

# CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

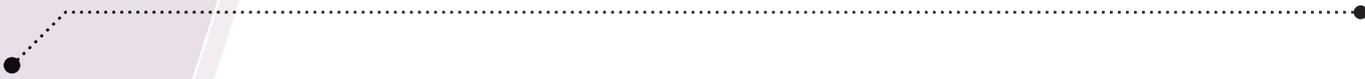
## CHARACTERIZATION OF THE PYROLYSIS PROCESS OF EXPANDED POLYSTYRENE WASTE

## CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE PIRÓLISE DE RESÍDUOS DE POLISTIRENO EXPANDIDO

**Arantxa Montserrat Gonzalez-Aguilar**  
**José Manuel Riesco-Ávila**  
**Francisco Elizalde-Blancas**  
**María Elena Tejeda del Cueto**

• Departamento de Ingeniería Mecánica,  
Universidad de Guanajuato, Salamanca,  
Gto. México, E- mail: riesco@ugto.mx

▫ Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias  
Navales, Universidad Veracruzana, Boca del  
Río, Veracruz. México. Email: etejeda@uv.mx

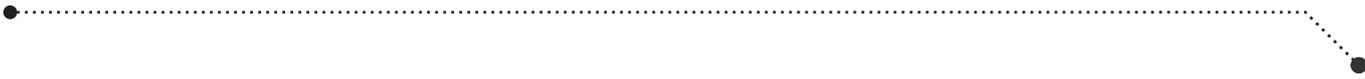


**Resumen**— De los diferentes métodos existentes para el reciclaje de plástico, la pirólisis ofrece la posibilidad de resolver las limitaciones del reciclado mecánico, el cual necesita grandes cantidades de residuos plásticos limpios, separados y homogéneos para poder garantizar la calidad del producto final. En la pirólisis, no es necesaria la clasificación ni limpieza de los distintos tipos de residuos plásticos y es posible procesar residuos contaminados con alimentos y productos químicos, como insecticidas, herbicidas y fertilizantes, reduciendo costos de clasificación y limpieza. La pirólisis consiste en la descomposición química de los materiales plásticos por degradación térmica en ausencia de oxígeno. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la pirólisis de residuos de poliestireno expandido (EPS) en un reactor tipo batch, variando la temperatura de pirólisis. Se experimentó con una masa de 500 g y temperaturas de 350, 400 y 450 °C. Los resultados indican que el mayor rendimiento de conversión en hidrocarburo líquido fue a una temperatura de 450 °C. El menor rendimiento de hidrocarburo líquido se obtuvo a la temperatura de 350 °C.

**Palabras clave**— Hidrocarburos, Pirólisis, Poliestireno expandido, Residuos.

**Abstract**— From the different existing methods for plastic recycling, pyrolysis offers the possibility of solving mechanical recycling limitations, which requires large amounts of clean, separate and homogeneous plastic waste in order to be able to guarantee the quality of the final product. In pyrolysis, it is not necessary to classify or clean the different types of plastic waste and it is possible to process waste contaminated with food and chemical products, such as insecticides, herbicides and fertilizers, reducing classification and cleaning costs. Pyrolysis consists of the chemical decomposition of plastic materials by thermal degradation in the absence of oxygen. In this work the results obtained from the pyrolysis of waste expanded polystyrene (EPS) in a batch reactor, varying the pyrolysis temperature are presented. It was experimented with a mass of 500 g and temperatures of 350, 400 and 450 °C. The results indicate that the highest conversion performance in to liquid hydrocarbon was obtained at a temperature of 450 °C. The lowest yield of liquid hydrocarbon was obtained at the temperature 350 °C.

**Keywords**— Hydrocarbons, Pyrolysis, Expanded Polystyrene, Waste.



**Resumo**— Dos diferentes métodos existentes para a reciclagem do plástico, a pirólise oferece a possibilidade de resolver as limitações da reciclagem mecânica, na qual requer-se grandes quantidades de resíduos plásticos limpos, separados e homogêneos para garantir a qualidade do produto final. Na pirólise, não é necessário classificar ou limpar os diferentes tipos de resíduos plásticos e é possível processar resíduos contaminados com alimentos e produtos químicos, como inseticidas, herbicidas e fertilizantes, reduzindo os custos de classificação e limpeza. A pirólise consiste na decomposição química de materiais plásticos por degradação térmica na ausência de oxigênio. Este trabalho apresenta os resultados obtidos da pirólise de resíduos de poliestireno expandido (EPS) em um reator tipo batelada, alterando a temperatura de pirólise. Os teste foram realizados com uma massa de 500 g e temperaturas de 350, 400 e 450 ° C. Os resultados indicam que a maior eficiência de conversão em hidrocarboneto líquido foi a uma temperatura de 450 ° C. O menor rendimento de hidrocarboneto líquido foi obtido a uma temperatura de 350 ° C.

