

Estudio Cinético de la Pirólisis de Residuos Plásticos de Polipropileno Biorientado y Metalizado (Bopp)

Lidia Margarita Fuentes Paniagua, Luis Ernesto Núñez González / lenunes@uvg.edu.gt

Centro de Procesos Industriales y Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. 2022.

RESUMEN: Se presentan los resultados obtenidos al realizar el estudio de los parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de materiales de empaque de polipropileno metalizado (BOPP) generados como residuo en una industria de alimentos. Para esto se realizaron experimentos con un sistema conformado por un reactor de acero inoxidable cargado con 60 gramos de muestra, calentado dentro de una mufla y conectado a un sistema de condensación para obtención del producto líquido. Se variaron las curvas de calentamiento para alcanzar cinco diferentes temperaturas finales de operación entre 415°C y 475°C, donde se notó una tendencia de aumento del rendimiento líquido y gaseoso conforme incrementaba la temperatura, y una disminución en el rendimiento del producto sólido. Basado en los resultados experimentales se desarrolló un modelo cinético con el cambio de masa reactiva y temperatura en función del tiempo para predecir el comportamiento de la reacción. El modelo se ajustó a los datos experimentales utilizando el software Berkeley Madonna®, obteniendo el coeficiente de determinación más alto de las cinco experimentaciones evaluadas en la temperatura final de 475°C con un valor de 0.9943. Los valores promedio de los parámetros cinéticos obtenidos evaluados en el rango de 415°C a 475°C a presión atmosférica, resultaron en un factor de frecuencia de $4.2567 \times 10^{17} \text{ min}^{-1}$, energía de activación de $242.48 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ y un orden de reacción de 0.53. También se determinó una ecuación para expresar la velocidad de producción de un compuesto representativo en el producto líquido, que se basa en el modelo de reducción de masa en el reactor.

PALABRAS CLAVE: Pirólisis, polipropileno, cinética, descomposición térmica.

Kinetic Study of the Pyrolysis of Plastic Residues of Biaxially Oriented and Metallic Polypropylene (Bopp)

ABSTRACT: This paper presents the results obtained in the study of the kinetic parameters of the pyrolysis reaction of bi-axially oriented metallized polypropylene (BOPP) packaging materials, generated as a waste in food industry. Experiments were carried out with a system consisting of a stainless-steel reactor loaded with 60 grams of sample, heated inside a muffle furnace and connected to a condensation system to obtain the liquid product. The heating curves were varied to reach five different temperatures between 415 °C and 475 °C, where a trend of increasing liquid and gaseous yields was noted as the temperature increased, and a decrease in the solid product yield. According to the experimental results, a kinetic model was developed including the change in reactive mass and temperature as a function of time, to predict the behavior of the reaction. The model was adjusted to the experimental data using the Berkeley Madonna® software, obtaining the highest coefficient of determination of the five experiments at the final temperature of 475°C with a value of 0.9943. The average values of the kinetic parameters obtained in the range of 415°C to 475°C at atmospheric pressure, resulted in a frequency factor of $4.2567 \times 10^{17} \text{ min}^{-1}$, activation energy of $242.48 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ and a reaction order value of 0.53. An equation was also determined to express the rate of production of a representative compound in the liquid product.

KEY WORDS: Pyrolysis, polypropylene, kinetics, thermal decomposition.

Introducción

Actualmente, la pirólisis es un método de valorización de plásticos que ha cobrado mayor interés en la industria por los productos generados que presentan altos poderes caloríficos y compuestos hidrocarbonados de alto valor comercial (Sharuddin et al. (2016) Consiste en una reacción de degradación térmica en ausencia de oxígeno, donde las elevadas temperaturas rompen las moléculas del material, produciendo compuestos en fase líquida, sólida y gaseosa. Este proceso permite obtener productos químicos de interés, mayoritariamente hidrocarburos, que luego pueden ser utilizados en otras aplicaciones.

Conesa (1996) resume en su trabajo como numerosos estudios se han realizado para producir selectivamente altos rendimientos de productos valiosos en la pirólisis de plásticos, que incluyen experimentaciones y planteamiento de modelos. Debido a la complejidad de la reacción y de los polímeros que con este proceso se degradan, no se han podido determinar parámetros cinéticos repetitivos en un mismo material plástico, por lo tanto, los estudios cinéticos son esenciales para propiciar la predictibilidad de la reacción de cada plástico bajo condiciones específicas. La proporción en que se produce cada fase depende de diversas variables, como las condiciones del sistema, tipo de reactor, tiempo de residencia, material utilizado, entre otras. Pero tratándose de una degradación térmica, la variable esencial a estudiar es la temperatura. Altas temperaturas favorecen la ruptura de moléculas de cadena larga para dar lugar a otras más pequeñas, y así alcanzar rendimientos significativos de líquido en comparación al sólido y gas. Es así, como los estudios de cinética de este tipo de reacciones se han basado en modelos relacionados directamente con la temperatura de los sistemas para establecer las constantes de reacción.

En las reacciones de pirólisis es difícil monitorear la variación de la concentración molar de reactivo para su utilización como parámetro en el desarrollo de la cinética de reacción. Es más conveniente monitorear la masa de la muestra reactiva. Westerhout et al. (1997) utilizaron un modelo basado en la medición del cambio de masa reactiva en función del tiempo para determinar el conocido como *tripleto cinético*, conformado por la energía de activación, el factor de frecuencia y el orden de reacción. Estos parámetros permiten predecir el comportamiento de la reacción y la distribución de las fases de los productos al controlar el factor de temperatura del sistema. Según Moldoveanu (2005) para la pirólisis de polipropileno a 350°C el valor de la energía de activación es de 59,000 calmol⁻¹ y 5.75x10¹⁵ s⁻¹ el factor de frecuencia. Gao et al. (2002) determinaron que no se puede aplicar un modelo de primer orden a la pirólisis de propileno y determinaron un orden de reacción promedio 0.35 en un rango de temperatura de 390°C a 410°C.

