

# Simulación de un sistema de control de temperatura en un reactor de pirólisis de residuos plásticos urbanos\*

Simulation of a Temperature Control System in a Pyrolysis Reactor of Municipal Plastic Waste

Recibido: 12 de junio de 2017 - Aceptado: 20 de octubre de 2017

Para citar este artículo C. Basto, M. Correa, R. Escobar « Método para el aprendizaje del vocabulario inglés en estudiantes de ingeniería de sistemas de la universidad de la Amazonia », *Ingenium*, vol18, n.º 36, pp. 110 -127, junio de 2017



Oscar Bellón Hernández \*\*  
Edilberto Tovar Quiroz \*\*\*  
Efrén Muñoz Prieto\*\*\*\*

## Resumen

Este artículo describe un procedimiento realizado para simular una estrategia de control de temperatura en un reactor pirolítico, que contiene residuos plásticos urbanos de poliestireno. La obtención del modelo dinámico del proceso se hizo aplicando procesamiento de los datos suministrados, en las curvas de respuesta (termogramas), de los análisis termogravimétricos de muestras de poliestireno (EPS). El modelo de degradación térmica obtenido en forma de ecuación diferencial no lineal y un modelo dinámico de transferencia térmica en un reactor convencional, fueron los insumos para elaborar una simulación, a partir de la cual se examinó un controlador PID, en tiempo discreto. Durante la simulación se evaluó la potencia térmica aplicada, por unidad de

- 1 Escuela de Ciencias Tecnológicas, Facultad de Estudios a Distancia, UPTC. Grupo de investigación TICA, Facultad de Ciencias, UPTC. Grupo de investigación DANUM
- 2 M.Sc. en Ingeniería de Control Industrial, Universidad de Ibagué. Docente, Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia - UPTC - Sede Tunja. E-mail: oscar.bellon.h@gmail.com
- 3 Ingeniero Mecánico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente, Universidad Santo Tomás – Tunja. E-mail: edilberto.tovar@uptc.edu.co
- 4 Ph.D. Physical Chemistry Of Polymers, Lviv State University. Lic Química y Biología y Docente, Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia - UPTC - Sede Tunja E-mail: efren17@gmail.com

masa de material degradado, para separar compuestos orgánicos volátiles y líquidos, que se empezaban a diferenciar en ciertos valores específicos de temperatura. Dichos productos que pueden sustituir combustibles fósiles y otros, son materias primas de alto valor en procesos industriales.

### Palabras clave

Pirólisis de polímeros, análisis termogravimétrico, modelo dinámico, control de temperatura.

### Abstract

This paper describes a procedure to simulate a temperature control strategy in a pyrolytic reactor that contains municipal plastic waste (MPW) made of polystyrene. Obtaining of the process dynamic model was conducted applying data processing from response curves of thermogravimetric analysis (Thermograms) on polystyrene samples. The thermal degradation model obtained in the form of nonlinear differential equation and the dynamic model of heat transfer in a conventional reactor were the inputs to elaborate a simulation from which to examine a PID controller in discrete time. During simulation, thermal power applied per unit of down-blending material mass, was evaluated to separate volatile and liquid organic compounds that started to differentiate on certain specific values of temperature. Such products can substitute fossil fuels and other ones are valued commodities in industrial processes.

### Keywords

Polymer pyrolysis, thermogravimetric analysis, dynamic model, temperature control.

## 1. Introducción

El EPS constituye un alto porcentaje de los residuos plásticos urbanos, que terminan en los rellenos sanitarios [1]. Como muchos de los polímeros artificiales derivados del petróleo, no es biodegradable, aunque es químicamente inerte. Tiene múltiples aplicaciones, desde los recipientes desechables para alimentos, hasta en los materiales para proteger elementos dentro de empaques, pasando por placas para aislamiento térmico, entre otros usos [2]–[4]. Sin embargo, el EPS es considerado un contaminante nocivo por su composición basada en benceno y estireno [5]–[8].

El reciclaje de EPS es difícil a gran escala y no resulta rentable reconformar desechos de este material para otros usos [6]. En este orden de ideas, el potencial que se reconoce actualmente para los desechos de EPS, está en la posibilidad de obtener derivados a partir de distintos procesos: mecánicos, químicos, térmicos e incluso biológicos. Los procesos termoquímicos (pirólisis y gasificación) son una alternativa ampliamente estudiada dentro de la comunidad científica para el aprovechamiento de los residuos plásticos urbanos (MPW por sus siglas en inglés) [6]–[9].

La pirólisis de polímeros es el proceso de descomposición termoquímica que ocurre en ausencia de oxígeno a los materiales orgánicos plásticos, cuando se someten a un aumento gradual de temperatura [10]. Al aumentar la energía interna del material, los enlaces moleculares se rompen y las cadenas orgánicas se descomponen en hidrocarburos de menor peso molecular. Muchos de estos subproductos tienen un potencial comercial que puede ser aprovechado.

En dependencia de la temperatura y de la velocidad de calentamiento, así como de la incorporación de catalíticos, en la pirólisis de polímeros (naturales y artificiales) los productos pueden ser: gases y líquidos combustibles, monómeros, gases hidrocarburos de bajo peso molecular, gases inorgánicos simples, entre otros [11]–[15].

El proceso de pirólisis de polímeros es de tipo estocástico, probabilístico y difícil de modelar matemáticamente [16]–[21]. Esta complejidad intrínseca es una dificultad para realizar procesos de simulación y posterior estudio de técnicas de control. Sin embargo, es un hecho que la variable principal del proceso es la temperatura. La descomposición termoquímica de sustancias poliméricas y la generación de productos ocurre cuando se alcanzan valores específicos de temperatura. Por ejemplo, las reacciones de escisión forman sustancias de bajo peso molecular y gases que en los polímeros tienen lugar por debajo de los  $500^{\circ}\text{C}$ , mientras que por encima de los  $600^{\circ}\text{C}$  y hasta los  $1000^{\circ}\text{C}$ , ocurren reacciones de condensación para formar polímeros de carbono [22]. Los cambios de fase, de sólido a líquido y a gas, están definidos por valores numéricos que son descritos como temperaturas de fusión, volatilización o ebullición y licuefacción. Por tanto, es razonable considerar el control de temperatura como la etapa inicial para realizar una valoración energética de los productos de la pirólisis de residuos plásticos.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la aplicabilidad de un controlador PID en tiempo discreto, utilizando el modelo dinámico que se propone en [23], adoptando los parámetros de residuos de EPS como materia prima. Mediante un procedimiento sistemático, es posible obtener una relación numérica para describir el comportamiento de la volatilización del material y utilizar el modelo como base para la simulación del proceso ante cualquier variación de la temperatura. Este procedimiento recurre al procesamiento de los datos suministrados por una termogravimetría, sobre una muestra de un polímero determinado, con respuesta de descomposición térmica de un solo paso.