**Palavras-chave**— Hidrocarbonetos, Pirólise, Poliestireno Expandido, Resíduos.

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de nuestra sociedad en la actualidad, es la generación de residuos sólidos debido al crecimiento poblacional y sobre todo a la disposición final de dichos residuos. Los residuos plásticos no se biodegradan y por consecuencia se acumulan en vertederos y rellenos sanitarios contribuyendo a la contaminación de mares y océanos.

Desde mediados de 1900, el uso del plástico se popularizó debido a sus beneficiosas propiedades como: ligereza, resistencia, transparencia, propiedades aislantes térmicas y eléctricas, además de su bajo costo, por lo cual se volvieron insustituibles en la sociedad moderna. Autores como Park et al. [1] señalan que la producción anual mundial del plástico alcanzó casi 350 millones de toneladas métricas en 2017 y se espera que aumente anualmente. Se estima que el consumo nacional de poliestireno expandido en México es de 125 000 toneladas anuales, de las cuales el 25% se destina a la fabricación de productos desechables para la industria alimenticia y el 75% restante se divide entre el sector de la construcción y embalaje; sin embargo, solo se reciclan 4 000 toneladas del total consumido, por lo que es necesario buscar alternativas para el reciclaje de estos residuos.

La tasa de reciclaje de residuos de plástico debe aumentar considerablemente a nivel mundial, Park et al. [1] adicionalmente reportan que los residuos de plásticos que no se pueden reciclar de forma

sostenible de una perspectiva económica y/ medio ambiental, se convierten en recursos valiosos para otras soluciones de recuperación.

En los últimos años, una importante cantidad de investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reciclar o reutilizar materiales de desecho como fuente de energía.

Una alternativa para la conversión de materiales que no son fácilmente reprocesados es la pirólisis, un proceso termoquímico que implica la descomposición del material orgánico a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno. Este proceso descompone las macromoléculas en productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual).

La pirólisis ofrece la opción de recuperación de materias primas, donde los residuos se pueden utilizar como materia prima para elaborar plástico virgen y la obtención de combustibles alternativos.

Según Zhang et al. [2], la pirólisis es una opción flexible en comparación con el reciclaje mecánico, esto debido a que los productos objetivo de la pirólisis pueden seleccionarse variando las condiciones de reacción. Este proceso ha sido extensamente empleado en la descomposición térmica de residuos plásticos para obtener productos de alta carga energética que contienen parafinas, olefinas e hidrocarburos

aromáticos. Sin embargo, varios esfuerzos no han sido logrados debido a la complejidad y heterogeneidad de las materias primas [3].

FakhrHoseini y Dastanian [4] afirman que el proceso de pirólisis es capaz de producir gran cantidad de aceite líquido mayor a un 80% de rendimiento a moderadas temperaturas alrededor de 500 °C.

Sharuddin et al. [5] señalan que el rendimiento y la composición de los productos es influenciado por un rango de parámetros de proceso, incluyendo el tipo de residuo de plástico, tipo de reactor, pero además, de otros factores, tales como el tiempo de residencia, la temperatura, los rangos de presión, la presencia de catalizadores, entre otros. Además, estos autores indican que la pirólisis es una de las rutas para la minimización de residuos que ha ganado mucho interés recientemente debido a la flexibilidad de la manipulación de los parámetros del proceso para optimizar el rendimiento basado en determinadas preferencias.

La mayoría de la pirólisis de plásticos se escalan a nivel laboratorio y son realizados en reactores batch, semi batch, de flujo continuo como son los de lecho fluidizado o los de lecho cónico. Muchos investigadores prefieren la utilización de reactores batch en pirólisis de plásticos a nivel laboratorio debido a su diseño simple y la habilidad de controlar los parámetros de operación fácilmente.

