del horno mufla.

El circuito es generado para poder visualizar la señal de respuesta del sistema del horno y la señal de bloqueo o de control; para esto se realizaron varios ensayos en los cuales se tomaron los mejores resultados de las señales, que se pueden visualizar en la figura 15. Una respuesta del sistema alcanzó su pico máximo después de los 25 minutos; además, en la figura 16, se puede destacar cómo la señal de bloqueo o control alcanza la del sistema y logra estabilizarla dando como resultado a la teoría del sistema de control PID una buena aplicación por implementar en el horno casero de resistencias eléctricas; esta señal es indispensable para realizar la prueba de sostenimiento a la temperatura máxima o ideal para la pirólisis en los polímeros.

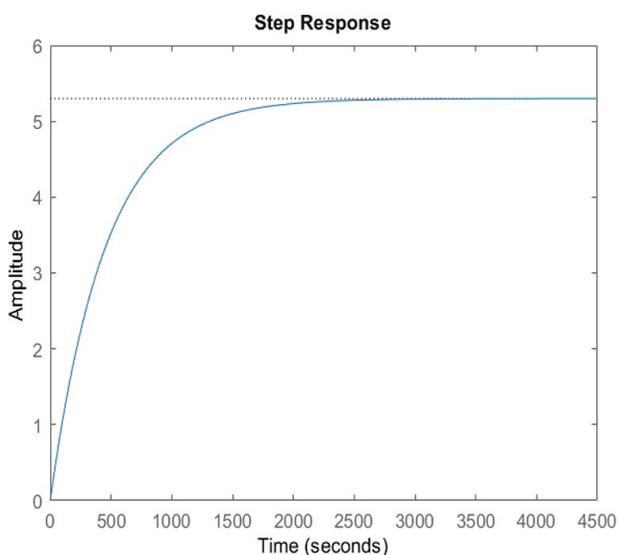


Figura 15. Respuesta gradual del sistema.

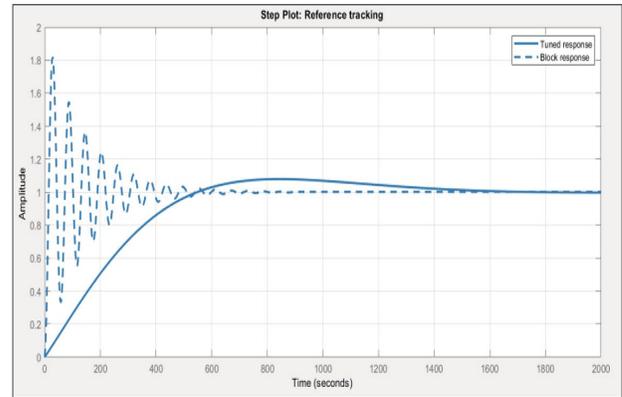


Figura 16. Respuesta de la señal de control.

La señal de control estabiliza el sistema en aproximadamente 560 segundos lo que son 9.3 minutos de calentamiento del horno, lo cual no influye en la prueba, ya que esta señal se estima para la temperatura máxima del proceso de pirólisis con polímeros, la cual se estima en aproximadamente 480°C; esta temperatura es alcanzada al transcurrir 40 minutos, en el que el horno mufla es encendido hasta que logra alcanzar la temperatura mencionada.

Esta señal no es el sistema control PID a implementar en el horno, ya que solo es un resultado de referencia a una señal de control; se puede visualizar en la figura 16 un retraso de la respuesta en el tiempo, además del ruido que contiene la propia señal.

Esta emulación es la ventana a la implementación de un control refinado al horno casero de resistencias eléctricas, puesto que no cuenta con ninguna regulación automática de temperatura y esto puede generar desviaciones en la toma de resultados de pruebas piloto de pirólisis.

3.4. Perfil de temperaturas

Construir el perfil de temperaturas es vital en la investigación; para ello se recopilaron los datos de muestreo del horno real, la simulación transitoria de temperatura en ANSYS, y el modelamiento del sistema en MATLAB; como resultado, en la tabla 3, se ilustran las temperaturas obtenidas en el tiempo de calentamiento del horno, donde

el muestro de tiempo es de 5 minutos en la recolección de los datos reales y transitorios simulados; para los datos recolectados de MATLAB se proporciona al sistema con una temperatura de referencia y su salida es la temperatura inmediata del reactor de pirólisis.