Debido a la carencia de información y su amplia aplicación en la industria, en este artículo se presenta a continuación el estudio de la descomposición térmica de polipropileno biorientado (BOPP) y metalizado, con un proceso de pirólisis a escala laboratorio, para predecir el comportamiento de la reacción basado en el cambio de masa y temperatura en función del tiempo.

Análisis Cinético

Modelo de ley de potencia

Se considera una reacción simplificada en donde el reactivo (A) es el material de empaque de polipropileno biorientado (BOPP) y metalizado, del cual se produce el compuesto (B) distribuido en tres fases: gas, líquido y sólido.



Para reacciones de orden n la velocidad de reacción se expresa con la ecuación 2, en donde n corresponde al orden de reacción. (Moldoveanu, 2005)

$$-\frac{d(A)}{dt} = k(A)^n \quad (2)$$

En las reacciones de pirólisis es difícil monitorear la variación de la concentración molar de un reactivo para su utilización como parámetro en el desarrollo de la cinética de reacción, es más conveniente monitorear la masa reactivo tal como plantea Moldoveanu (2005):

$$W = (A)V * M \quad (3)$$

Donde W es la masa de la muestra reactiva en un tiempo de la reacción, V es el volumen y M el peso molecular de la sustancia reactiva A (BOPP en este trabajo). Reemplazando en la ecuación 2:

$$-\frac{d(W)}{dt} = k(W)^n \quad (4)$$

En la mayoría de casos, el proceso de pirólisis deja un residuo de muestra sin descomponer (W_f) que debe incluirse, resultando en la ecuación 5:

$$-\frac{dW}{dt} = k(W - W_f)^n \quad (5)$$

El orden de reacción n no es necesariamente un valor entero y pueden aplicarse otras relaciones para relacionar parámetros distintos a la masa reactiva como la conversión o la fracción de masa residual.

Dependencia de la constante de reacción con la temperatura

Suponiendo que las reacciones químicas solo pueden suceder cuando existe una colisión entre moléculas, la velocidad de reacción depende de la diferencia de energía entre los reactivos y el complejo activado y la frecuencia de las colisiones entre moléculas.

Basado en estos supuestos puede expresarse la constante cinética de reacción k con la ecuación de Arrhenius:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Modelo para curvas de calentamiento

Modificando la ecuación 5 con la ecuación 6 se obtiene para el reactivo A:

$$-\frac{dW_A}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) (W_A - W_f)^n \quad (7)$$

Conociendo los valores del factor de frecuencia (A), energía de activación (E_a), orden de reacción (n) y la temperatura (T) se puede resolver la ecuación para obtener la pérdida de masa del reactivo en un tiempo determinado.

Pero el sistema estudiado no es isotérmico, por lo que la temperatura debe expresarse como una función en el tiempo según la ecuación 8:

$$-\frac{dW_A}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT(t)}\right) (W_A - W_f)^n \quad (8)$$

Debido al equipo de calentamiento utilizado, se utilizó la función sigmoideal tipo Boltzmann para modelar las curvas de calentamiento del sistema, tal como lo realizaron Ding et al. (2011) Obteniéndose la siguiente ecuación:

$$-\frac{dW_A}{dt} = A \exp\left[-\frac{E_a}{R^* \left(T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{1 + e^{\frac{t_{0.5} - t}{m}}}\right)}\right] (W_A - W_f)^n \quad (9)$$

El modelo de la ecuación 9 fue el desarrollado y utilizado para predecir el comportamiento de la reacción de pirólisis de polipropileno bi-orientado y metalizado de este trabajo.

Materiales y Métodos

Las muestras de polipropileno bi-orientado (BOPP) y metalizado fueron proveídas por una industria alimenticia que lo utiliza como material de empaque. Las bolsas fueron cortadas para obtener un tamaño aproximado de 1 cm por lado.

Utilizando un reactor de acero inoxidable 304 DN 50 elaborado manualmente y propiedad del departamento de ingeniería química de la Universidad del Valle, un kit de destilación VEVOR y una mufia Thermo Scientific F6030CM-33-AVL, se armó un sistema como el de la figura 1 para realizar las pruebas experimentales. Este arreglo permitía calentar el material a altas temperaturas para lograr la reacción de pirólisis y cuantificar el producto líquido condensado.

El efecto de la temperatura en este tipo de reacción es esencial. Así que para definir la temperatura que debía alcanzar el sistema, se realizó un análisis termo-gravimétrico (TGA) al material de empaque de polipropileno bi-orientado y metalizado. Según el rango determinado por la curva TGA, se definieron cinco temperaturas finales del sistema para estudiar su efecto en la cinética química. Estas corresponden a 415°C, 430°C, 450°C, 460°C y 475°C. Por otro lado, se ajustaron con la función sigmoideal de Boltzman las curvas de calentamiento ya que las rampas predefinidas por la mufia se ajustan a ese comportamiento.

En cada corrida de las cinco experimentaciones realizadas se utilizaron 60 gramos de muestra de polipropileno bi-orientado y metalizado. Se recolectó el producto líquido a la salida del sistema de condensación. Para estudiar la formación del producto líquido en el tiempo, se recolectaron las fracciones líquidas en rangos de tiempo establecidos hasta agotar la producción de líquido. Para cada muestra se realizó un análisis de su composición con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 con detector de masas, columna apolar HP-5 (60 m de largo y 0.25 mm de diámetro), temperatura de horno de 60°C por 2 min a 3°C/min a 2605°C por 5 minutos y helio como gas acarreador a 1.0 mL/min. El producto sólido fue pesado luego de enfriar el sistema.

El modelado cinético se realizó basado en el peso del producto líquido cuantificado (W_a) y utilizando la ecuación 6. Para cada una de las cinco experimentaciones se definió una curva de calentamiento $T(t)$ con la función sigmoideal de Boltzman y se utilizó W_f como el peso del producto sólido remanente en el reactor. La ecuación diferencial de primer orden fue resuelta con el software Berkeley Madonna para determinar el valor del triplete cinético: a) energía de activación (E_a), b) el factor de frecuencia (A) y c) el orden de reacción (n). También se calcularon los rendimientos porcentuales basados en la masa de los productos líquidos y sólidos obtenidos. El producto gaseoso fue determinado por diferencia ya que no fue cuantificado.

