

## Propiedades fisicoquímicas de combustibles alternativos obtenidos mediante pirólisis de residuos

Jaqueline Ruby Flores Iralda<sup>1</sup>, Geovanna Mayté Gómez Gómez<sup>2</sup>, Leo Adán Conejo Rodríguez<sup>1</sup>, Xavier Ulises Huerta Jacobo<sup>1</sup>, Denilson Nava Sosa<sup>1</sup>, José Manuel Riesco Ávila<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra.

riesco@correo.mx

### Resumen

La creciente demanda de energía a nivel mundial, el agotamiento de los recursos petroleros y el alto costo de los combustibles derivados del petróleo ha motivado a los investigadores a buscar combustibles alternativos para los motores de combustión interna. Por otro lado, uno de los principales problemas de nuestra sociedad es la generación y disposición de residuos sólidos, un problema que debe ser resuelto en condiciones económicas y respetuosas con el medio ambiente. 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). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos. En este trabajo se presentan las propiedades fisicoquímicas de combustibles obtenidos mediante la pirólisis de residuos plásticos.

**Palabras clave:** Combustibles; pirólisis; propiedades fisicoquímicas.

### Introducción

Los combustibles tradicionales utilizados por los motores de combustión interna alternativos (MCIA), son líquidos y proceden del petróleo, siendo por tanto de origen fósil. La gasolina, en el caso de los motores de encendido provocado (MEP), y el diésel en el caso de los motores de encendido por compresión (MEC), constituyen los principales productos de las refinerías. Su facilidad para el almacenamiento en condiciones ambientales y su gran densidad energética, otorgan al motor una gran autonomía y a su sistema de alimentación una relativa sencillez. Estas ventajas, junto con otras más específicas de cada tipo de motor, hacen que estos combustibles sean ventajosos para su consumo en MCIA en general, y en particular para su consumo en el sector de la automoción. Sin embargo, la creciente demanda de energía a nivel mundial, el agotamiento de los recursos petroleros y el alto costo de los combustibles derivados del petróleo ha motivado a los investigadores a buscar combustibles alternativos para los motores de combustión interna.

La mayoría de los combustibles líquidos comerciales están constituidos por una gran cantidad de compuestos orgánicos. Sin embargo, lo que caracteriza a un combustible comercial determinado no es su composición, sino el cumplimiento de unas determinadas propiedades fisicoquímicas cuyos límites están establecidos en estándares que garantizan el funcionamiento apropiado de los MCIA. Cuando se generan alternativas a los combustibles comerciales, estos combustibles deben cumplir las mismas limitaciones para ser reemplazados total o parcialmente en un MCIA 0, 0.

En este trabajo se presentan las propiedades fisicoquímicas de combustibles obtenidos mediante la pirólisis de residuos plásticos.

## Combustibles alternativos

De cara al futuro, el hidrógeno es considerado como vector energético entre la fuente energética y la propulsión, pero su implantación tecnológica e industrial está lejos de poder alcanzarse. Entre tanto, los biocombustibles y otros combustibles alternativos, como los derivados de residuos orgánicos, aunque también sometidos a una estricta limitación de su calidad y de su sostenibilidad, van tomando protagonismo progresivamente.

Actualmente, los biocombustibles, como el biodiesel y el bioetanol, se han consolidado como sustitutos parciales de los combustibles de origen fósil. Sin embargo, la enorme cantidad de carburantes consumidos en el mundo haría totalmente imposible sustituir por completo los combustibles fósiles por biocombustibles, por lo que se buscan nuevas fuentes de energía 0, 0.

Recientemente, se han desarrollado nuevas tecnologías de conversión termoquímica que permitan reciclar o reutilizar materiales de desecho como fuente de energía. Las tecnologías termoquímicas tienen formas prometedoras de reciclar energía a partir de diversos materiales de desecho al tiempo que reducen el impacto ambiental. Una de estas tecnologías 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). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos.

En el proceso de pirólisis, los residuos se introducen en un reactor al cual posteriormente se le retira la mayor cantidad de oxígeno, en ocasiones por diferencia de temperaturas al iniciar su calentamiento o realizando vacío a lo largo del proceso. En equipos de laboratorio en ocasiones se introducen gases inertes como el nitrógeno, con el fin de generar una atmósfera más controlada. Las temperaturas de operación de estos equipos suelen ser de 380 a 560 °C 0, son función de la materia prima y se busca que se maximice el líquido obtenido. A este producto se le conoce como aceite pirolítico. Junto con este aceite, se obtienen gases combustibles que pueden ser usados como suministro de energía que requiere el reactor para operar, y carbón en bajos porcentajes, que puede ser usado como combustible en otros procesos. Además, en la pirólisis de llantas, junto con el carbón, se encuentran presentes otros materiales, como acero y látex 0. En la Figura 1 se muestra un diagrama esquemático del proceso de pirólisis.