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica para estudiar el comportamiento de la masa de una muestra de material, sometiéndola a un programa de temperatura. La variante que se puede utilizar, como una forma de ajustar un modelo dinámico para la pirólisis de polímeros, es la termogravimetría con atmósfera ausente de oxígeno, con velocidad de calentamiento constante. En un reactor de pirólisis, la temperatura no es lineal y los parámetros del proceso no son estrictamente constantes, pero que con el modelo propuesto en [23], es posible hacer una evaluación del comportamiento de la degradación térmica, ante velocidades de calentamiento variables.

En este documento, se hace una exposición breve del modelo dinámico utilizado para realizar la simulación. Utilizando el programa Matlab®, se construyó la simulación que tomó las características intrínsecas del EPS y los parámetros de un reactor de pirólisis,

que se basaron en propiedades intrínsecas de materiales, de los que es habitual construir estos reactores. Se expone el procedimiento de diseño del controlador en tiempo discreto y finalmente, se muestran los resultados del comportamiento del sistema al seguir un programa de temperatura predeterminado, como señal de consigna. Para el sistema de control, se tomó como variable controlada a la potencia térmica (entrada), aplicada por una fuente de flujo calórico, independientemente de su naturaleza y como variable a controlar se tomó la temperatura (salida).

Las fuentes consultadas muestran que la pirólisis de polímeros naturales o artificiales, no ha sido estudiada haciendo un registro en línea de las variables del proceso. En la mayoría de la literatura relacionada, se reporta el porcentaje final de productos, a partir de la composición de la materia prima y tras someterla a un proceso térmico que puede ser rápido o lento. No se cuenta con datos que muestren en cada instante, el estado del proceso, el porcentaje de especies químicas ni la relación cuantitativa con las variables de estado. La comunidad especializada en control de procesos industriales y/o químicos, no ha reportado el uso de técnicas de control clásico ni avanzado aplicado a la optimización y mejoramiento de la pirólisis de residuos plásticos urbanos. Es necesario, por ende, realizar proyectos para valorar el potencial comercial, energético y ecológico de esta tecnología y de la tecnificación e instrumentación, como herramientas para concretar dicho potencial.

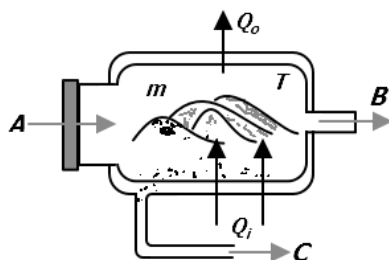
Este trabajo es una de las etapas que pretenden profundizar en la aplicación de la ingeniería de control, para la optimización del proceso de pirólisis de residuos plásticos urbanos.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Principio de operación de la pirólisis

La degradación térmica de un polímero en ausencia de oxígeno se lleva a cabo en un reactor de pirólisis. Este es un contenedor hermético, en cuyo interior se deposita la materia prima (residuos plásticos), hecho de un material resistente al calor, que puede ser metálico o refractario. Una fuente de flujo calórico transfiere energía térmica al interior, elevando la temperatura del material. Parte del calor introducido se pierde a través de las paredes del reactor, debido a la diferencia de temperaturas entre el interior ( $T$ ) y el exterior ( $T_{ext}$ ) y a la conductividad térmica del material del reactor.

Figura 1. Esquema global de funcionamiento de un reactor de pirólisis de residuos plásticos.



Fuente: elaboración propia 2017

En la figura 1, la materia prima en estado sólido o líquido tiene una masa instantánea  $m$  que al calentarse, aumenta su temperatura  $T$ , hasta que acumula la energía de activación necesaria para descomponerse y volatilizarse, convirtiéndose gradualmente en gases hidrocarburos con menor peso molecular que el polímero original. La fuente de flujo calórico aporta el calor de entrada  $Q_i$  con una velocidad determinada por la potencia térmica  $P$ . Aunque la pared del reactor puede estar compuesta de materiales diversos y tener una geometría no uniforme, en conjunto, ofrecen una conductividad térmica  $\rho$ , un área de contacto promedio  $A_r$  y un grosor  $L$  que pueden representar con buena aproximación, la dinámica de la transferencia térmica.

El material que se somete a degradación térmica es introducido en la compuerta  $A$ , que luego se cierra herméticamente. Los gases producto del proceso, se extraen a través del ducto  $B$ , para seguir procesos posteriores de condensación, purificación o recolección para análisis químicos. El ducto  $C$ , permite desalojar los residuos carbonosos o «char» que no se volatilizan. Estos ductos tienen mecanismos para mantener el hermetismo del proceso, ya sea mediante válvulas, sellos o tapas. En cualquier caso, el proceso se hace por lotes. Es decir, no se introduce ni se extrae masa, hasta que termina la degradación térmica.

El proceso de pirólisis de residuos plásticos urbanos fue simulado a partir del modelo dinámico propuesto en la ponencia de Bellón y Muñoz [23], que consiste en 2 ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p m_0} P - \frac{\rho A_r}{L} (T - T_{ext}) \\ \frac{dm}{dt} = -A(m - m_f) e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T - T_{iflx}}{\sigma} \right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

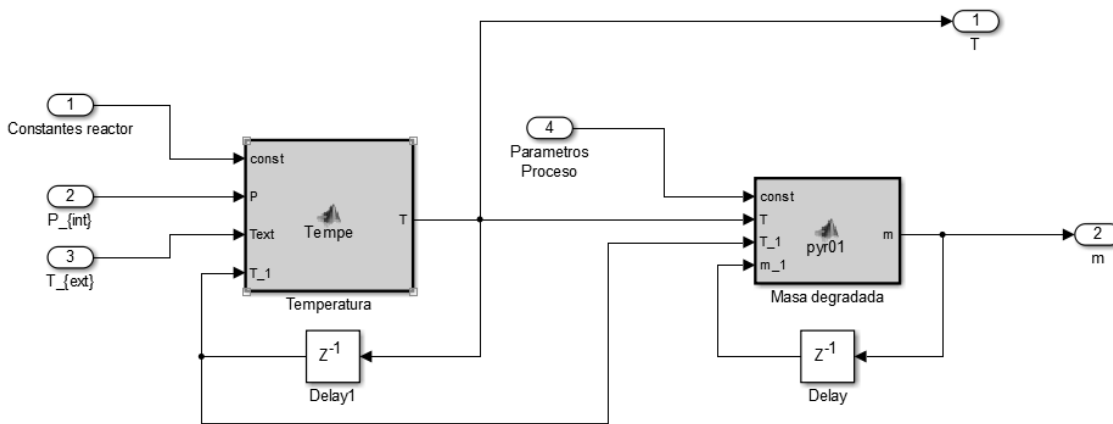
La primera ecuación del modelo, expresa la velocidad de calentamiento al interior del reactor, como función de la potencia térmica aplicada y del calor que escapa a través de la cubierta (primero y segundo términos de la derecha en la primera ecuación del modelo expuesto en las ecuaciones (1)). La masa inicial de materia prima presente en el reactor  $m_0$  antes de comenzar a aplicar la potencia calorífica, también es un factor determinante en la velocidad de calentamiento.

