

<https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.475>

Viabilidad Económica: Convirtiendo botellas de plástico desechable de tereftalato de polietileno (PET) en combustible líquido por proceso de pirólisis

Economic Feasibility: By converting disposable polyethylene terephthalate (PET) plastic bottles into liquid fuel by pyrolysis process

José Adolfo Arízaga Mondragón

jarizagam@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-7414-7961>

Universidad Estatal de Milagro
Milagro – Ecuador

Josué Ismael Arízaga Ricaurte

Josuari98@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-9441-6630>

La Vienesita S.A
Durán – Ecuador

Alexis David Hernández Mella

ahernandezm7@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8133-2642>

Universidad Estatal de Milagro
Milagro – Ecuador

Artículo recibido: 20 octubre 2024 - Aceptado para publicación: 26 noviembre 2024
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

Con este fin se centra la investigación para mejorar el consumo de estos residuos, especialmente con los plásticos de tereftalato de polietileno (PET), exclusivamente en botellas plásticas. La mayor parte de plásticos se acumulan en el ambiente ya que por sus características su degradación es muy lenta pudiendo tardar hasta los 1000 años y en ese periodo de tiempo se generan partículas más pequeñas del mismo plástico. Se realizaron pruebas para la obtención de combustible a partir del tereftalato de polietileno (PET) mediante el proceso de pirólisis y se pudo verificar su viabilidad económica. Este trabajo se desarrolló mediante la acción de varios componentes para obtener este combustible, se utilizó el método cuantitativo para estos tipos de pruebas de tal forma verificar estadísticamente su viabilidad económica mediante costo producción en las diferentes pruebas. Se aplica un análisis comparativo de los procesos de producción por batch con la que se relaciona la cantidad de plástico PET con la cantidad de combustible obtenido y su temperatura de operación. Finalmente, en base a las pruebas realizadas, se obtuvo combustible con una relación aproximada promedio de 1,2 con respecto al material utilizado PET. Por lo que se puede concluir que esta relación puede aumentar si a futuro se realizan cambios al proceso de pirólisis específicamente en la parte de la condensación y realizar una mejor hermeticidad en la tapa de entrada de material al reactor evitando pérdidas de

gas proveniente del plástico. Por el momento, se tiene una baja rentabilidad con el proceso utilizado de acuerdo a los datos obtenidos en los seis procesos, pero esto es relativo con el mejoramiento del sistema de condensado se pueda obtener mayor cantidad de combustible. Si se relaciona con el cuidado del medio ambiente, el uso de este tipo de material para la obtención de combustible es una de las soluciones para evitar contaminación. Estos plásticos también provocan contaminación visual del medio ambiente por envases tirados en cantidades significativas en varios lugares de la urbe; mismos que causan inundaciones en épocas de lluvias por taponamientos de alcantarillas y vías fluviales debido a su bajo proceso de descomposición.

Palabras clave: pirolisis, combustible, tereftalato, plástico, batch

ABSTRACT

To this end, research is focused on improving the consumption of this waste, especially with polyethylene terephthalate (PET) plastics, exclusively in plastic bottles. Most plastics accumulate in the environment since, due to their characteristics, their degradation is very slow and can take up to 1000 years, and in that period of time, smaller particles of the same plastic are generated. Tests were carried out to obtain fuel from polyethylene terephthalate (PET) through the pyrolysis process and its economic viability could be verified. This work was developed through the action of several components to obtain this fuel. The quantitative method was used for these types of tests in order to statistically verify its economic viability through production cost in the different tests. A comparative analysis of the batch production processes is applied, which relates the amount of PET plastic with the amount of fuel obtained and its operating temperature. Finally, based on the tests carried out, fuel was obtained with an approximate average ratio of 1.2 with respect to the PET material used. Therefore, it can be concluded that this ratio can increase if changes are made in the future to the pyrolysis process, specifically in the condensation part, and a better seal is made in the material inlet cover to the reactor, avoiding gas losses from the plastic. At the moment, there is a low profitability with the process used according to the data obtained in the six processes, but this is relative to the improvement of the condensate system, so that a greater amount of fuel can be obtained. If it is related to the care of the environment, the use of this type of material to obtain fuel is one of the solutions to avoid contamination. These plastics also cause visual pollution of the environment due to containers thrown away in significant quantities in various places in the city; these cause flooding during the rainy season due to blockages in sewers and waterways due to their slow decomposition process.