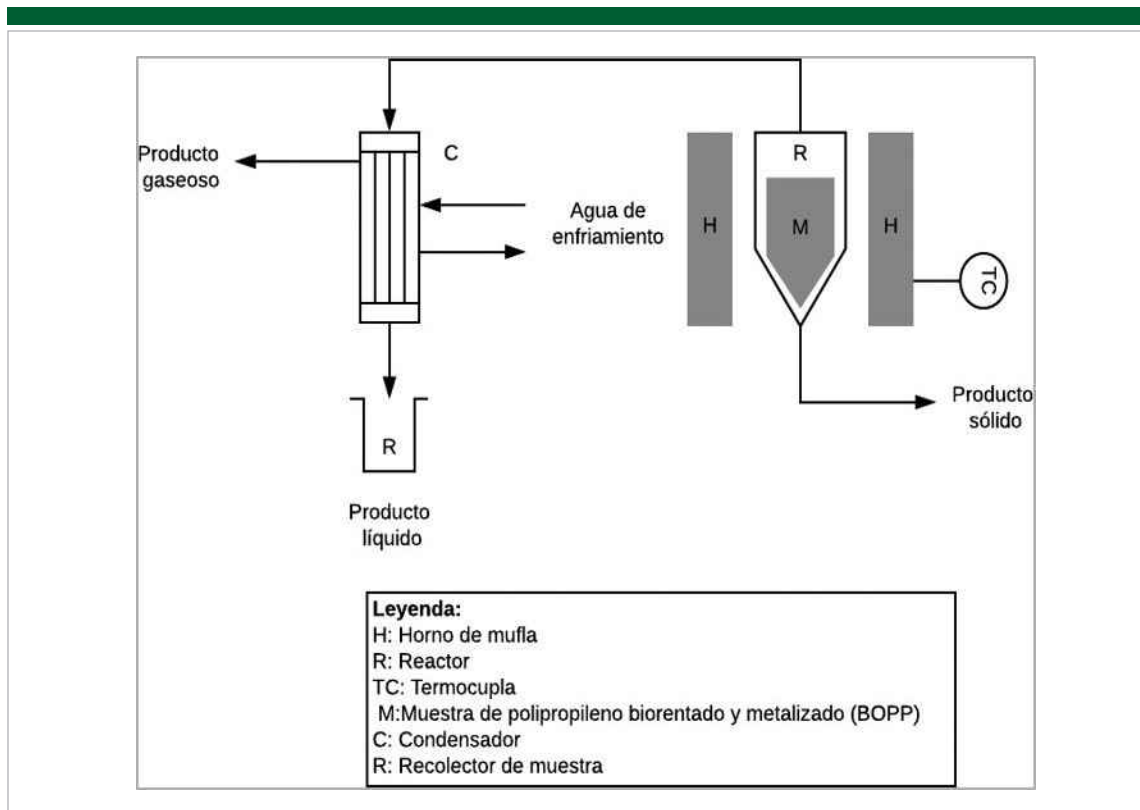


Figura 1. Esquema del sistema utilizado para pruebas experimentales.

La composición de las muestras del producto líquido fue analizada para determinar el compuesto predominante (ver cromatograma en anexos). Este resultó ser el 2,4-dimetil-1-hepteno, del cual se cuantificó la proporción presente en las muestras y así se pudo determinarse la proporcionalidad de la pérdida de masa reactiva con la producción de este compuesto. También se determinaron otros compuestos con concentración considerable, como el 2,3,7-trimetil-4-octeno, 2,3,6,7-tetrametil-4-octeno, 2,3,5-trimetil-hexano y el 2-metil-1-penteno.

Resultados y Discusión

Análisis termogravimétrico

El análisis de la figura 2 muestra la curva de análisis termogravimétrico (TGA), la cual tiene un punto de inflexión alrededor de los 454°C, que representa el punto de detectado para la degradación térmica de las muestras. Esto permitió establecer cinco temperaturas finales de estudio, que fueron

programadas en la mufla para estudiar los efectos en dichas variaciones del sistema en la pérdida de masa.

La primera experimentación se realizó a temperatura final de 415°C y la quinta experimentación a 475°C, dado el rango determinado por la curva TGA. Basado en el punto de inflexión se realizó otra experimentación con temperatura final de 450°C y las otras dos temperaturas fueron definidas como puntos intermedios entre los límites (430°C y 460°C).

Rendimiento de los productos de la reacción

Los rendimientos calculados con las masas de los diversos productos obtenidos se presentan en el cuadro 1. En las cinco condiciones evaluadas, el rendimiento del producto líquido y gaseoso incrementó conforme se aumentó la temperatura final del sistema, mientras el producto sólido disminuyó. Esto se debió a que el aumento de temperatura favorece una rápida volatilización, aumentando así la cantidad de gases que son condensables y se recolectan como líquido.