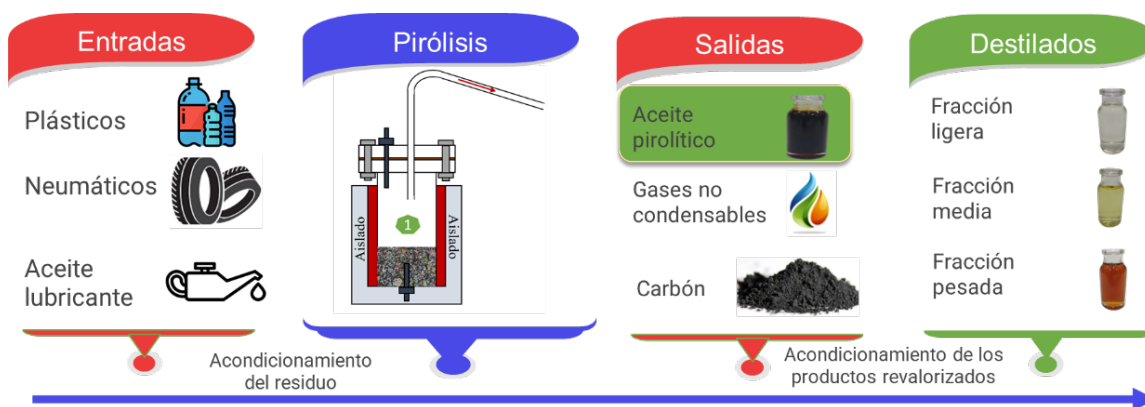


Figura 1. Proceso generalizado de pirólisis.

El aceite pirolítico no puede ser usado directamente en MCIA, pero si en dispositivos térmicos, como calderas, incineradores, hornos, etc. Para poder ser usados en MCIA se deben realizar procesos de destilación fraccionada (Figura 1), donde la fracción ligera puede ser utilizada como sustituto de gasolina y la fracción media como remplazo parcial o total del diesel 0.

## Propiedades de los aceites pirolíticos

En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los combustibles obtenidos mediante la pirólisis de residuos de Polietileno de Alta densidad (PEAD), Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Polipropileno (PP) y Poliestireno (PE).

**Tabla 1.** Propiedades de los aceites pirolíticos.

Propiedades fisicoquímicas	Unidad	Norma ASTM	Aceites pirolíticos				ASTM 1979	ASTM 1979
			PEAD	PEBD	PP	PE	Gasolina	ASTM D975 Diesel
Poder calorífico	MJ/kg	D4809	40.5	39.5	40.8	40.02 - 48.5	42.5	43
Gravedad API @ 60 °F	-	D287	27.48	47.75	33.03	13.22 - 33.2	55	38
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	D445	5.08 <sup>a</sup>	5.56 <sup>b</sup>	4.09 <sup>a</sup>	0.87 - 1.6	1.17	1.9 - 4.1
Densidad @15 °C	g/cm <sup>3</sup>	D1298	0.89	0.78	0.86	0.85 - 0.98	0.78	0.8
Cenizas	%	D482	0	0.02	0	0 - 0.6	-	0.01
Número de Octano	-	D2700	85.3 - 95.3	-	87.6 - 97.8	90 - 98	81 - 95	-
Número de Cetano	-	D613	31.05	-	34.35	-	-	40
Punto de fluidez	°C	D97	-5	-	-9	-67	-	6
Punto de inflamabilidad	°C	D93	48	41	30	24.1-79	42	38-55
Punto de anilina	°C	D611	45	-	40	-	71	77.5

<sup>a</sup> Viscosidad a 40 °C, <sup>b</sup> Viscosidad a 50 °C.