La segunda ecuación de (1), expresa la velocidad con que la masa se volatiliza. Los parámetros:  $A$ ,  $T_{iflx}$  y  $\sigma$ , se obtienen a partir de los datos de un análisis termogravimétrico del polímero que constituye la materia prima.

## 2.2. Simulación de la Degradación Térmica

La simulación del proceso de pirólisis se realizó utilizando la herramienta Simulink de Matlab®, utilizando 2 etapas de acuerdo con el modelo dinámico de las ecuaciones (1). La primera, representó la transferencia térmica en el reactor y la segunda, la razón de cambio de la masa residual respecto al tiempo (ver Figura 2).

Figura 2. Diagrama de bloques en Simulink de Matlab® para representar el proceso de pirólisis dentro del reactor pirolítico.



Fuente: elaboración propia 2017

En el bloque «Tempe» de la figura 2, el código interno implementa discretización de la primera ecuación diferencial de (1), con el método de Euler. El bloque «pyr01» aplica la discretización de la segunda ecuación de (1), con el método de Runge-Kutta, de grado 4 (RK4). Estos bloques constituyen un subsistema cuyas entradas son: las constantes del reactor ( $A_r, L, \rho A_r, L, \rho$ ); las propiedades de la materia prima ( $m_0, c_e m_0, c_e$ ); la potencia térmica aplicada por la fuente de flujo calórico ( $PP$ ); y, la temperatura exterior ( $T_{ext}$ ). Como variables de salida se tienen: la temperatura al interior del reactor ( $TT$ ) y el porcentaje de masa residual ( $mm$ ) respecto a la masa inicial.

### 2.3. Diseño del Controlador

Se seleccionó un controlador en tiempo discreto que incorporara un control PID. La salida del controlador es la potencia térmica aplicada al reactor, que se regula de acuerdo al tipo de fuente de flujo calórico. La temperatura ambiente externa al reactor ( $T_{ext}$ ) puede considerarse como una perturbación medible, pues es una variable cuyo cambio no puede manipularse.

En primer lugar, se definió la respuesta del controlador cuando el error es nulo, que se toma a partir de la primera ecuación de (1) en estado estable, es decir, cuando  $\frac{dT}{dt} = 0$  y  $\frac{dT}{dt} = 0$ :

$$\frac{\rho A_r}{L} (T - T_{ext}) = \frac{1}{m_0 c_e} P \quad (2)$$

$$P = \frac{\rho A_r m_0 c_e}{L} (T_{sp} - T_{ext}) \quad (3)$$

La ecuación (3) determina la potencia de salida para una temperatura de consigna  $T_{sp}$ , que, ante un sistema con calibración ideal cumple la condición:  $T_{sp} = TT_{sp} = T$ . En tal caso, la salida en lazo abierto se estabilizará al valor determinado por la ecuación (3).

Para incorporar las acciones de control proporcional, integral y derivativo, se adicionan las respuestas  $c_p, c_i, c_d, c_p, c_i, c_d$ , con lo que la ecuación (3), conducirá a:

$$P = \frac{\rho A_r m_0 c_e}{L} (T_{sp} - T_{ext}) + c_p(i) + c_i(i) + c_d(i) \quad (4)$$

Expresión que representa la salida del controlador en tiempo discreto, aplicada por un sistema digital en instante de muestreo presente  $ii$ . La ecuación (4) es válida siempre que la temperatura ambiente  $T_{ext} T_{ext}$ , sea constante o que la velocidad con la que cambia, sea mucho menor que la temperatura al interior del reactor  $TT$ . Las acciones de control en un instante de muestreo determinado, se definieron mediante las ecuaciones (5) :

$$\begin{cases} c_p(i) = K_p e(i) \\ c_i(i) = c_i(i-1) + K_i \Delta t e(i) \\ c_d(i) = \frac{K_d}{\Delta t} [e(i) - e(i-1)] \end{cases} \quad (5)$$

Dónde:

$$e(i) = T_{sp} - T(i) \quad (6)$$

La ecuación (6) es el error entre la temperatura de consigna y el valor medido en el instante de muestreo  $ii$ . Además,

$e(i-1)e(i-1)$ : Error registrado en el instante de muestreo anterior

$\Delta t \Delta t$ : periodo de muestreo.

$c_i(i-1)c_i(i-1)$ : Acción de control integral en el instante de muestreo anterior.

$K_p, K_i, K_d K_p, K_i, K_d$ : Constantes proporcional, integral y derivativa, respectivamente.

La implementación del controlador en tiempo discreto para simulación en Simulink de Matlab®, se realizó incluyendo un bloque «Controlador», cuya salida se determinó a partir de la ecuación (4). En la figura 3 se observa el diagrama de bloques realizado en Simulink de Matlab®, para la simulación del sistema de control. Cualquier fuente de potencia térmica que introduzca calor al sistema, tendrá un rango de operación finito. El límite inferior de la variable manipulada es  $00$ , correspondiente a que la fuente de calor esté apagada o desconectada. El límite superior es el máximo valor de potencia térmica ( $P_{max} P_{max}$ ) que se puede aplicar, es decir:

$$P \in R \rightarrow 0 \leq P \leq P_{max} \quad (7)$$

La condición impuesta por la ecuación (7), se representa con el bloque de saturación «Rango de potencia» que incorpora los valores límite ya descritos.

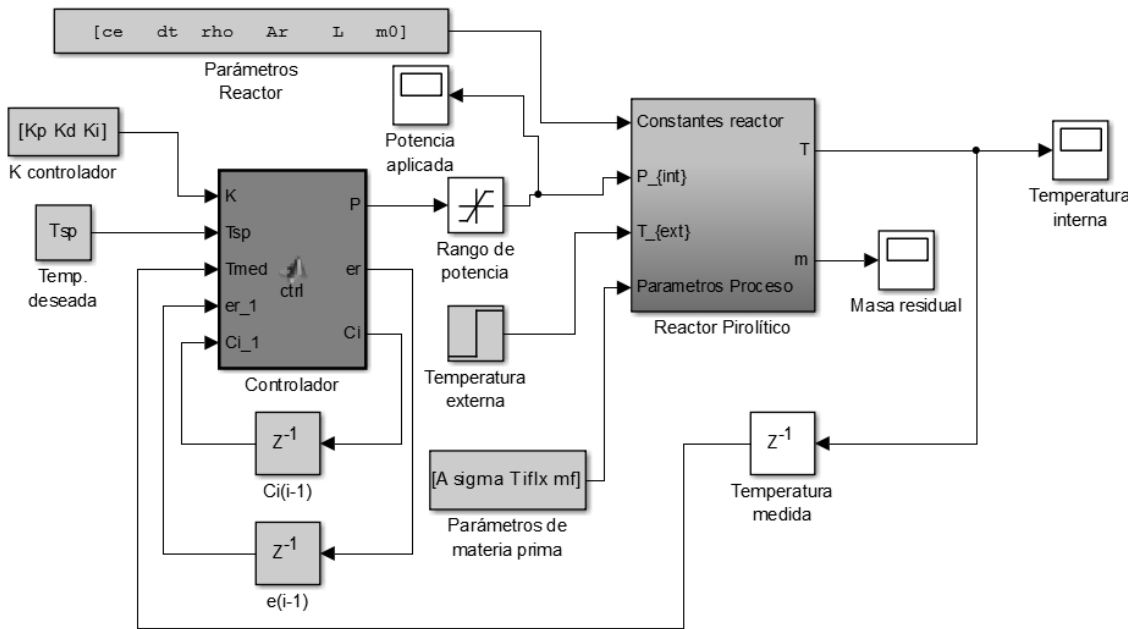
Respecto a los valores de las constantes del controlador PID, Los valores de las constantes del controlador se obtuvieron con un procedimiento heurístico de ajuste, utilizando tiempo integral  $T_I T_I$  y tiempo derivativo  $T_D T_D$ , definidos como,