Sobko [6] reporta que la temperatura es uno de los parámetros de operación más significantes pues esta controla la reacción de craqueo de la cadena de polímeros. Adicionalmente, Onwundili et al. [7] indican que los efectos de temperatura y tiempos de residencia han sido estudiados para proponer las condiciones óptimas necesarias para la producción de aceite y de igual manera, para investigar los efectos de estos parámetros en la composición de los productos de reacción, con el énfasis en el aceite.

El aceite de pirólisis o hidrocarburo líquido comprende hidrocarburos aromáticos, derivados de benceno y productos oxigenados [8]. Al-Salem [9] asegura que se debe establecer una temperatura de pirólisis adecuada para la producción de aceite.

El proceso de pirólisis térmica puede ser categorizado en pirólisis instantánea, pirólisis rápida, pirólisis a media velocidad y pirólisis lenta, esto es basado a sus rampas de calentamiento correspondientes, las rampas de calentamiento a nivel industrial caen en la categoría de pirólisis lenta [10].

El uso del proceso de pirólisis para reciclar el poliestireno ha sido extensamente investigado, estudios realizados por Zhou et al. [11], Faravelli et al. [12] y McNeill et al. [13] se enfocan en estudiar el mecanismo de degradación del poliestireno para poder entender la producción de monómeros de estireno. Varias investigaciones destacan que se

puede obtener un alto rendimiento de estos monómeros.

Artetxe et al. [14] investigaron sobre la pirólisis de poliestireno en un reactor cónico de lecho y destacaron que el rendimiento de estireno está fuertemente influenciado por la temperatura y el caudal de gas. A pesar de la extensa investigación que se ha logrado realizar, aún existen muchos parámetros que no han sido totalmente entendidos debido a la complejidad que existe en el mecanismo de reacción.

Autores como Moqatam et al. [15] realizaron la pirólisis térmica del poliestireno usando catalizadores de sílice-alúmina y pudieron obtener rendimientos de hidrocarburo líquido con un 80% de monómeros de estireno, Dermibas [16] reportó que el rendimiento de estireno incrementa en una temperatura de 750°C, obteniendo un 65%.

Liu et al. [17] investigaron sobre la pirólisis del poliestireno y obtuvieron un rendimiento de monómero de estireno de 78.7% a una temperatura de 600°C. Además, cerca de un 99.6% de estireno puro fue obtenido por una destilación al vacío que realizaron adicionalmente.

Karaduman et al. [18] llevaron a cabo la pirólisis instantánea de poliestireno utilizando un reactor de caída libre y reportaron que el rendimiento del hidrocarburo líquido se maximizó alrededor de una temperatura de 750°C y del rendimiento de estireno a 825°C.

El reto que existe en este tipo de procesos es minimizar las temperaturas de pirólisis obteniendo mayores rendimientos de los productos deseados, pues esto conlleva a necesitar mayor energía para alcanzar ciertas temperaturas y podría disminuir la factibilidad del proyecto.

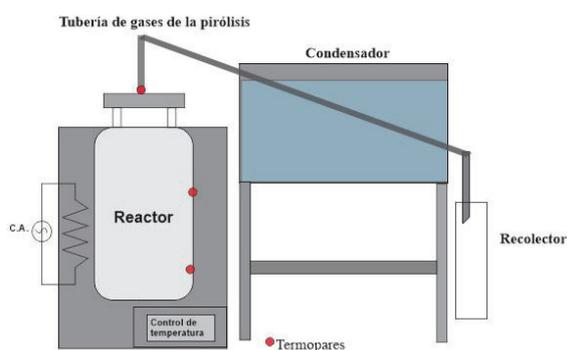
## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El material empleado en este trabajo es poliestireno expandido o espuma de poliestireno (EPS) en muestras de 500 g, las cuales fueron compactadas para reducir su volumen. La materia prima fue recuperada de los desechos producidos por la fabricación y reciclaje de embalajes de la empresa Poliespuma del Bajío S.A de C.V ubicada en Guanajuato, México.



**Figura 1.** Material de EPS no reciclable de la empresa Poliespuma del Bajío S.A de C.V  
Fuente: autores

Para la realización del experimento, se utilizó un reactor por lotes (semi-batch) de capacidad de 1 kg para la pirólisis de residuos de EPS, el cual se muestra en la fig. 2.