Tabla 3. Propiedades del horno mufla.

Tiempo (Min)	Temperatura ANSYS (°C)	Temperatura MATLAB(°C)	Temperatura Real (°C)
0	22	22	22
5	56,265	39,25	51,254
10	109,68	79,25	120,5
15	162,93	138,29	155,15
20	216,16	176,25	214,15
25	269,39	214,5	250,1
30	322,63	265,14	331,5
35	375,86	305,4	371,25
40	429,09	394,145	415,8
45	482,33	426,89	478,26

Para generar el perfil de temperaturas adecuado para el sistema, se toman los datos obtenidos de la medición en un horno mufla real, con los datos obtenidos en las simulaciones, el calentamiento del horno y el tiempo de sostenimiento a la temperatura ideal en el proceso; considerando las desviaciones de la señal de control, la recolección de datos y los controladores de temperatura de los hornos mufla, se construye la gráfica ilustrada en la figura 17, donde se representan las temperaturas y el tiempo, para realizar una prueba exitosa de pirólisis en un reactor casero calentado por un horno de resistencias eléctricas.

En la Tabla 3 se puede observar el tiempo de calentamiento del horno mufla casero elaborado por los estudiantes del programa de ingeniería; los resultados muestran la comparación de los diferentes modelos matemáticos y de simulación utilizando software CAE (ingeniería asistida por computador). Las temperaturas se denominan el

precalentamiento del proceso hasta llegar a la temperatura ideal.

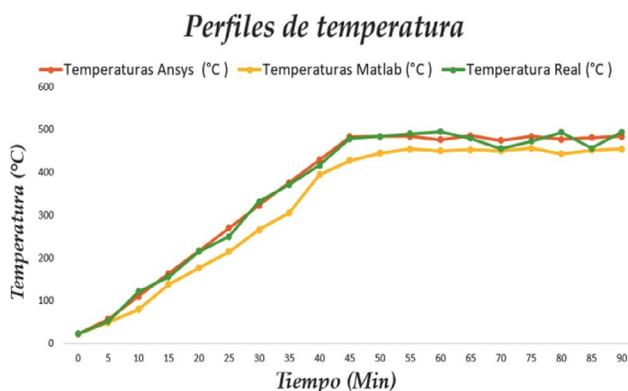


Figura 17. Perfil de temperaturas.

Se puede observar en la figura 17 el perfil de temperaturas generado por la tabla 3, añadiendo a esta el tiempo y temperatura de una prueba piloto de pirólisis donde se estiman 45 minutos de prueba añadiendo de esta manera el tiempo y sostenimientos de la temperatura del minuto 45 al minuto 90.

El desarrollo de los perfiles de temperatura observados en la figura 17 son las temperaturas y tiempos a los cuales se debe someter el reactor de pirólisis para obtener resultados óptimos en los ensayos de laboratorio con los modelos reales. Este perfil es la guía para seguir hacia la transformación energética de los polímeros en combustibles.

4. Conclusiones

En la investigación se logró simular una señal de control PID, para el control del horno mufla de resistencias eléctricas, considerando que se utilizó un horno casero fabricado como producto de los proyectos de los estudiantes del programa; su funcionamiento es de tensión baja 110v, la regulada en Colombia y puede generar desviaciones en el proceso; por lo tanto, se considera la opción de tener un panel para observar la variación de las temperaturas en el tiempo transcurrido de la prueba. Por otra parte, el modelamiento matemático y la simulación

de transferencia de calor en estado transitorio se complementan, para poder tener resultados verídicos y aproximados a una prueba real de pirólisis. Considerando la repuesta de la señal de control PID antes mencionada, se estima que esta puede ser mejorada en el modelo real, utilizando la implementación del control por medio de una planta y apoyándose en un microcontrolador como lo es Arduino, disminuir el tiempo y ruido de la señal, ya que el obtener una rápida y mejor señal de control puede influir en los resultados de la prueba de pirólisis.

El poder realizar pruebas piloto de pirólisis a bajo costo es la apertura de la brecha para la transformación energética de residuos, y para incentivar a una mayor investigación y desarrollo, lograr resultados del proceso con diferentes polímeros, obtener nuevos perfiles de temperatura y porcentajes de

fracción líquida, sólida y gaseosa, las cuales se pueden transformar directamente en combustibles.