Keywords: pyrolysis, fuel, terephthalate, plastic, batch

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se tiene un alto consumo de materiales poliméricos en nuestro país, Ecuador. Para nuestro caso de investigación el plástico tereftalato de polietileno, exclusivamente las botellas de plásticos, con su identificación numérica de acuerdo a su clasificación el número uno. En la que se procede a realizar un análisis de la viabilidad económica convirtiendo las botellas de plásticos desechables en combustible mediante el proceso de pirólisis. Hacer combustible a partir de residuos de plásticos desechables es tan importante porque ayuda al medio ambiente debido a que estos residuos plásticos es un gran problema debido a los años que toma para su degradación con relación a los metales.

Este documento se justifica, porque se lo realiza en base a la perspectiva medioambiental por el alto consumo de los plásticos y poder entender el impacto ambiental de la producción de combustible a partir del plástico, comparándolo con otros métodos de obtención de combustibles. Evalúa aspectos como la reducción de residuos plásticos, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes asociados con el proceso.

Se tiene como principio fundamental a la termodinámica debido a que se trabaja con calor para el proceso de calentamiento y condensación mediante fluido en recirculación con temperatura menor de 15 °C, esto es para la condensación del gas proveniente del tanque de calentamiento a una temperatura superior de 450 °C.

Para la determinación de la viabilidad económica, se realizan seis procesos en que se toman valores de temperatura máxima en la que se obtiene el combustible en pequeñas cantidades. Este proceso se lo realiza con cantidades de plástico residual entre 12 y 14 Kg. por batch. Además, manteniendo la temperatura del agua de recirculación en los condensadores para el condensados de gases proveniente del tanque digestor.

Este proyecto de investigación presenta un impacto directo a la sociedad en la parte cultural y políticas públicas y medio ambiental debido al alto consumo de plásticos. De acuerdo al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, en el Ecuador, para el año 2022, se generaron 627 toneladas de residuos plásticos, de las cuales solo el 7,7 % se reciclaron.

Como alcance se tiene el consumo residuos de botellas de tereftalato de polietileno (PET) para la obtención de combustible mediante el proceso de pirólisis y condensado de los gases proveniente de la combustión del tanque receptor de plástico mediante intercambiadores de calor con recirculación de agua helada.

El pirólisis es una técnica de reciclaje en la que se da la descomposición térmica de los polímeros en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, normalmente a temperaturas entre 300 y 900°C [4]-[7]. Dependiendo de la temperatura a la cual se dé la pirólisis y otras condiciones de operación del proceso (como presión, flujos o carga de materia prima, velocidad de calentamiento, tiempo de exposición, etc.), pueden obtenerse mezclas de productos

sólidos, líquidos y/o gaseosos en diferente proporción y con diferente composición (Amar S. et al., 2019, p. 308).

La pirólisis convencional o suave utiliza temperaturas medias o bajas, presentando una temperatura máxima de 600 °C y un tiempo de residencia alto, entre minutos y horas [15]. Debido a este tiempo de residencia tan alto, se prioriza la producción de materiales sólidos, minimizando la cantidad de líquidos y gases. Respecto a la velocidad de calefacción, en este tipo de pirólisis son bajas (entre 5-30 °C/min) y al considerar que la temperatura de pirólisis también es reducida, este parámetro no influye en gran medida en la proporción de productos sólidos, líquidos y gaseosos (Crespo J., 2019, p. 12).