$$T_I = \frac{K_p}{K_i}$$

$$T_D = \frac{K_d}{K_p}$$
(8)

En la figura 3, el bloque «reactor pirolítico» es un subsistema que contiene los elementos mostrados en la Figura 2.

Figura 3. Diagrama de bloques en Simulink® de Matlab® del sistema de control PID en tiempo discreto.



Fuente : elaboración propia 2017

## 2.4. Comportamiento de la Masa

En el proceso de pirólisis, a medida que aumenta la temperatura a partir del valor ambiente, el material plástico ganará energía interna y alcanzará el punto de fusión. En este cambio de fase, sin embargo, no hay pérdida de masa considerable. Cuando se alcance el punto de ebullición, la masa detectada por dispositivos sensores disminuirá porque la volatilización del polímero hace que se reduzca el material sólido y la masa que «desaparece» está pasando a estado gaseoso.

Por encima del punto de ebullición e incluso por encima de la temperatura a la que solo quedan residuos carbonosos, comienza la ruptura de las cadenas orgánicas. La generación de nuevas especies con peso molecular menor al polímero original, ocurre a valores de temperatura específicos, en los cuáles ocurre la ruptura de enlaces químicos.



## 2.5. Valores numéricos para simulación

Para ejecutar la simulación se elaboró el diagrama de bloques de la figura 2 y de la figura 3 en un solo archivo .slx de Simulink y a partir de las ecuaciones (1) y de la ecuación (4), que expresa la salida del controlador.

Para probar la capacidad del sistema de seguir un programa de temperatura, se configuró una señal de consigna con segmentos que representaron velocidades de calentamiento variables. Dicha señal de consigna, se puede apreciar en la figura 6 y en la figura 7, de color violeta. Se estima que tal trayectoria de temperatura favorece la producción de los gases de bajo peso molecular durante la volatilización y posteriormente, al reducirse la velocidad de calentamiento, la producción de polímeros de carbono condensados. También, se realizó una simulación con una entrada paso de temperatura de  $400^{\circ}\text{C}$  como señal de consigna, para un controlador PD y para un control PID con valor de  $K_i K_i$  límite para evitar comportamiento oscilatorio. En cada situación, se registró gráficamente el comportamiento de la masa residual. Los valores numéricos, la descripción y unidades utilizados para configurar la simulación, se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros y constantes del proceso.

| Símbolo    | Descripción   | Valor             | Unidades                              |
|------------|---|-------------------|---------------------------------------|
| $\Delta t$ | Periodo de muestreo y valor de paso fijo para configuración de la simulación en Simulink®           | 0.5               | s                                     |
| $\rho$     | Conductividad térmica de la cubierta del reactor  | 0.002783          | $\frac{1}{m \cdot s}$                 |
| $A_r$      | Área efectiva de contacto de la pared interna del reactor.  | $0.015\text{m}^2$ | $\text{m}^2$                          |
| $L$        | Grosor efectivo de la cubierta del reactor.   | 0.02              | m                                     |
| $c_e$      | Calor específico de la materia prima.   | 6.858             | $\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}\text{C}}$ |
| $m_0$      | Masa total de material al interior del reactor antes de comenzar el proceso de degradación.         | 100               | Kg                                    |
| $m_f$      | Masa final de residuos carbonosos que quedan después de la volatilización total de la materia prima | 0                 | Kg                                    |
| $A$        | Factor de frecuencia de degradación   | 0.156126          | $\text{s}^{-1}$                       |
| $\sigma$   | Dispersión media de temperatura de degradación  | 22.49459          | $^{\circ}\text{C}$                    |
| $T_{iflx}$ | Temperatura de máxima velocidad de degradación  | 447.67            | $^{\circ}\text{C}$                    |
| $K_p$      | Ganancia del control proporcional   | 5                 | $\frac{W}{^{\circ}\text{C}}$          |

| Símbolo   | Descripción                                       | Valor       | Unidades                |
|-----------|---|-------------|-------------------------|
| $K_i$     | Ganancia del control integral                     | 0 y 0.00458 | $\frac{W}{^{\circ}C s}$ |
| $K_d$     | Ganancia del controlador derivativo               | 10          | $\frac{W s}{^{\circ}C}$ |
| $P_{max}$ | Máxima potencia térmica de salida del controlador | 700         | W                       |
| $T_{ext}$ | Temperatura ambiente promedio fuera del reactor   | 20          | $^{\circ}C$             |

Fuente: elaboración propia 2017

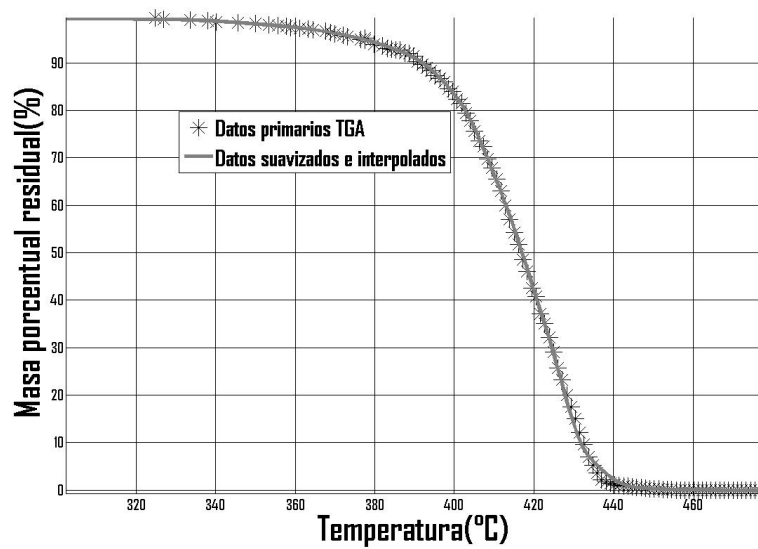
### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La termogravimetría de una muestra de poliestireno expandido se observa en la Figura 4, junto con la curva suavizada de acuerdo al procedimiento expuesto en [23]. El comportamiento de la masa registrado en el termograma ocurre en el interior de una termobalanza, con una velocidad de calentamiento constante de  $11.4 \frac{^{\circ}C}{min}$ – $11.4 \frac{^{\circ}C}{min}$ . La termobalanza es un instrumento de precisión de alto costo, con sistemas de control incorporado para garantizar un programa de temperatura con pendiente lineal. En una termobalanza ejecutando un análisis TG, se eliminan los factores que hacen de la pirólisis a nivel industrial, un proceso estocástico. En ambos procesos, hay descomposición térmica en una atmósfera sin oxígeno. Pero en la pirólisis la velocidad de calentamiento es constante, la transferencia térmica es homogénea en toda la muestra y la temperatura uniforme.