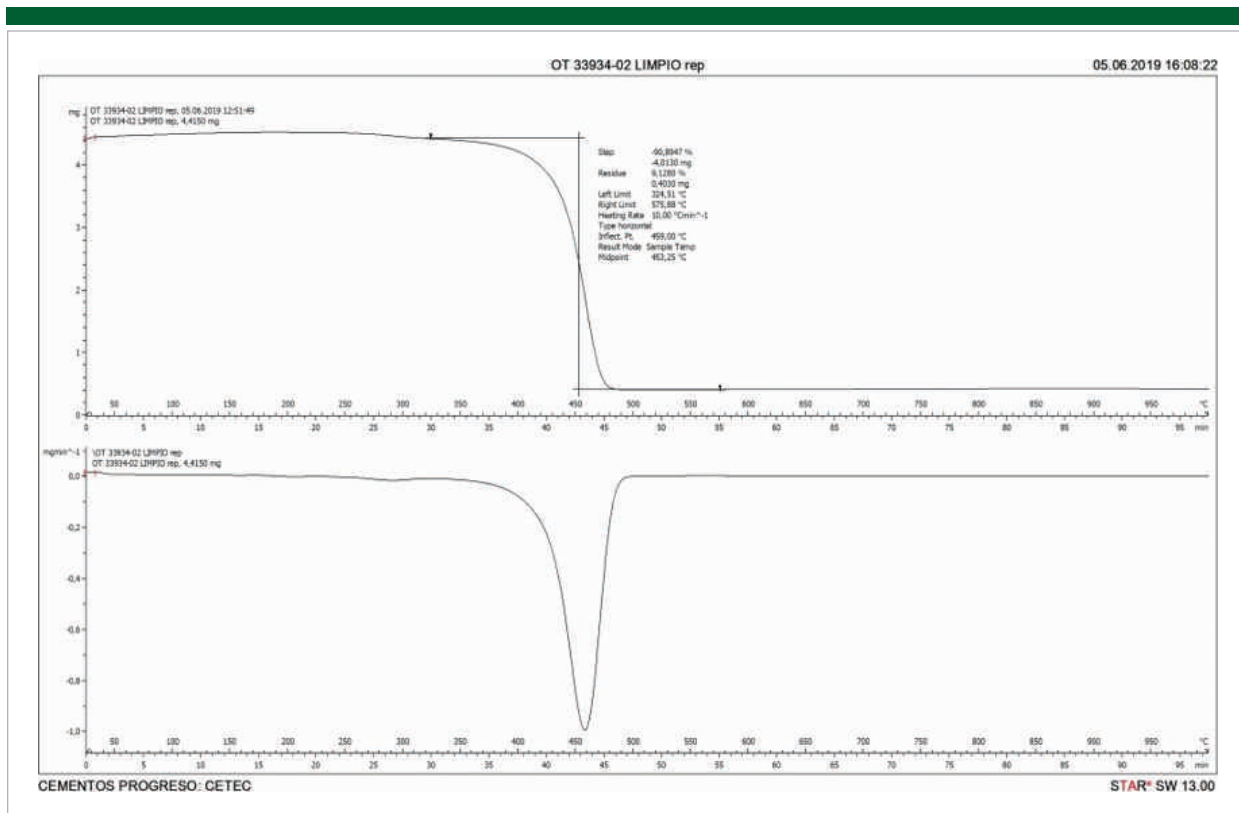


Figura 2. Análisis termo-gravimétrico de la muestra de material de empaque de polipropileno bi-orientado y metalizado (BOPP).

Cuadro 1. Rendimientos de los productos de la reacción de pirólisis a diferentes temperaturas finales.

Rendimiento de productos (g producto/g muestra) %				
No.	Temperatura final (°C)	Líquido	Sólido	Gas
1	415	82.60 ± 2.746	16.52 ± 3.343	0.88 ± 0.07
2	430	84.18 ± 3.085	15.50 ± 3.592	0.32 ± 0.07
3	450	83.00 ± 3.167	16.48 ± 3.608	0.52 ± 0.07
4	460	85.51 ± 3.309	13.77 ± 3.563	0.72 ± 0.06
5	475	87.12 ± 3.236	11.88 ± 3.531	0.98 ± 0.06

Cinética de reacción

Utilizando los datos experimentales calculados para pérdida de masa de reactivo (BOPP) conforme el tiempo, se utilizó el software Berkeley Madonna versión 9.1.19 para ajustar el modelo planteado a los datos (ver código de referencia en anexos). Según Moldoveanu (2005) para la pirólisis de polipropileno a 350°C el valor de la energía de activación

es de 246.86 kJ/mol y $5.75 \cdot 10^{15} \text{s}^{-1}$ el del factor de frecuencia, estos datos fueron utilizados como datos iniciales del modelo. Gao et. al. (2002) determinaron que no se podía aplicar un modelo de primer orden a la pirólisis de propileno y establecieron un orden de reacción promedio de 0.35 en un rango de temperatura de 390°C y 410°C. Este fue el dato utilizado como valor inicial del orden de reacción en el modelo. Ajustando estos tres parámetros (A, Ea y n) a los

Cuadro 2. Resultados de los parámetros cinéticos de Arrhenius calculados en cada temperatura final de calentamiento evaluada.

Parámetros cinéticos					
Cinética No.	Temperatura final (°C)	A (min ⁻¹)	E _a (kJ/mol)	n	R ²
1	415	1.5030 * 10 ¹⁸	248.90	0.54	0.9562
2	430	4.3972 * 10 ¹⁷	245.66	0.52	0.9673
3	450	9.4770 * 10 ¹⁶	240.56	0.55	0.9904
4	460	3.3038 * 10 ¹⁶	236.02	0.52	0.9753
5	475	5.7830 * 10 ¹⁶	241.27	0.54	0.9943
	Promedio	4.2567 * 10¹⁷	242.48	0.53	
	Desviación estándar	6.2446 * 10¹⁷	4.95	0.01	