Como antecedentes en relación al reciclado de plásticos para generar combustibles, los primeros estudios los encaró el empresario japonés Akinori Ito el año 2011, quien busco un proceso para producir diésel a partir de los residuos plásticos y patento un equipo, denominado “Blest Machine”, que permite procesar polietileno, poliestireno y polipropileno, pero no botellas PET, logrando convertir un kilogramo de plástico en un kilogramo de combustible con solo un kilovatio de energía [UPSACL (2015)](Rejas L. et al., 2015, p. 636).

No obstante, hasta el momento no se ha visto ninguna empresa a nivel mundial que comercialice combustibles vehiculares tales como diésel derivado de pirólisis de plástico y menos aún que comercialice gasolina derivada del plástico. La gran mayoría de empresas mencionadas solo producen combustibles industriales de bajo valor para uso energético, o como materia prima “feedstock” para otros procesos petroquímicos, en cuyo caso su valor se asimila a los crudos del sector petrolero (Calderón F., 2019, p. 3).

Los diferentes productos de la pirolisis que se obtienen de acuerdo con la temperatura de condensación controlada serán en función al tiempo de paso en el intercambiador de calor, donde el gas de síntesis se transporta de una fase gaseosa a líquida. El producto de pirolisis se conforma por gas de síntesis donde se obtendrá una fase condensable con el fin de obtener un producto líquido por medio de un intercambiador de calor y refrigerante es necesario tener en cuenta que la fracción líquida obtenida contiene agua como subproducto que disminuye el poder calorífico por esta razón se hace uso de intercambiador de calor conectados en serie (1) (Carmona Y. & Espinoza J., 2024).

Esto se resume en la conversión de los plásticos en combustible líquido mediante su pirólisis y posteriormente condensando el hidrocarburo resultante (Salazar D. et al., 2024, p. 103).

Para el desarrollo del objetivo general de investigación Evaluar la viabilidad económica del uso de botellas de plásticos desechables de tereftalato de polietileno (PET) en combustible líquido mediante el proceso de pirólisis, el mismo, se sustentará con los siguientes objetivos específicos:

- Establecer un prototipo como forma de obtención de combustible a partir del plástico desechable mediante el proceso de pirólisis

- Relacionar la cantidad de combustible obtenido con el peso de residuos plástico en cada uno de los batch
- Detallar los residuos secundarios provenientes del proceso de pirólisis

Se debe de considerar que “a una temperatura de pirolisis de 400 °C, y media hora de tiempo de reacción, los componentes mayoritarios son los productos sólidos, 51,15 %; cuando el tiempo de reacción es de una y dos horas, los productos líquidos son los componentes mayoritarios, 66,27 % y 76,72 % en promedio, respectivamente” (Proaño O. & Crespo S., 2009). Exclusivamente para nuestro caso particular el tiempo de combustión fue muy baja, aproximadamente entre 15 y 20 minutos.

MATERIALES Y MÉTODOS

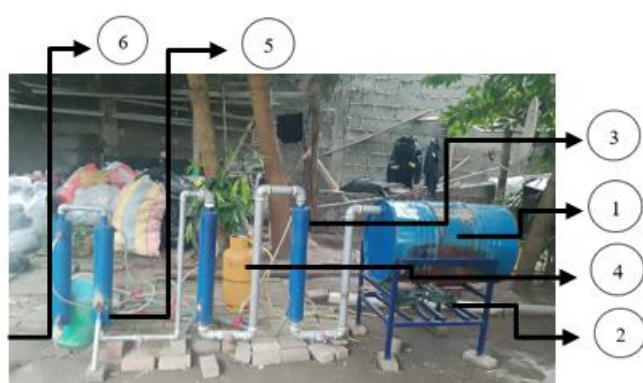
El material utilizado para esta investigación son residuos plásticos de tereftalato de polietileno comúnmente utilizados en botellas de plásticos para bebidas, es un material de reciclaje. “Quiminet (2005) concluye que se reconoce con el numero “01” o también utilizando las siglas PET, cercado por tres flechas en la base de los envases fabricados con este material, según el procedimiento identificación creado por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI)”(Bolaño J., 2019, p. 17).