**Figura 2.** Esquema de la configuración del reactor.  
Fuente: autores

Este reactor consiste en un recipiente de acero inoxidable, aislado térmicamente, que contiene resistencias eléctricas controladas mediante dos termopares, los cuales muestran la temperatura dentro del reactor en la parte inferior y superior del mismo; además, se coloca un termopar a la salida de los gases de pirólisis para obtener una lectura de estos para su posterior condensación. Una vez que los residuos de EPS los cuales fueron compactados para ser introducidos al reactor como se visualiza en la figura 3, éste se sella herméticamente y se inicia el proceso de calentamiento mediante las resistencias eléctricas. Cuando se alcanzan las temperaturas de descomposición del EPS y en ausencia de oxígeno, se produce el proceso de pirólisis, los gases producidos son desalojados a través de un tubo que desemboca en un baño de agua a temperatura ambiente donde se condensan y a la salida del tubo se drenan los productos líquidos.

La metodología de esta investigación se centró en variar la temperatura de la fuente de calentamiento para alcanzar diferentes temperaturas de los gases de pirólisis antes de su condensación y se

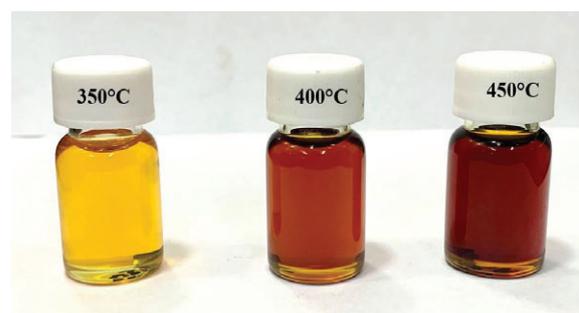
evaluó la producción de hidrocarburo líquido, residuos y gases no condensables para cada caso de estudio. Las pruebas se realizaron en duplicado.



**Figura 3.** Muestras de EPS para la experimentación.  
Fuente: autores

### III. RESULTADOS

A continuación, se muestran en la fig. 4 los productos de hidrocarburos líquidos obtenidos a las diferentes temperaturas de estudio, en donde se visualiza las diferencias en cuanto a tonalidad a medida que se incrementa la temperatura.

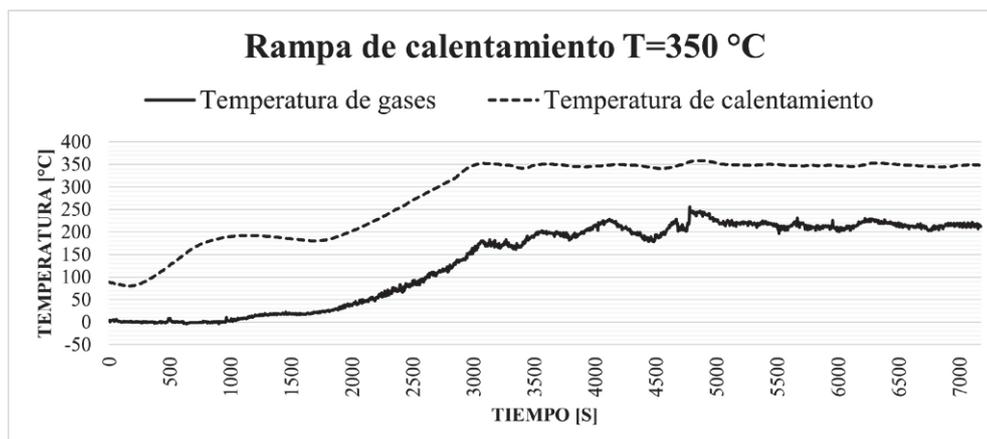


**Figura 4.** Muestras de hidrocarburos líquidos de pirólisis de EPS a diferentes temperaturas.  
Fuente: autores

Las fig. 5, 6 y 7 muestran las diferentes rampas de calentamiento de las

pruebas experimentales con el fin de obtener las temperaturas de gases a la entrada de condensación variando la fuente de calentamiento a 3 diferentes temperaturas (350, 400 y 450 °C). La figura