En el sistema que representa al reactor se ha puesto como señal de consigna, un programa de temperatura que varía en el tiempo. En el intervalo de tiempo de simulación de  $(0, 600s)$ – $(0, 600s)$  se ha implantado una rampa de temperatura, con velocidad de calentamiento de  $35 \frac{^{\circ}C}{min}$ – $35 \frac{^{\circ}C}{min}$ , para llegar a la temperatura de  $350^{\circ}C$ – $350^{\circ}C$ , que muestra el inicio del proceso de volatilización. En el intervalo de tiempo de  $(350s, 7200s)$ – $(350s, 7200s)$ , la velocidad de calentamiento se ralentiza para que la volatilización ocurra con menor rapidez. En total, la simulación abarca un lapso de 2 horas, con una temperatura inicial de  $20^{\circ}C$ – $20^{\circ}C$ , hasta alcanzar los  $445^{\circ}C$ – $445^{\circ}C$ , que en el termograma del poliestireno (figura 4) es la temperatura donde prácticamente se ha volatilizado todo el material plástico. Esta temperatura de referencia se visualiza como la temperatura de consigna, en la figura 5 y en la figura 7.

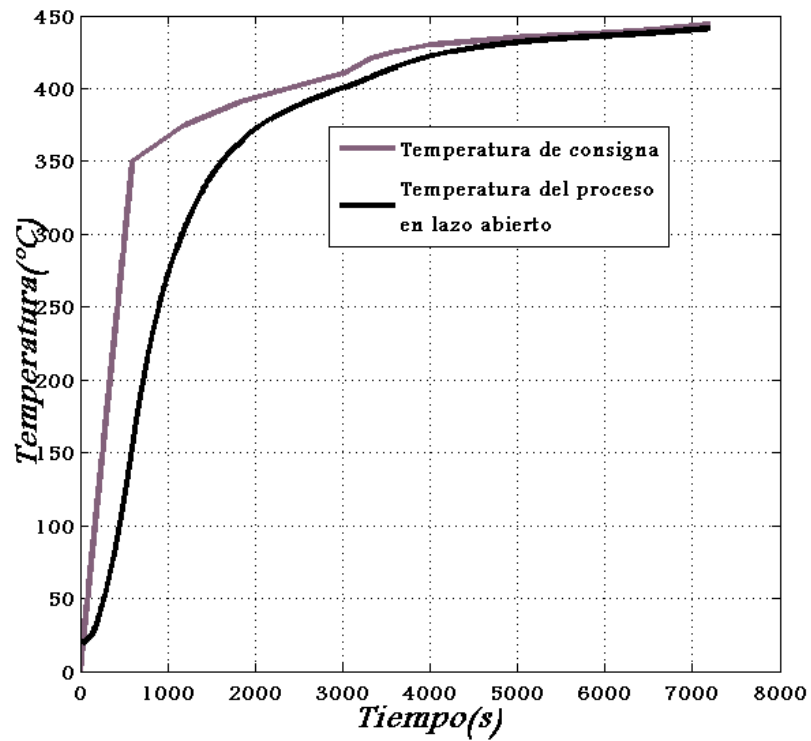
La figura 6 muestra una reducción de la masa de materia prima, conforme al programa de temperatura previamente establecido. Dicha respuesta es indicativa de la volatilización del EPS, al cambiar la temperatura por la acción de control en lazo abierto. La figura 8 corresponde a la volatilización del EPS, cuando el cambio de temperatura es producido por la acción del controlador PID.

Figura 4. Termograma de la degradación termoquímica del EPS comparado con los datos suavizados mediante interpolación polinómica de Hermite.



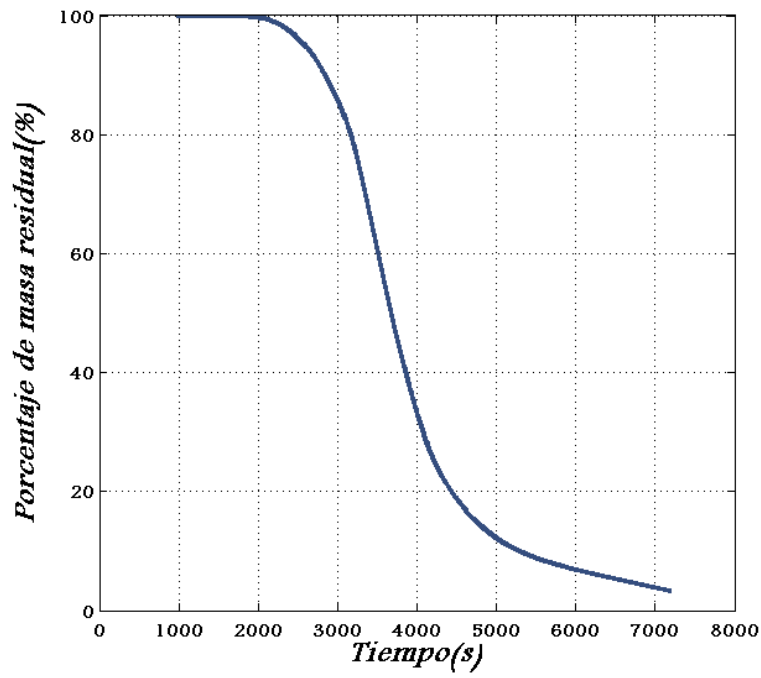
Fuente: elaboración propia 2017

Figura 5. Respuesta de la salida del proceso ante una entrada de consigna con una configuración en lazo abierto.