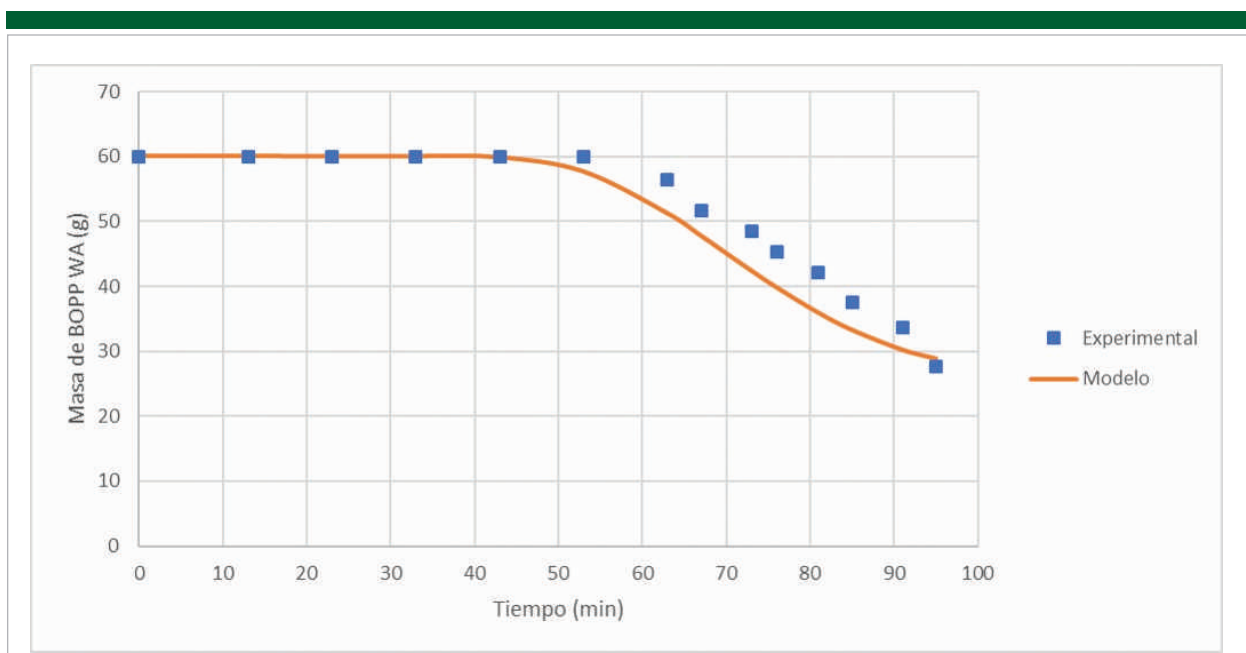


Figura 3. Variación de la masa reactiva con el tiempo para la temperatura final 415°C con coeficiente de determinación de 0.9562.

datos con en el software y el método de integración Runge Kutta 4, se obtuvieron los parámetros para la experimentación efectuada. Los datos obtenidos de la literatura para los parámetros, se encuentran en el mismo rango de magnitudes que los datos experimentales resultantes, lo que se muestra en el cuadro 2.

Se empleó el modelo de la ecuación 9 utilizando una energía de activación de 242.48kJ/mol, factor de frecuencia de $4.26 \cdot 10^{17} \text{ s}^{-1}$ y orden de reacción de 0.53, para predecir la

masa de reactivo en función del tiempo y compararlos con los datos experimentales correspondientes. Los resultados se muestran en las figuras 3 a la 7. De las cinco experimentaciones el modelo cinético de la corrida con 475°C de temperatura final de reacción, es el que presenta el mejor ajuste de las cinco condiciones evaluadas, con un coeficiente de determinación de 0.994. La predictibilidad se conserva en todos los casos con errores por encima del 0.95 de coeficiente de determinación.

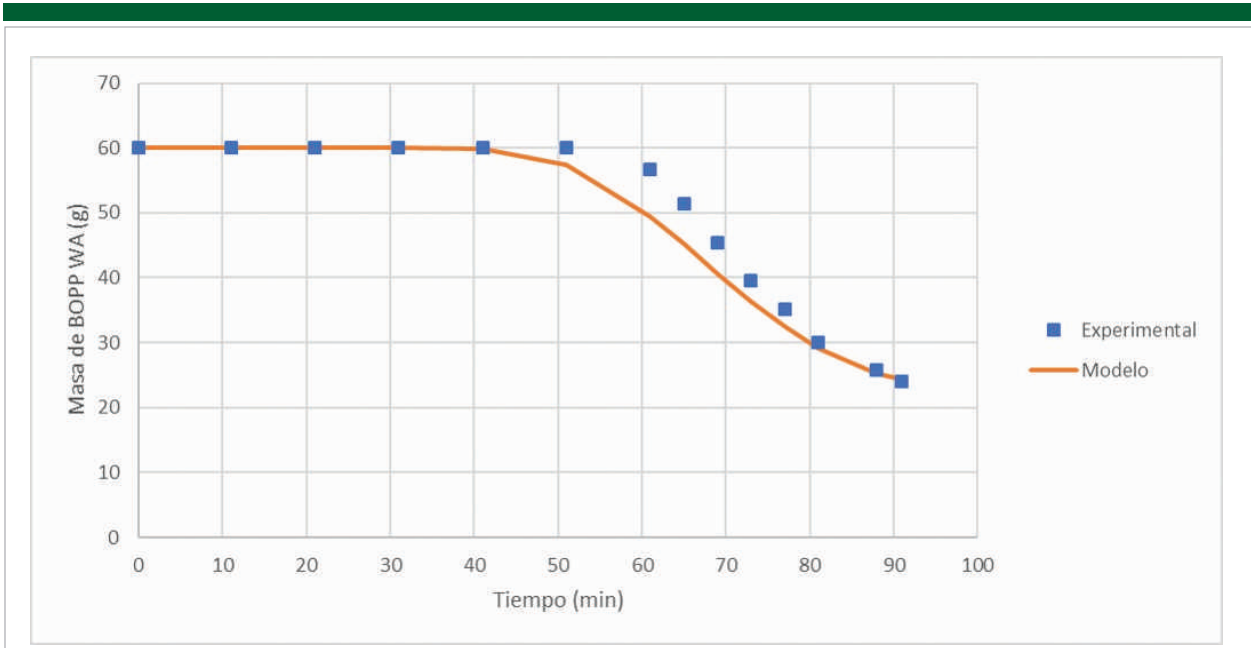


Figura 4. Variación de la masa reactiva con el tiempo para la temperatura final 430°C con coeficiente de determinación de 0.9676.