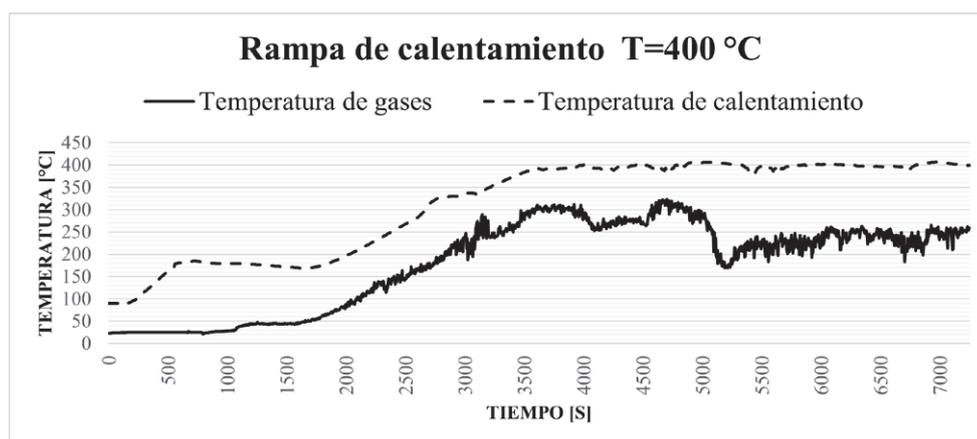
5 indica que para una rampa de  $T=350\text{ °C}$  cuando la temperatura de calentamiento se estabiliza, los gases de la pirólisis logran unas temperaturas dentro un rango de 194 y 240°C.



**Figura 5.** Rampa de calentamiento para pirólisis de residuos de EPS a 350°C.  
Fuente: autores

Por otro lado, para la rampa de  $T=400\text{ °C}$  cuando la temperatura de calentamiento logra estabilizarse, los gases alcanzan temperaturas de 250 a 320 °C, se nota una

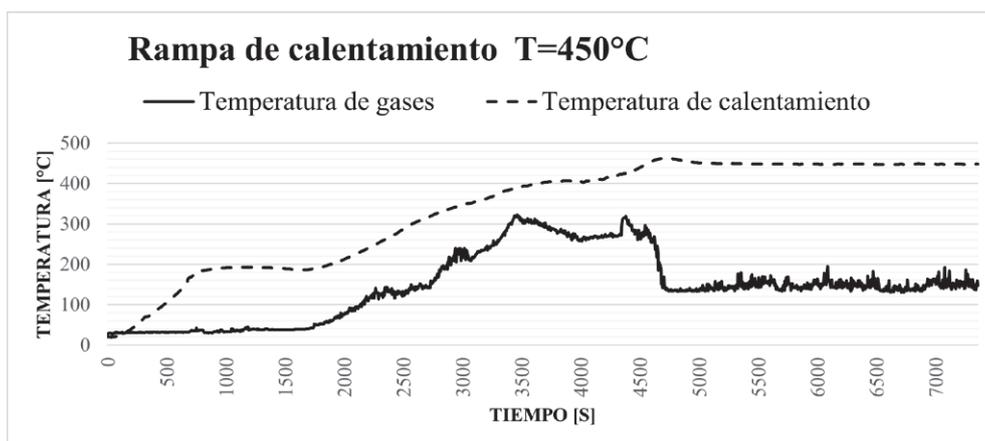
caída de temperatura a partir de los 5000 segundos, esto es debido a que se detiene la producción de hidrocarburo líquido.



**Figura 6.** Rampa de calentamiento para pirólisis de residuos de EPS a 400°C.  
Fuente: autores

Por último, para la rampa de  $T=450\text{ °C}$ , cuando la temperatura de calentamiento se estabiliza a 450°C, la temperatura de los gases sufre esa misma caída puesto

que, de igual manera, se deja de producir líquido. Por lo tanto, no se obtuvo una referencia de temperatura de gases para una rampa de 450°C.



**Figura 7.** Rampa de calentamiento para pirólisis de residuos de EPS a 450°C.  
Fuente: autores

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos de porcentaje de conversión en hidrocarburos líquidos, residuos y gases no condensables a partir de la pirólisis térmica de residuos de poliestireno expandido.

**Tabla 1.** Porcentajes de conversión para las diferentes temperaturas experimentales.

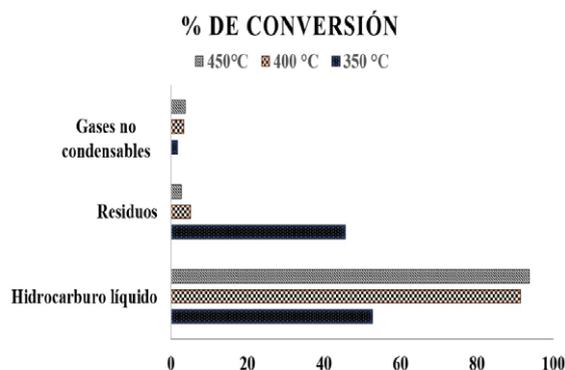
Temperatura [°C]	Hidrocarburo líquido	Residuos	Gases no condensables
350	52.7%	45.6%	1.7%
400	91.4%	5.2%	3.4%
450	93.6%	2.7%	3.7%