### Poder calorífico

El contenido energético de un combustible se expresa por medio de su *poder calorífico*, que se define como la magnitud del calor de reacción a presión o volumen constantes a una temperatura estándar (generalmente 25 °C) para la combustión completa de una unidad de masa de combustible. Los combustibles pirolíticos derivados de residuos plásticos tienen un alto contenido de energía, mismo que son aprovechables en el uso en motores de combustión o para la generación de energía eléctrica. Los valores se aproximan a los 40 a 45 MJ/kg, los cuales se asimilan a los de combustibles comerciales como gasolina y diesel, teniendo estos valores de 42.5 y 43 MJ/kg, respectivamente. Por lo tanto, en temas de poder calorífico, el uso de los aceites pirolíticos derivados de residuos plásticos cumpliría con las especificaciones de los combustibles para el uso de motores de combustión.

### Densidad

La densidad es la masa por unidad de volumen de un fluido. Incluso si el combustible es líquido, su densidad depende ligeramente de la presión y en mayor medida de la temperatura. Es una propiedad que se utiliza para conocer la cantidad aproximada de combustible entregado por los sistemas de inyección para una combustión exacta del combustible. Los sistemas de inyección de combustible en los MCIA son volumétricos. La inyección tiene lugar a una cierta presión (muy alta en el caso de los motores diésel y relativamente baja en los de gasolina), y a temperaturas mayores que la atmosférica (en el extremo de un inyector diésel pueden acercarse a los 100 °C) como consecuencia del calentamiento provocado por la compresión o por la proximidad con las zonas calientes del motor. Todo ello obliga a considerar las variaciones de densidad del combustible en el diseño del sistema de inyección y, aun así, las dispersiones de densidad de los combustibles repercuten negativamente en el rendimiento y las emisiones generadas. Debido a esto y a las habituales dispersiones de densidad entre combustibles líquidos suministrados por diferentes compañías, se justifica la necesidad de utilizar sistemas gravimétricos en vez de volumétricos cuando pretende medirse con precisión el consumo de combustible de un MCIA.

### Gravedad específica

La *gravedad API* es el método utilizado para medir la densidad del combustible en relación con el agua, que fue establecido por el Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) y que también se conoce como *gravedad específica*.

### Viscosidad cinemática

La viscosidad se define como una medida de la resistencia del fluido a fluir. La *viscosidad cinemática* juega un papel importante en la atomización y penetración del chorro de combustible. Aunque no tanto como en el caso de un lubricante, la *viscosidad cinemática* de un combustible líquido es un parámetro importante pues su valor debe ser suficientemente bajo como para poder circular por los circuitos de alimentación sin excesivas pérdidas de carga y en algunos casos como el diesel y el combustóleo, lo suficientemente alto como para cumplir con unas ciertas exigencias lubricantes.

### Número de octano

El número de octano, índice de octano u octanaje (IO), mide la resistencia a la detonación de un combustible (gasolina). Es una escala numérica que se genera al comparar las características de autoignición del combustible con las de combustibles estándar en un motor de prueba específico y a condiciones específicas de operación. Los dos combustibles estándar de referencia son el iso-octano (2,2,4 trimetilpentano), al cual se le asigna un número de octano de 100 y el n-heptano, al cual se le da un valor de 0. Mezclas de estos dos hidrocarburos definen la resistencia a la detonación de números de octano intermedios. Esta propiedad es de vital importancia en la evaluación de cualquier combustible usado en motores de encendido provocado (MEP), pues garantiza que el combustible solo se encienda cuando se produzca una chispa en el interior de la cámara de combustión. Un bajo IO u ON ocasiona la presencia de fenómenos como “golpeteo” y autoignición prematura del combustible.

### Número de cetano

El número de cetano (CN) es un parámetro empírico asociado con el tiempo de retraso de encendido del diésel (periodo transcurrido desde el comienzo de la inyección hasta el de combustión). Entre mayor sea el número de cetano, menor será el tiempo de retraso y el combustible se auto encenderá más rápido en la cámara de combustión. El valor bajo de CN indica mayores emisiones del escape del motor, más depósito debido a la combustión incompleta y un aumento en la detonación. El índice de cetano (CI) se utiliza como sustituto del número de cetano.

El número de cetano se establece comparando el combustible de prueba con dos combustibles estándares de referencia, el n-cetano (hexadecano),  $C_{16}H_{34}$ , al que se le asigna un valor de cetano de 100, y el heptametilnonano (HMN),  $C_{12}H_{34}$ , al cual se le da un valor de cetano de 15.

### Temperatura de inflamabilidad (Flash Point)

Es la temperatura más baja a la que los vapores de un combustible se inflaman cuando entran en contacto con alguna fuente de fuego, a presión ambiente. Es importante por razones de seguridad para el transporte y almacenamiento de combustibles. El diesel tiene un punto de inflamación de aproximadamente 55–65 °C.