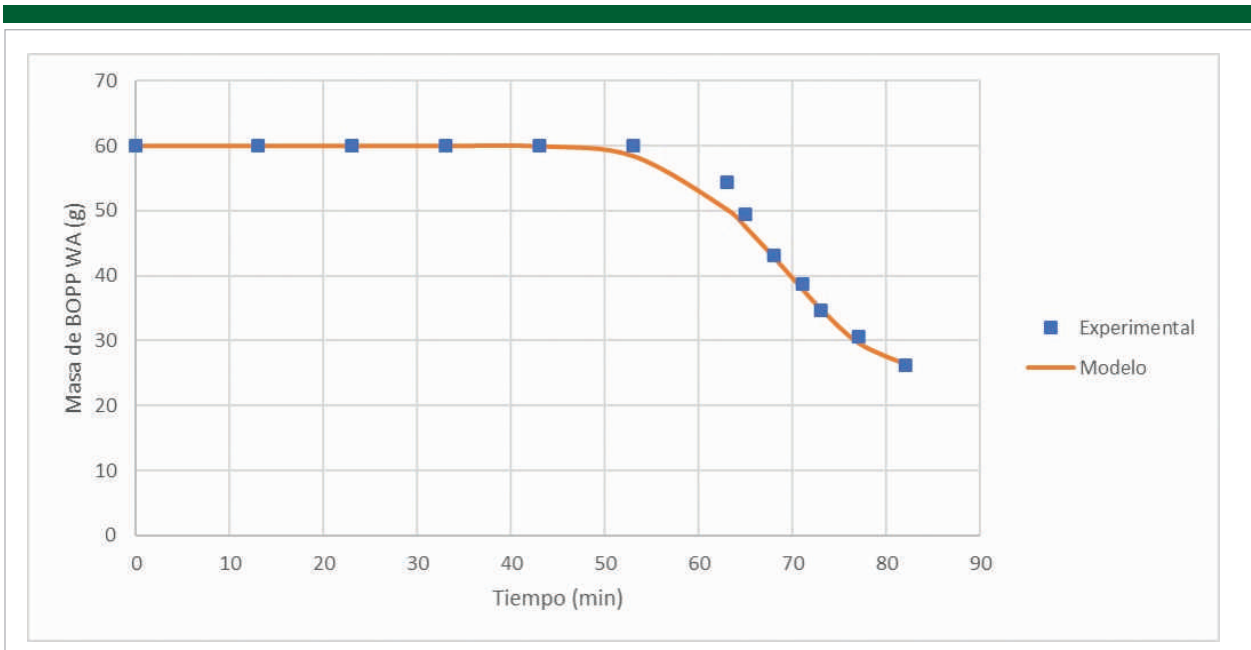


Figura 5. Variación de la masa reactiva con el tiempo para la temperatura final 450°C con coeficiente de determinación de 0.9904.

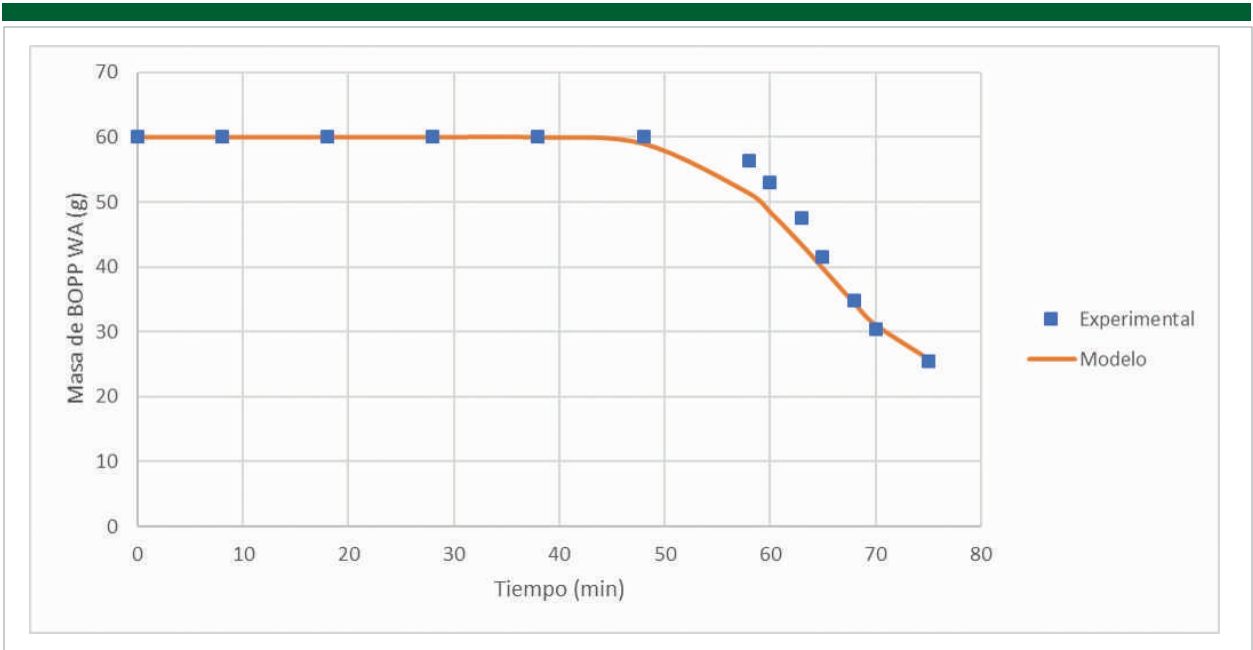


Figura 6. Variación de la masa reactiva con el tiempo para la temperatura final 460°C con coeficiente de determinación de 0.9753.