Pesado en balanzas electrónicas. Cortado manualmente en varias partes para su utilización en el digestor. Debido a esto, se tiene varios pesos en diferentes batch. Desechando las tapas que son de otro material polimérico.

El equipo para realizar el proceso de pirólisis, consta del siguiente diseño de acuerdo a la figura 1

Figura 1

Equipo de pirólisis y condensadores



Entre los siguientes componentes, se encuentran: 1.- Un tanque de 55 gal, 2.- Dos quemadores, 3.- Cuatro intercambiadores tubulares, 4.- Un tanque de 14 Kg de gas propano, 5.- Una bomba centrífuga de ¾ Hp-110 voltios, 6.- Salida de combustible y gases.

Es de mencionar que los condensadores están contruidos con tubos de 6 plg. hierro negro por donde circula el agua helada y en su interior tubo galvanizado de 2 plg. por donde circula el gas proveniente del digestor, con altura de 80 cm, y 60cm. Las demás tuberías que

componen a este prototipo son tuberías y accesorios galvanizado de 2 plg. y 1plg.

Adicionalmente hielo para mantener una temperatura de 14 °C el agua de recirculación en los intercambiadores, corriente eléctrica 110 voltios, un pirómetro para el control de temperatura en el tanque abastecedor de residuos plásticos, un extintor como medio de seguridad. Finalmente, una botella de ½ litro para la recepción de combustible líquido

Los métodos utilizados en esta investigación se anotan los siguiente:

- El método cuantitativo. – Permite realizar y relacionar la cantidad de combustible obtenido, la cantidad de residuo (coque), la cantidad de gas no condensado con respecto a la cantidad de residuos de plásticos consumido, calcular el rendimiento en rendimiento en porcentaje mediante la siguiente ecuación.(Angulo & Torres, s. f., p. 47)

$$\% \text{Rend. comb.} = \left(\frac{\text{Masa comb. g}}{\text{Masa de plástico g}} \right) * 100\%$$

- El método experimental y estadístico. - Este permite relacionar el proceso de obtención de combustible mediante el proceso de pirólisis y realizar un análisis de acuerdo a la temperatura y tiempo de ensayo.

Para este proceso, se considera la densidad del PET, promedio de 1,4 g/cm³. Densidad del coque, 1.2 g/cm³ (Arizaga I. & Escalante J., s. f., p. 45).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez concluido los seis procesos para la obtención de combustible a partir de plásticos de botellas desechables, se procede a llenar la siguiente tabla 1. En cada uno de los procesos se tiene la temperatura máxima alcanzada.

Tabla 1

Valores de proceso

N° Proceso	Masa in. (Kg)	Combustible (ml)	Coque (Kg)	Gas (ml)	Temp. máx (°C)
1	6,3	4,5	4,1	1093,1	420
2	10,0	10,6	5,5	2527,5	450
3	10,9	16,1	6,2	2588,7	460
4	11,3	15,4	7,4	1917,9	455
5	11,3	13,7	8,1	1336,3	450
6	11,1	15,1	7,0	2087,3	450