Fuente: autores

En la fig. 8 se observa un máximo rendimiento de hidrocarburo líquido a una temperatura de calentamiento de 450°C, sin embargo, se observa una diferencia significativa para la obtención de hidrocarburo líquido a temperaturas por debajo de 350°C, teniendo como diferencia de aproximadamente 38% por debajo de las demás temperaturas.

Como consecuencia del bajo porcentaje de producción de hidrocarburo líquido, existe una diferencia significativa en

la generación de residuos entre la temperatura de 350°C y las demás temperaturas. Para el caso de gases no condensables, no existe una notoria diferencia entre las temperaturas de pirólisis.



**Figura 8.** Porcentajes de conversión para las diferentes temperaturas de experimentación.  
Fuente: autores

### A) Caracterización

A continuación, se muestra en la tabla 2 la caracterización realizada a los productos de hidrocarburo líquido obtenidos por la pirólisis térmica de residuos de poliestireno a las diferentes temperaturas de experimentación.

Para la medición de la densidad se empleó un densímetro y verificó el resultado con un picnómetro de 50 ml, para la medida de la viscosidad cinemática se utilizó un viscosímetro Cannon-Fenske y, por último, para obtención del poder calorífico de los productos se usó una bomba calorimétrica isoperibólica IKA-C3000.

**Tabla 2.** Resultados de la caracterización de los productos de hidrocarburos líquidos de la pirólisis de residuos de EPS.

Temperatura de pirólisis [C]	Densidad	Viscosidad cinemática [Cst]	Poder Calorífico superior [J]
350	0.916	0.959	42,060
400	0.921	1.130	41,858
450	0.935	1.448	41,753

Fuente: autores

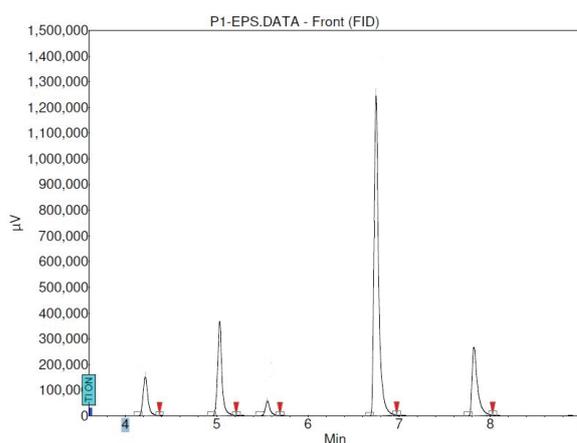
Se puede observar que, existe una tendencia en las tres propiedades medidas, conforme incrementa la temperatura de pirólisis se obtienen hidrocarburos líquidos más densos y viscosos. Sin embargo, disminuye el poder calorífico cuando se incrementa la temperatura.

Por último, para la identificación de los compuestos esenciales en los productos de pirólisis térmica de poliestireno expandido se empleó un cromatógrafo de gases Varían modelo 450-GC, el cual está equipado con un detector de flama (FID). Para el análisis de los hidrocarburos, se utiliza un inyector capilar SPI 1093 con temperatura programable y una columna capilar de 30 m de longitud. En la fig. 9 se muestra una imagen del cromatógrafo.



**Figura 9.** Cromatógrafo de gases Varían 450-GC..  
Fuente: autores

Los resultados obtenidos tienen similitud a los obtenidos por los autores descritos en la sección I, pues se confirmó la presencia de Benceno, Etilbenceno, además de que el pico más grande se trata de Estireno representando un 44%; en el análisis cromatográfico se encontró un poco de Cumeno y Tolueno representando un 11 y 5% respectivamente. Se nombraron los picos identificados y muestran en la Tabla. En el cromatograma que se observa en la fig. 10 se aprecia de forma ampliada el área de los picos identificados y sus tiempos de retención.