### Punto de nube (Cloud Point)

El punto de nube (PN) es la temperatura mínima factible a la cual la cera presente en el combustible comienza a cristalizar y adquiere una apariencia turbia. Para fijar el control del combustible a baja temperatura generalmente se usa el PN. Estos cristales o ceras pueden pasar a través de bombas y filtros del motor. Por ello, el PN como límite de operación es excesivamente restrictivo.

## Punto de fluidez (Pour Point)

El punto de fluidez (PF) es la temperatura mínima de un combustible líquido a la que pierde sus propiedades de fluidez. El PF es una propiedad crítica para el proceso de flujo en frío. El PF siempre es menor que el punto de niebla. A esta temperatura el combustible no se vierte al inclinar la probeta en la que se encuentra. En este punto el combustible no puede ser bombeado e incluso, a temperaturas mayores que el PF, obstruye totalmente los filtros del motor. Por tanto, esta temperatura como límite de operatividad es poco restrictiva.

## Conclusiones

Las tecnologías de conversión termoquímica han desempeñado recientemente un papel importante en la obtención de energía a partir de fuentes de desechos. En particular, mediante el proceso de pirólisis es posible obtener productos que pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos. Sin embargo, para que un combustible pueda ser usado en motores de combustión interna, tiene que cumplir con determinadas propiedades fisicoquímicas cuyos límites están establecidos en normativas, tanto nacionales como internacionales. En este trabajo, se describen brevemente algunas de estas propiedades y se presentan los valores reportados en la literatura para los aceites pirolíticos obtenidos a partir de residuos de Polietileno de Alta densidad (PEAD), Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Polipropileno (PP) y Poliestireno (PE), comparados con los de los combustibles comerciales (diésel y gasolina).

## Agradecimientos

Se agradece el valioso apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo a los integrantes del Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos y Motores Térmicos, del Departamento de Ingeniería Mecánica perteneciente a la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato (CMT.UG). En particular a M. en I. Arantxa Montserrat Gonzalez Aguilar, Ing. María Celeste Santiago Zavala, Ing. Zivoni Dali Mosqueda Huerta, M. en C. Victoria Paola Cabrera Madera, Ing. Marlon Yesid Poveda Pachón y M. en I. James Ronald Vera Rozo.

## Referencias

- H. Hao et al., "Biofuel for vehicle use in China: Current status, future potential and policy implications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 645–653, 2018.
- V. K. Mishra and R. Goswami, "A review of production, properties and advantages of biodiesel," *Biofuels*, vol. 9, no. 2, pp. 273–289, 2018.
- D. Czajczyńska, R. Krzyżyńska, H. Jouhara, and N. Spencer. Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, vol. 134, pp. 1121–1131, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.042.
- W. Nurdiyana Wan Mansor et al. A Review of Plastic-derived Diesel Fuel as a Renewable Fuel for Internal Combustion Engines: Applications, Challenges, and Global Potential. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Apr. 2022, vol. 1013, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/1013/1/012014.
- S. Uçar, S. Karagöz, J. Yanik, M. Saglam, and M. Yuksel. Copyrolysis of scrap tires with waste lubricant oil. *Fuel Processing Technology*, vol. 87, no. 1, pp. 53–58, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2005.06.001.
- C. Kassargy, S. Awad, G. Burnens, K. Kahine, and M. Tazerout. Gasoline and diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite. *Fuel*, vol. 224, pp. 764–773, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.03.113.
- Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. McGraw-Hill Education, 2018.
- Sakthivel Rajamohan, Ramesh Kasimani, Purnachandran Ramakrishnan, P Mohamed Shameer. A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. *Renew Sustain Energy Rev* 2018:2970–92. [https:// doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.037](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.037).

- Bhuiya, M.M.K., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Ashwath, N., Azad, A.K., Hazrat, M.A. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel – Part 2: Properties, performance and emission characteristics. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;55:1129–46. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.086>.
- ASTM D4814, “Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel”, Vol. 86, p. 1-4, 1998.
- Lapuerta M, Armas O, Rodríguez-Fernández J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Prog Energy Combust Sci* 2008;34:198–223.
- Atabani AE, Silitonga AS, Ong HC, Mahlia TMI, Masjuki HH, Irfan Anjum Badruddin, et al. Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;18:211–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>.
- British Petroleum Fuel News, Understanding CFPP, A.C.N. 004 085 616; February 7, 2002.