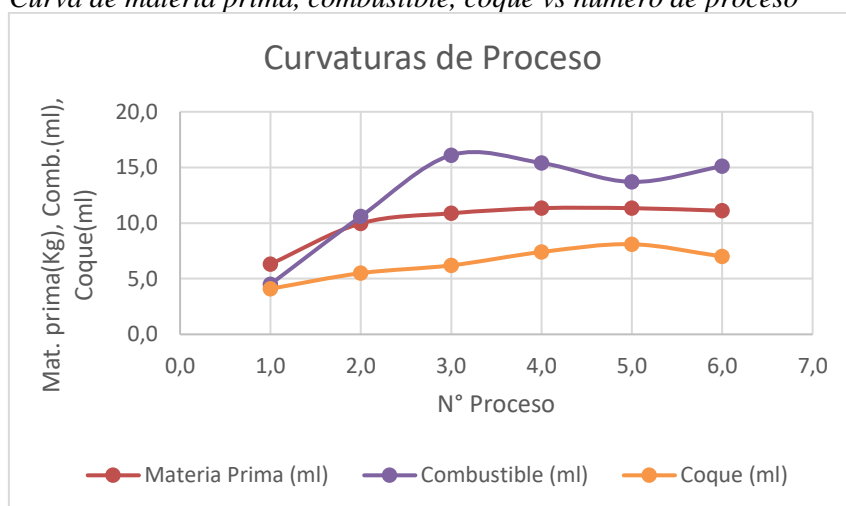
Se realiza también los rendimientos de combustibles, rechazo de combustión, coque y porcentaje de gas que se escapa por la parte de la tapa superior del tanque y gases que no son condensados.

Tabla 2
Valores de proceso

N° Proceso	Combustible (%)	Coque (%)	Gas perdido (%)
1	0,1	75,7	24,2
2	0,1	64,4	35,5
3	0,2	66,5	33,3
4	0,2	76,1	23,7
5	0,2	83,3	16,5
6	0,2	73,5	26,3

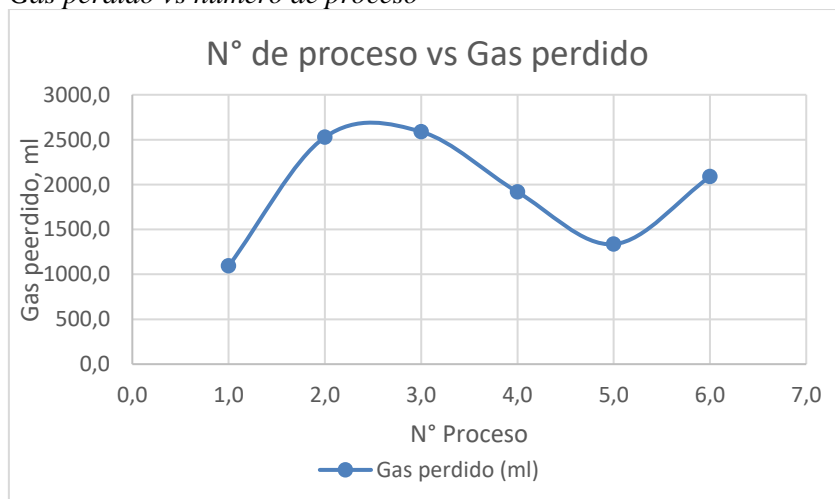
Finalmente, se realizan diferentes curvas para una mejor visualización y poder realizar los respectivos análisis de la situación que involucra el proceso plástico mediante el proceso de pirólisis. Entre ellas, la curva de materia prima, combustible, coque vs número de proceso, figura 2.

Figura 2
Curva de materia prima, combustible, coque vs número de proceso



Y finalmente, la curva del gas que se puede perder en cada uno de los procesos

Figura 3
Gas perdido vs número de proceso



Con temperatura promedio de 453 °C en los cuatro últimos procesos de la tabla 1, se observa en la figura 2, que el ingreso de materia prima guarda mucha relación del coque obtenido con la cantidad de combustible de 14,2 ml obtenido, con la cantidad promedio de masa ingresada al tanque, 10,9 Kg., se encuentran en la mayor parte paralelas. Es posible que puedan ingresar más material plástico en el tanque reactor.

El corte de la materia prima se realizó de forma manual con tijeras y disco de corte. También se observa en la figura 3, un alto desperdicio de gas que se escapa por la tapa de ingreso de material de plástico y que sale en la última etapa de enfriamiento, debido a la falta de condensación.