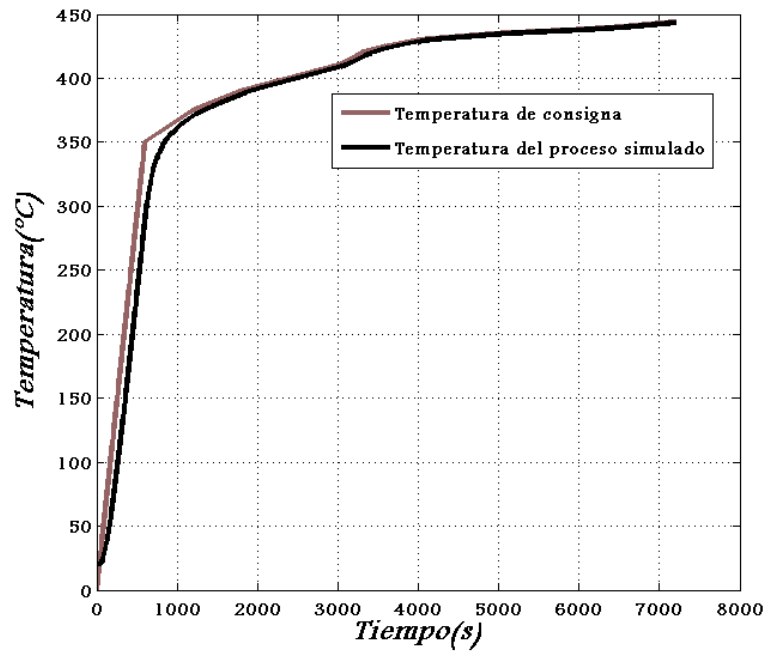
Fuente: elaboración propia 2017

Figura 6. Comportamiento de la masa residual cuando se aplica al proceso un control en lazo abierto.



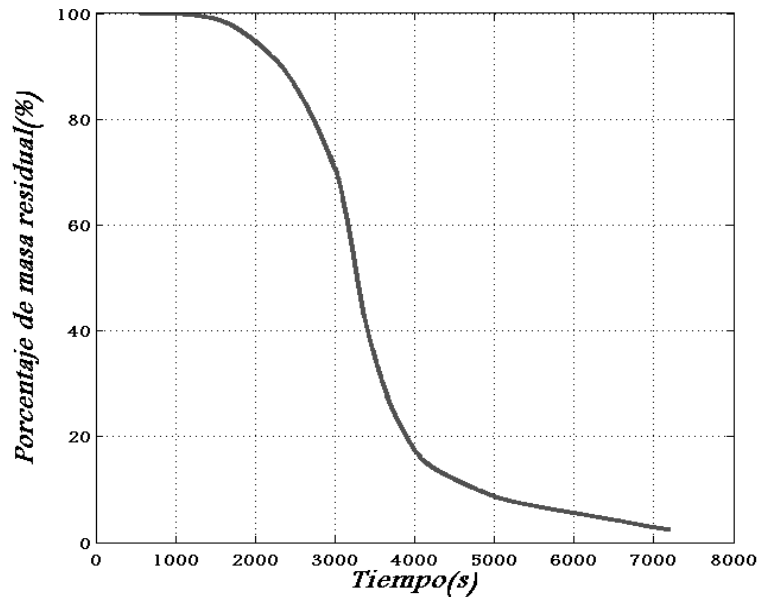
Fuente: elaboración propia 2017

Figura 7. Respuesta de la temperatura del sistema a un control de lazo cerrado.



Fuente: elaboración propia 2017

Figura 8. Relación de masa residual y tiempo



Fuente: elaboración propia 2017

La figura 7, permite comparar la señal de referencia o temperatura de consigna con la respuesta de la temperatura cuando el controlador aplica acción de control PID en tiempo discreto.

En la simulación, la muestra de poliestireno se volatiliza tanto con un control en lazo abierto, como en lazo cerrado (figura 6 y figura 8, respectivamente).

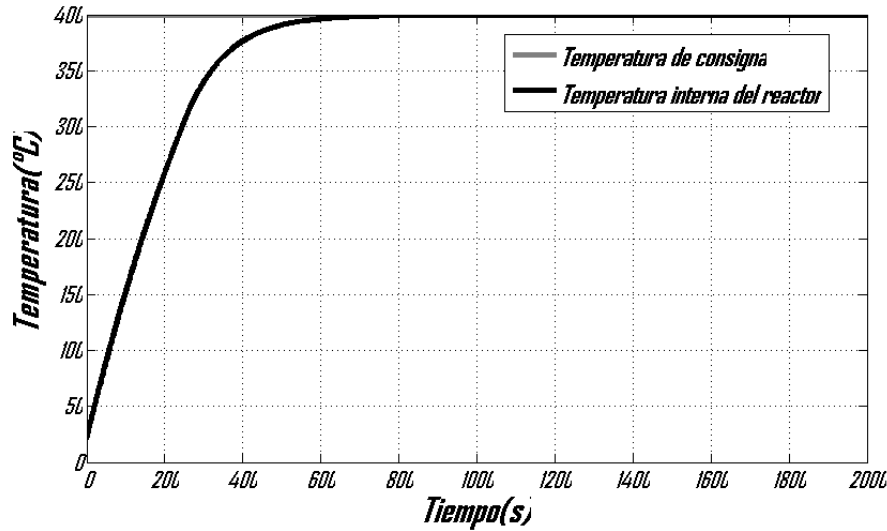
En la acción de control con lazo abierto, el error de velocidad en estado estable es de  $193.9^{\circ}\text{C}$ , mientras que en la acción en lazo cerrado con control PID en tiempo discreto, el error en estado estable es de  $61.6^{\circ}\text{C}$ .

Ante una entrada de consigna paso de  $400^{\circ}\text{C}$ , el controlador PD ( $K_i = 0$ ) presenta respuesta de primer orden, con un tiempo de establecimiento de  $419\text{s}$  (criterio del 95%) y un error en estado estable nulo (ver figura 9). La masa residual presenta una reducción considerable del  $99.9\%$  al  $86.1\%$  del valor inicial, en un tiempo de  $971\text{s}$ , pero se estabiliza en alrededor del  $86\%$ , para la temperatura de estado estable de  $400^{\circ}\text{C}$  (ver figura 10).

La respuesta del sistema, ante una entrada de consigna paso de  $400^{\circ}\text{C}$ , con la acción del controlador incorporando una constante integral de  $K_i = 0.00458$ , presentó una respuesta de segundo orden, con un sobreimpulso de  $9.53\%$ , en un tiempo de pico de  $686.5\text{s}$ . El tiempo de subida fue de  $388.5\text{s}$  (criterio de 0-100%), mientras que el tiempo de establecimiento fue de  $1648\text{s}$ . El comportamiento de la masa residual ante la respuesta del mismo controlador presenta mayores variaciones. En un primer segmento, se reduce de  $99.9\%$  a  $5.23\%$ , en

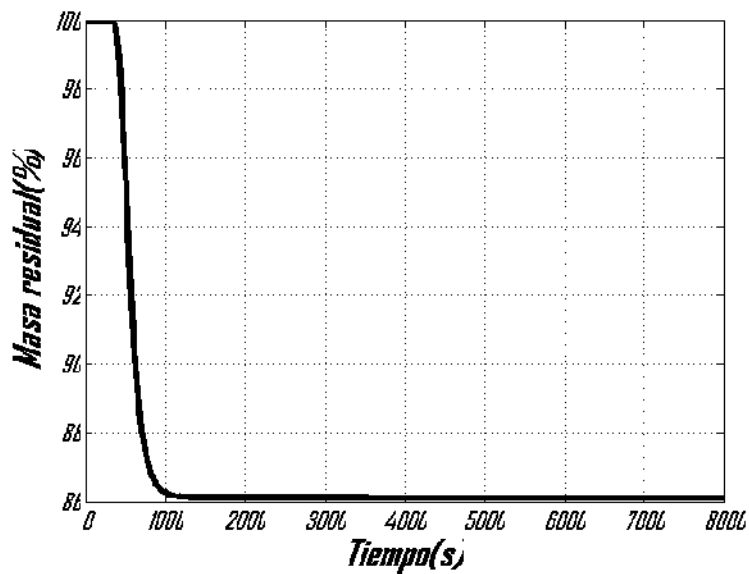
un tiempo de ~~373.5s~~373.5s, que corresponde al mínimo local. Luego, según la simulación, se condensan los gases para recuperar la masa hasta un ~~85.81%~~85.81%, en el que se estabiliza (ver figura 12).