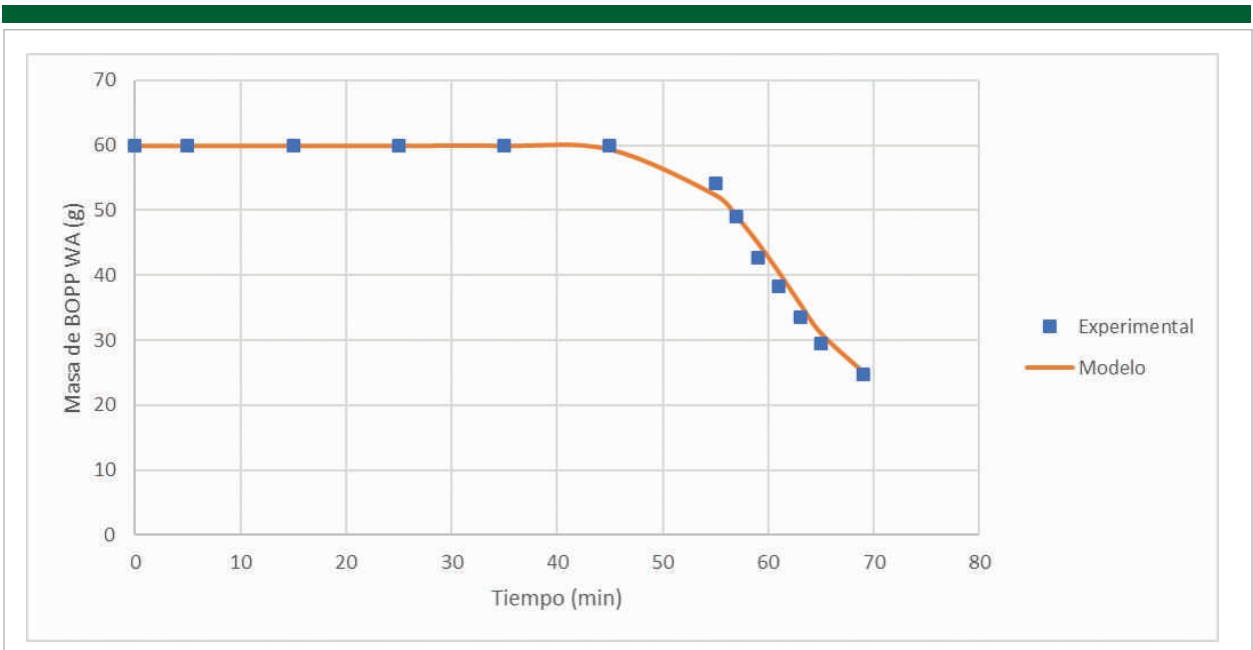


Figura 7. Variación de la masa reactiva con el tiempo para la temperatura final 475°C con coeficiente de determinación de 0.9943.

Cuadro 3. Resultados de las constantes de proporcionalidad para velocidad de producción del 2,4- dimetil-1-hepteno.

Constantes de proporcionalidad para la producción de 2,4-Dimetil-1-hepteno				
Cinética No.	Temperatura final (°C)	k (mol/g)	R ²	
1	415	0.0011	0.54	0.9562
2	430	0.0014	0.52	0.9673
3	450	0.0015	0.55	0.9904
4	460	0.0017	0.52	0.9753
5	475	0.0017	0.54	0.9943
	Promedio	0.0015		
	Desviación estándar	0.0002		

Velocidad de producción del compuesto representativo

Evaluando los compuestos, su tiempo de retención y el área que presentaban en los cromatogramas, se encontró que el 2,4-dimetil-1-hepteno era un compuesto representativo en las muestras del producto líquido debido a la estabilidad química y abundancia en todas las muestras. Por lo tanto, se determinó la ecuación de velocidad de producción según la ecuación 10:

$$\frac{dN_B}{dt} = -k \frac{dW_A}{dt} \quad (10)$$

Esta ecuación relaciona los moles del producto 2,4-Dimetil-1-hepteno (N_B) con la pérdida de masa reactiva (W_A) en función del tiempo con una constante de proporcionalidad (k). Los resultados para esta constante se presentan en el cuadro 3.

Se propuso un ajuste lineal entre los diferenciales de masa de reactivo respecto al tiempo (dW_A/dt) y los diferenciales de moles acumulados del producto respecto al tiempo (dN_B/dt). Esto basado en la tendencia observada de aumento de la concentración del compuesto con el tiempo y el balance de masa del sistema reactivo. El promedio resultó en 0.0015 mol/g con una desviación estándar de 0.0002 mol/g.

Conclusiones

- El análisis cinético de la pirólisis de material de empaque de polipropileno bi-orientado (BOPP) y metalizado, permitió estudiar el comportamiento de la reacción y su aplicación como método de tratamiento de residuos plásticos para una industria alimenticia.
- Las experimentaciones permitieron estudiar el efecto de la temperatura en la reacción, evaluando cinco condiciones diferentes entre 415°C y 475°C, rango determinado por el análisis termo-gravimétrico realizado inicialmente al material. Los rendimientos de la formación de productos presentaron una tendencia de aumento en el rendimiento del producto líquido y gaseoso, al aumentar la temperatura final del sistema. Mientras el producto sólido presentó un comportamiento opuesto, disminuyendo su rendimiento al aumentar la temperatura.
- Basado en el producto mayoritario, se propuso un modelo cinético para la pirólisis de polipropileno bi-orientado y metalizado, basado en la pérdida de masa reactiva para la formación del producto líquido. Se utilizó la ecuación de Arrhenius para expresar el efecto de la temperatura en la velocidad de reacción y una relación potencial para el efecto de la masa de la mezcla reactiva. Las diferentes curvas de calentamiento fueron modeladas con la ecuación sigmoideal de Boltzman, para ajustar los datos experimentales al modelo.

- Se realizaron cinco experimentaciones evaluando a cinco temperaturas finales del sistema entre 415°C y 475°C en un sistema no isotérmico a presión atmosférica. Ajustando los parámetros cinéticos del modelo propuesto con los datos experimentales en el software de modelado Berkeley Madonna, se obtuvieron constantes cinéticas promedio con los siguientes valores: factor de frecuencia de $4.2567 \times 10^{17} \text{ min}^{-1}$, energía de activación de 242.48 kJ/mol y orden de reacción de 0.53.
- El modelo correspondiente a la cinética evaluada a temperatura final de 475°C presentó el mejor ajuste con un coeficiente de determinación de 0.9943 para la predicción del comportamiento de la reacción en el rango de temperaturas evaluadas. Mientras el modelo a la correspondiente a la cinética evaluada a temperatura final de 415°C, presenta el ajuste más bajo con un coeficiente de determinación de 0.9562 en el rango de temperaturas evaluadas.
- El estudio cinético realizado en este trabajo puede ser de utilidad para realizar un escalamiento industrial para la pirólisis de este material de empaque. Permite la predicción del comportamiento de la reacción, productos obtenidos y condiciones necesarias, para desarrollar tecnologías que permitan el aprovechamiento de residuos plásticos y así disminuir la cantidad de los mismos que se descarta en vertederos o contamina recursos naturales.