Las temperaturas ideales del proceso de pirólisis utilizando polímeros se encuentran en el rango de los 470°C a 495°C, lo que proporciona un menor y preciso rango del proceso en comparación con la literatura. El desarrollo y la divulgación de la información es fundamental para el desarrollo y transición energética.

Considerando el utilizar los desechos plásticos como fuente alternativa de energía, no solo se contribuye en el desarrollo y consumo energético, debido a que indirectamente se proporciona una solución a la contaminación y acumulación de residuos plásticos. Realizar pruebas piloto de pirólisis es indispensable para las investigaciones de reutilización energética de los polímeros.

Referencias bibliográficas

- [1] S. T. V. Zhiznin, «Energy impact on sustainable development,» *World Economy and International Relations*, vol. 61, n° 11, pp. 34-42, 2017.
- [2] J. Y. C. Chanathaworn, «Upgrading of Bio-oil from Energy Crops via Fast Pyrolysis using Nanocatalyst in a Bubbling Fluidized Bed Reactor,» *International Energy Journal*, vol. 22, n° 1, pp. 71-80, 2022.
- [3] B. V.-L. J. M.-P. J. Gavio, «Trash in paradise: marine debris on the beaches of San Andres Island, Seaflower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean | Basura en el paraíso: desechos marinos en las playas de la isla de San Andrés, Reserva de Biosfera Seaflower, Caribe colombiano,» *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, vol. 51, n° 1, pp. 37-52, 2022.
- [4] L. C. F.-X. G. J. Brown, «Pyrolysis of fibre residues with plastic contamination from a paper recycling mill: Energy recoveries,» *Energy Conversion and Management*, Vols. %1 de %2110-117, p. 2017, 133.
- [5] A. J. N. C. A. ... D. A. A.-S. S. Antelava, «Energy Potential of Plastic Waste Valorization: A Short Comparative Assessment of Pyrolysis versus Gasification,» *Energy and Fuels*, vol. 35, n° 3558-3571, p. 5, 2021.
- [6] A. A. A. S. H... A. A. A.-W. M. Elnour, «Effect of pyrolysis temperature on biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites,» *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, n° 6, p. 1149, 2019.
- [7] «European International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2012,» de Proceedings of the International Euro Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Europe, 2012.
- [8] L. A. Monteros V., *Diseño y construcción de un horno mufla para la realización de tratamientos térmicos en aceros*, Ibarra, Ecuador: 2015, Universidad Técnica del Norte.
- [9] O. D. S.-N. Z. T.-S. S. Q. X. L. J. Yuanhua Qiao, «Pyrolysis Kinetic Study and Reaction Mechanism of Epoxy Glass Fiber Reinforced Plastic by Thermogravimetric Analyzer (TG) and TG-FTIR (Fourier-Transform Infrared) Techniques,» *Polymers*, vol. 12, n° 11, pp. 1-16, 2020.
- [10] S. A. P. A. I. M. T. N. J. E. Myriam Mancheno, «Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis,» *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 23, n° 1, pp. 60-67, 2016.
- [11] R. H. B. D. Y. L. W. M. J. Zhou, «Thermal decomposition mechanism and kinetic study of plastic waste chlorinated polyvinyl chloride,» *Polymers*, vol. 11, n° 12, p. 2080, 2019.
- [12] F. R. G. Richter, «A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale,» *Combustion and Flame*, vol. 216, pp. 316-325, 2020.
- [13] S. G. P. V. L. Papuga, «Temperature and time influence on the waste plastics pyrolysis in the fixed bed reactor,» *Thermal Science*, vol. 20, n° 2, pp. 731-741, 2016.
- [14] C. M. O. C. L. C. J. M. A. Díez, «Pyrolysis of tyres. Influence of the final temperature of the process on emissions and the calorific value of the products recovered,» *Waste Management*, vol. 24, n° 5, pp. 463-469, 2004.
- [15] M. P. G. A. F. ... O. A. C. J. Cen-Puc, «A dedicated electric oven for characterization of thermoresistive polymer nanocomposites,» *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 14, n° 4, pp. 268-277, 2016.
- [16] H. Aguirre Corrales y C. A. Orozco Hincapié, «ESTUDIO DINÁMICO DE UN HORNO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS CONVERTIDO A GAS,» *Scientia Et Technica*, vol. 15, n° 42, pp. 339-344, 2009.