Figura 9. Respuesta de la temperatura al interior del reactor ante una señal de consigna paso de  $400^{\circ}\text{C}$  con una constante integral de  $K_i = 0$ .



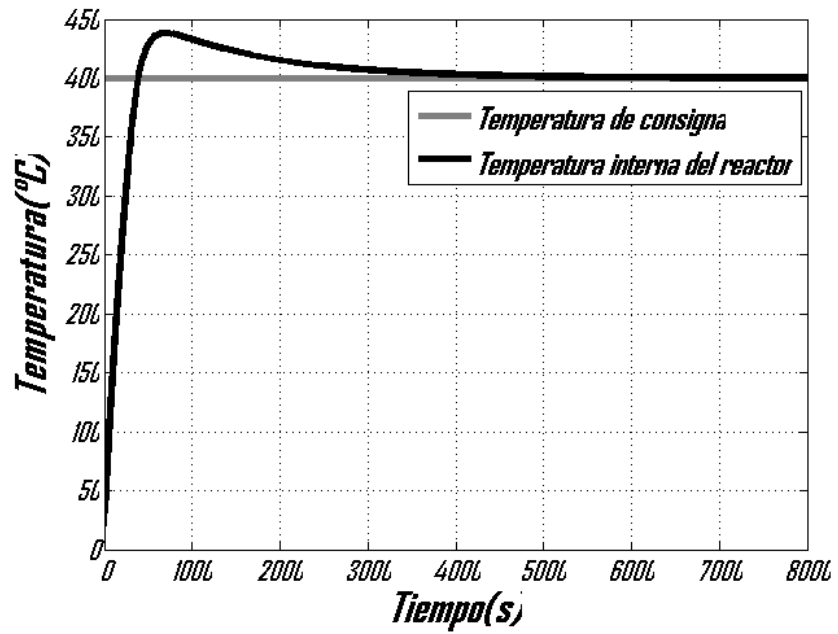
Fuente: elaboración propia 2017

Figura 10. Comportamiento de la masa residual ante una temperatura en estado



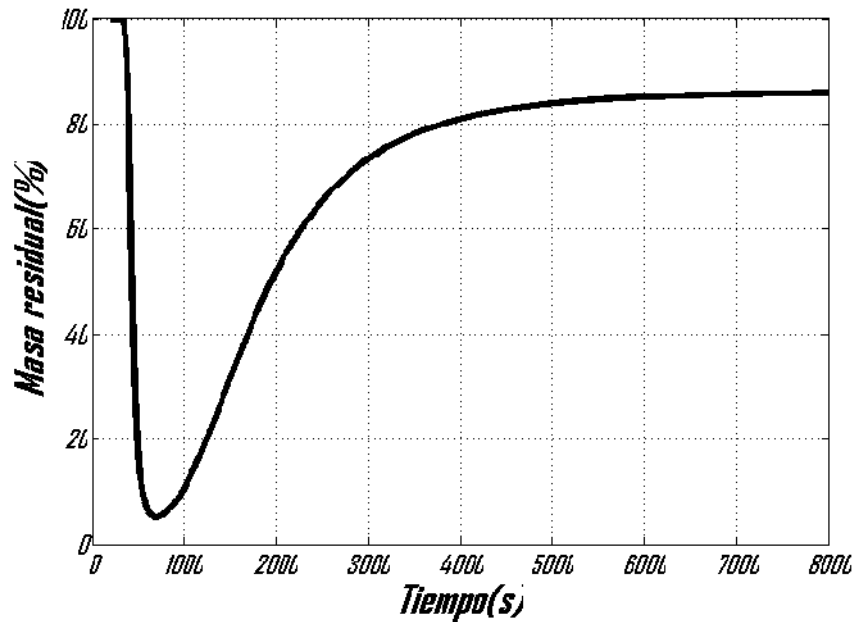
Fuente: elaboración propia 2017

Figura 11. Respuesta de la temperatura al interior del reactor ante una señal de consigna paso de  $400^{\circ}\text{C}$  con una constante integral de  $K_i = 0.00458$ .



Fuente: elaboración propia 2017

Figura 12. Comportamiento de la masa residual ante la respuesta de la temperatura del controlador con constante proporcional  $K_p = 0.00458$ .



Fuente: elaboración propia 2017

## 4. CONCLUSIONES

La simulación del controlador PID en tiempo discreto muestra que es posible regular la temperatura, de acuerdo a un programa predeterminado, que puede configurarse de acuerdo con los puntos térmicos donde se produce la descomposición química de las cadenas orgánicas, en hidrocarburos de menor peso molecular. Este es el primer paso para lograr que el proceso de pirólisis de residuos plásticos, pueda incorporar instrumentación industrial, con el fin de realizar un control riguroso, enfocado en la regulación de las condiciones de proceso que maximicen la producción de las clases químicas, con mejor perspectiva comercial. Esto último en dependencia del entorno económico y productivo.

Por ejemplo, en la figura 4, la volatilización se presenta en el intervalo de temperaturas de  $360^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$ , donde la masa se reduce hasta  $0\text{kg}$ . En ese rango, el poliestireno se descompone en el monómero estireno. Esta sustancia es materia prima para fabricar productos tales como: caucho, tuberías de agua, recubrimientos aislantes, autopartes y revestimientos, entre otros. Pero por otro lado, los productos de la pirólisis de poliestireno por encima de los  $450^{\circ}\text{C}$ , son sustancias volátiles condensables del tipo iso-parafinas y olefinas, que con la incorporación de catalizadores, alcanzan características que les permiten sustituir ciertos tipos de gasolina.