**Figura 10.** Cromatograma de principales componentes de productos de pirólisis de poliestireno expandido.  
Fuente: autores

#### IV. CONCLUSIONES

La presente investigación concluye que la pirólisis térmica es una solución de recuperación económica de hidrocarburos líquidos valiosos en industrias petroquímicas puesto que se pueden utilizar como materia prima para nuevos productos plásticos. Además, es un método de reciclaje factible pues se obtienen rendimientos de conversión de más del 90% y sirve como alternativa para aquellos residuos plásticos que son difíciles de reciclar.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Poliespuma del Bajío S.A de C.V ubicada en Irapuato, Gto. México por brindar la materia prima para la realización de este proyecto.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] K.-B. Park, Y.-S. Jeong, B. Guzelciftci and J.-S. Kim, "Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyrolysis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes," *Applied Energy*, 2020.
- [2] Y. Zhang, D. Duan, H. Lei, E. Villota and R. Ruan, "Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons," *Applied Energy*, vol. 251, pp. 1-17, 2019.
- [3] N. Sophonrat, L. Sandström, I. N. Zaini and W. Yang, "Stepwise pyrolysis of mixed plastics and paper for separation of oxygenated and hydrocarbon condensates," *Applied Energy*, vol. 229, pp. 314-325, 2018.
- [4] S. M. FakhrHoseini and M. Dastanian, "Predicting Pyrolysis Products of PE, PP and PET Using NRTL Activity Coefficient Model," *Hindawi Journal of Chemistry*, pp. 1-5, 2013.
- [5] S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. W. Daud and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 308-326, 2016.
- [6] A. Sobko, "Generalized Van der Waals-Berthelot equation of state," *Doklady Physics*, vol. 53, no. 8, pp. 416-419, 2008.
- [7] J. A. Onwundili, N. Insura and P. Williams, "Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 86, no. 2, pp. 293-303, 2009.
- [8] L. Quesada, M. Calero, M. Martín-Lara, A. Pérez and G. Blázquez, "Characterization of fuel produced by pyrolysis of plasticfilm obtained of municipal solid waste," *Energy*, vol. 186, pp. 1-9, 2019.
- [9] S. M. Al-Salem, "Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC)," *Process*

- Safety and Environmental Protection*, vol. 127, pp. 171-179, 2019.
- [10] J.-L. Shie, J.-P. Lin, C.-Y. Chang, D.-J. Lee and C.-H. Wu, "Pyrolysis of oil sludge with additives of sodium and potassium compounds," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 39, no. 1, pp. 51-64, 2003.
- [11] J. Zhou, Y. Qiao, W. Wang, E. Leng, J. Huang, Y. Yu and M. Xu, "Formation of styrene monomer, dimer and trimer in the primary volatiles produced from polystyrene pyrolysis in a wire-mesh reactor," *Fuel*, vol. 182, pp. 333-339, 2016.
- [12] T. Faravelli, M. Pinciroli, F. Pisano, G. Bozzano, M. Dente and E. Ranzi, "Thermal degradation of polystyrene," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 60, no. 1, pp. 103-121, 2001.
- [13] I. C. McNeill, M. Zulfiqar and T. Kousar, "A detailed investigation of the products of the thermal degradation of polystyrene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 28, no. 2, pp. 131-151, 1990.
- [14] M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio, I. Barbarias, A. Arregi, R. Aguado, J. Bilbao and M. Olazar, "Styrene recovery from polystyrene by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor," *Waste Management*, vol. 45, pp. 126-133, 2015.
- [15] S. I. Moqadam, M. Mirdrikvand, B. Roozbehani, A. Kharaghani and M. R. Shishehsaz, "Polystyrene pyrolysis using silica-alumina catalyst in fluidized bed reactor," *Clean Techn Environ Policy*, vol. 17, pp. 1847-1860, 2015.
- [16] A. Demirbas, "Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 72, no. 1, pp. 97-102, 2004.
- [17] Y. Liu, J. Qian and J. Wang, "Pyrolysis of polystyrene waste in a fluidized-bed reactor to obtain styrene monomer and gasoline fraction," *Fuel Processing Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 45-55, 2000.
- [18] A. Karaduman, E. Simsek, B. Cicek and A. Y. Bilgesü, "Flash pyrolysis of polystyrene wastes in a free-fall reactor under vacuum," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 60, no. 2, pp. 179-186, 2001.
- [19] PlasticsEurope, "Reciclado y Recuperación de energía," 2019. [Online]. Available: <https://www.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>.
- [20] P. T. Williams and E. Slaney, "Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction single plastics and waste plastic mixtures," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 51, no. 4, pp. 754-769, 2007.