Reconocimientos

Los autores del siguiente trabajo reconocen a los ingenieros Gamaliel Zambrano, Frances Recari y Cristián Rossi por su ayuda en las experimentaciones y asistencia técnica.

Símbolos

A = Factor de frecuencia

BOPP = Polipropileno biorientado

E_a = Energía de activación

K = Constante de la velocidad de reacción **k** = Constante de proporcionalidad **M** = Masa molecular

N_B = Moles del producto 2,4-Dimetil-1-hepteno

n = Orden de reacción

R = Constante universal de los gases ideales **R²** = Coeficiente de determinación **t** = Tiempo

V = Volumen

W_A = Pérdida de masa reactiva

Bibliografía

Conesa, J. (1996) *Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados* Tesis doctoral, Universidad de Alicante.

Ding, J., Zhang, L., Han, K. (2011) *Thermal rate constants of the pyrolysis of n-heptane* Combustion and Flame 158 (12): 2314-2324.

Gao, Z., Kaneko, T., Amasaki, I., Nakada, M. (2002) *A kinetic study of thermal degradation of polypropylene* Polymer Degradation and Stability 80: 269- 274.

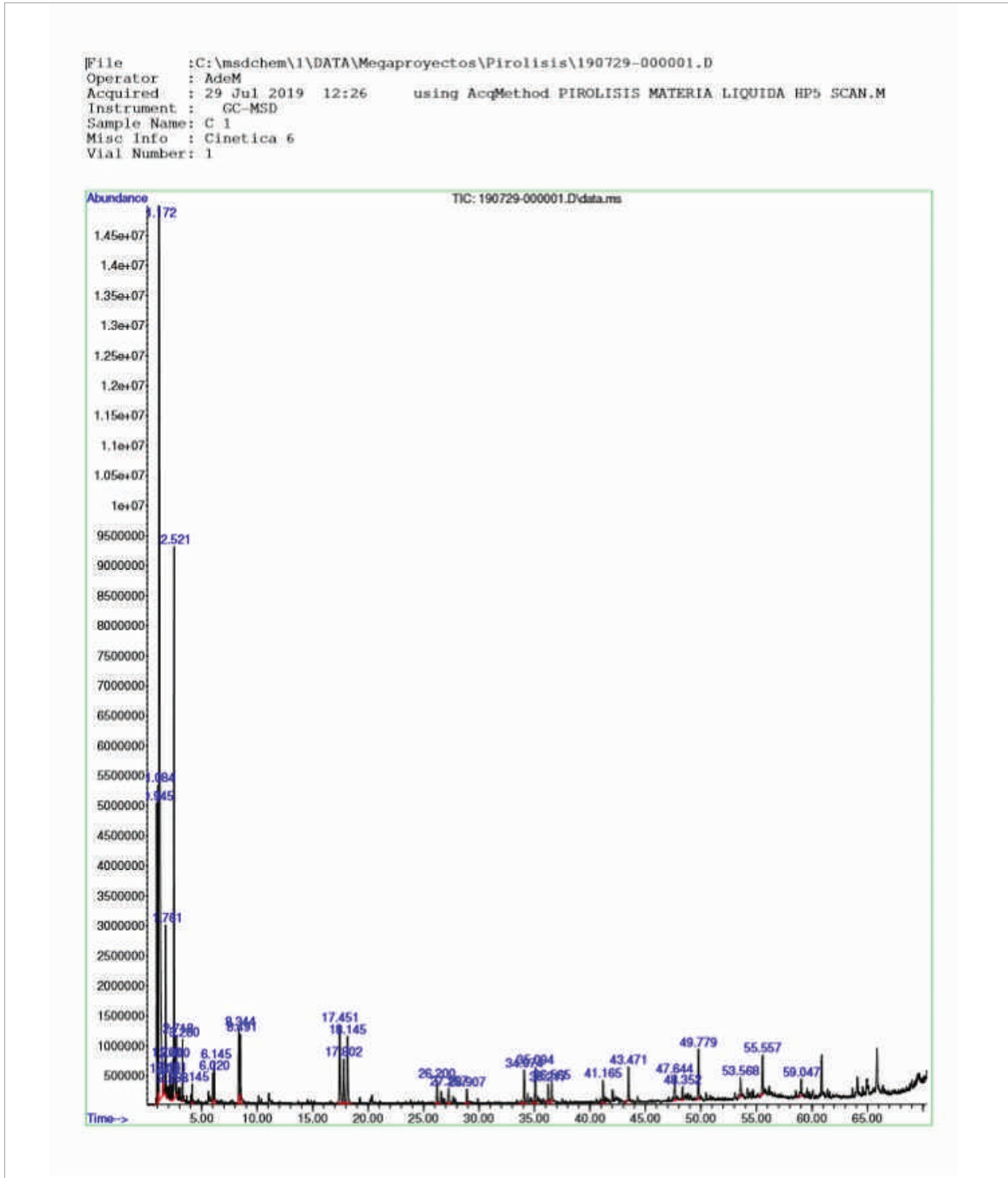
Moldoveanu, S. (2005) *Analytical Pyrolysis of Synthetic Organic Polymers* Elsevier B.V.

Sharuddin, S.D.A., Abanisa, F., Daud, W.M.A.W., Aroua, M.K. (2016) *A review on pyrolysis of plastic wastes* Energy Conversion and Management 115: 308-326.

Westerhout, R., Waander, J., Kuipers, J., van Swaaij, W. (1997) *Kinetics of the Low-Temperature Pyrolysis of Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene Modeling, Experimental Determination, and Comparison with Literature Models and Data* Industrial and Engineering Chemistry Research, 36, 1955-1964.

ANEXOS

Anexo I. Cromatograma obtenido para una de las muestras del producto líquido analizado.



Anexo 2. Código desarrollado en el programa Berkeley Madonna para generación del modelo cinético.

```
METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 69

DT = 0.02

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=5.783*10^16

E=57664.13

R=1.987

Wf=24.7

n=0.54

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=133.6

T2=774.3

V=15.51

m=15.84

INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

d/dt(W)=-RXN1
```


Ciencias de la Salud