Debido a que el sistema presenta una respuesta de primer orden, el control PID clásico es suficiente para lograr una trayectoria de temperatura, como señal de consigna. El tipo de proceso que mejor se presta para aplicar el controlador utilizado es la pirólisis lenta, que por su naturaleza, no requiere cambios abruptos en la velocidad de calentamiento. Como el reactor será construido con base en un diseño que procura la hermeticidad del proceso y un aislamiento térmico de alto grado, no tendrá a lugar descensos bruscos de temperatura. La simulación muestra que como consecuencia, las constantes del controlador con mejor desempeño para el seguimiento de la trayectoria de temperatura, son la proporcional  $K_p$  y la derivativa  $K_d$ , que reducen el error en estado estable a medida que aumentan, pero teniendo en cuenta la restricción de los límites de potencia térmica que puede aplicar la fuente de flujo calórico. En cambio, la constante integral  $K_i$ , hace que el sistema sea oscilatorio cuando su valor incrementa por encima de la siguiente condición:

$$K_i = \frac{(m_0 c_p + \tau K_p)^2}{4(m_0 c_p + K_d) \tau^2} \quad (9)$$

La ecuación (9) se obtiene al considerar todo el sistema en tiempo continuo. La constante de tiempo  $\tau$  equivale a:

$$\tau = \frac{L}{\rho A_r} \quad (10)$$

Para el sistema particular tratado en este documento, el máximo valor de la constante integral con la que no se presentan oscilaciones es:  $K_i = 0.00458$ . Sin embargo, al tomar una constante integral nula para la simulación, se ha obtenido una función



de transferencia global de todo el sistema, con un polo y un cero reales en el semiplano complejo izquierdo:

$$\frac{T(s)}{T_{sp}(s)} = G(s) = \frac{\tau(K_d s + K_p)}{(m_0 c_s + K_d)\tau s + (m_0 c_s + \tau K_p)} \quad (11)$$

Otras variables del proceso también son factores a tener en cuenta y es necesario enfocar el trabajo futuro en determinar la relación dinámica de estas variables, que junto con la temperatura, pueden modificar las condiciones con las que se producen las reacciones químicas de descomposición. Por ejemplo, la presión afecta las temperaturas a las que ocurren los fenómenos de cambio de fase y es necesario realizar experimentos con el reactor a escala de laboratorio para poder determinar en concreto, su afectación en la generación de productos. Además de utilizar el vacío dentro del reactor para evitar reacciones de oxidación, (por el oxígeno), se puede modificar la presión inyectando gases inertes tales como nitrógeno.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo, reconocen y agradecen el apoyo técnico y logístico de los grupos de investigación TICA, de la Facultad de Estudios a Distancia, FESAD y del grupo DANUM de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. De igual forma, se hace un reconocimiento a la Dirección de Investigaciones DIN de la UPTC por apoyar este trabajo a través del proyecto de investigación *Control del Proceso de Pirólisis de Residuos Plásticos Urbanos no Aptos para Reciclaje Primario*, con código SGI: 2108.

## REFERENCIAS

- [1] C. M. López y J. R. L. Canepa, «Poliestireno expandido (EPS) y su problemática ambiental», *Kuxulkab'*, vol. 19, núm. 36, sep. 2014.
- [2] N. Hamidi, F. Tebyanian, R. Massoudi, y L. Whitesides, «Pyrolysis of Household Plastic Wastes», *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 3, núm. 3, p. n/a, 2013.
- [3] Adnan, J. Shah, y M. R. Jan, «Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in the presence of zinc bulk catalysts» *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2014.
- [4] C. Vasile, M. A. Brebu, T. Karayildirim, J. Yanik, y H. Darie, «Feedstock recycling from plastic and thermoset fractions of used computers (I): pyrolysis», *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 8, núm. 2, pp. 99–108, 2006.
- [5] C. Martínez, C. Aarón, C. Campos, y L. D. Rosario, «Biodegradación de poliestireno utilizando microorganismos presentes en el humus de lombriz durante los meses, Octubre – Diciembre 2016», *Univ. Lambayeque - UDL*, may 2017.
- [6] T. Maharana, Y. S. Negi, y B. Mohanty, "Review Article: Recycling of Polystyrene", *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, vol. 46, núm. 7, pp. 729–736, jul. 2007.
- [7] C. Areeprasert *et al.*, "Municipal Plastic Waste Composition Study at Transfer Station of Bangkok and Possibility of its Energy Recovery by Pyrolysis", *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 222–226, feb. 2017.
- [8] N. Patni *et al.*, "Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels, Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels", *Int. Sch. Res. Not. Int. Sch. Res. Not.*, vol. 2013, 2013, p. e902053, may 2013.
- [9] P. Shaohong *et al.*, "Controlled Pyrolysis of Waste TV Housing Plastic Added Brominated Flame Retardants", *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2011, pp. 2023–2026. 2011

- [10] J. Scheirs y W. Kaminsky, *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels*. J. Wiley & Sons, 2006.
- [11] K. Naka y S. Konishi, "Design and fabrication of pyrolyzed polymer micro and nano structures", en *2005 IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, pp. 103–108. 2005
- [12] A. Undri *et al.*, "Carbon from microwave assisted pyrolysis of waste tires", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 104, pp. 396–404, nov. 2013.
- [13] M. S. Abbas-Abadi, M. N. Haghighi, H. Yeganeh, y A. G. McDonald, "Evaluation of pyrolysis process parameters on polypropylene degradation products", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*.2015.
- [14] A. G. Gal'chenko, N. A. Khalturinskii, y A. A. Berlin, "High temperature pyrolysis of polymers", *Polym. Sci. USSR*, vol. 22, núm. 1, pp. 15–22, 1980.
- [15] N. Miskolczy y R. Nagy, "Hydrocarbons obtained by waste plastic pyrolysis: Comparative analysis of decomposition described by different kinetic models", *Fuel Process. Technol.*, vol. 104, pp. 96–104, dic. 2012.
- [16] A. Niksiar, M. Sohrabi, y A. Rahimi, "A correction on a published kinetic model for tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 104, pp. 707–709, nov. 2013.
- [17] C. Lautenberger, "A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids", *Combust. Process. Lab.*, dic. 2007.
- [18] J. Li, J. Gong, y S. I. Stoliarov, "Development of pyrolysis models for charring polymers", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 115, pp. 138–152, may 2015.
- [19] T.-A. Ngo, J. Kim, y S.-S. Kim, "Fast pyrolysis of palm kernel cake using a fluidized bed reactor: Design of experiment and characteristics of bio-oil", *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 19, núm. 1, pp. 137–143, ene. 2013.
- [20] A. Y. Snegirev, V. A. Talalov, V. V. Stepanov, y J. N. Harris, "Formal kinetics of polystyrene pyrolysis in non-oxidizing atmosphere", *Thermochim. Acta*, vol. 548, pp. 17–26, nov. 2012.
- [21] G. Boyer, "Fully coupled CFD simulation of the pyrolysis of non-charring polymers: A predictive approach", *Fire Saf. J.* 2017
- [22] B. P. Bustamante, «La degradación de los plásticos», *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 30, núm. 94, pp. 67–86, ago. 2012.
- [23] O. Bellón Hernández y E. Muñoz Prieto, «Procedimiento para Obtención de un Modelo Dinámico del Proceso de Pirólisis de Polímeros a Partir de los Datos de una Termogravimetría», en *Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automática CIIMA 2016*, Bucaramanga, Colombia, 2016.