El tiempo promedio entre proceso es de 10 minutos, desde que se tiene el tanque lleno y se enciende el quemador hasta que llega a consumirse totalmente el plástico, quedando en la cámara residuo como el coque y obteniéndose combustible. El consumo de gas propano es bajo, aproximadamente 1 Kg/proceso, el consumo de corriente de una bomba de monofásica de ¾ Hp con 110 voltios y 4,8 amperios. Lo más costoso es mantener en recirculación del agua helada a una temperatura de 14 °C, porque se utilizó dos marquetas de hielo cuyo costo unitario es de 12 dólares.

La presente investigación ayuda a tener una mejor visualización de obtener combustible a base de botellas de plásticos residuales, en la que se determina una variable muy importante en este proceso, la temperatura de condensación, la forma de poder condensador totalmente los gases que provienen del tanque de combustión. Para ello tener una buena transferencia de calor en los intercambiadores. Actualmente se tiene una relación de gas perdido por falta de condensación con respecto al combustible obtenido de 152, calculando el promedio en los últimos cinco procesos.

Cabe de mencionar, a base de experiencia se tiene que en intercambiadore de placa de marcas APV, Alfa Laval o Tetra Pak es posible bajar la temperatura de recirculación de agua helada a 3°C. Esto puede realizar una gran mejora en el proceso. Actualmente se tiene 14 °C.

En lo posible si se mejora la pérdida del 27%, que corresponde al promedio de los cinco últimos procesos de la tabla 2, rendimiento porcentual, de gas que se escapa por la tapa de ingreso de material y la perdida de gas por falta de condensación, se podría obtener para 20 Kg de materia prima, 27,5 ml de combustible o un galón (considerando un galón igual a 3785 ml). 10,5 kg de coque, por lo que en ese momento sin lugar a dudas obtener combustible mediante este método sería rentable.

CONCLUSIONES

Concluida las operaciones para la obtención del combustible mediante el prototipo mostrado en la figura 1. Este prototipo sirvió para obtener combustible a partir de plástico desechable, se realizaron los diferentes procesos de pirólisis. En este prototipo, se tiene la

siguiente observación de acuerdo a la revisión de la tabla 1 de valores de proceso. Existe una gran pérdida con respecto al gas producido por la combustión del plástico desechable, con un promedio del 26,6 % de rendimiento porcentual de la tabla 2. Esta deficiencia se debe básicamente al intercambio de calor de los cuatro condensadores y a la fuga de gases por la tapa de alimentación al digestor.

Para el caso de los intercambiadores, la solución será aumentar la transferencia de calor entre los gases provenientes del digestor y la recirculación de agua helada. Para incrementar esta área de transferencia de calor deberá ser instalado 12 cañerías de cobre de 3/8 plg dentro del tubo de 2 plg por donde circulan los gases con la longitud del intercambiador. El éxito de esta operación se fundamenta principalmente en la condensación en su totalidad de los gases que provenientes de la zona del reactor.

La cantidad de combustible obtenido en la tabla 2, en base al rendimiento promedio de los seis procesos se tiene el 0,17 %, coque con un rendimiento promedio de 73,2 %, mientras que de gas perdido se tienen el 26,6%. Se observa, que mientras más baja es la temperatura de calentamiento, mayor es la cantidad de coque y menor es la cantidad de gas obtenido, por tanto, la temperatura en proceso también es una segunda variable a controlar, es decir la temperatura deberá estar promediando los 450 °C. Si se mejora el sistema de condensación y se recupera ese 26,6 % de gas y aumentado la capacidad del reactor, se puede concluir que sin lugar a dudas que este prototipo, problema de estudio como método de obtención de combustible con botellas de plásticos PET, será rentable.

Se debe de tener en consideración que las botellas de desechos son plásticos PET, son polímeros y este tipo de plástico está en el grupo de los termofijos o termoestables, aquellos polímeros que no aceptan ciclos repetidos de calentamiento. “Termoestables. Plásticos que se solidifican al tener contacto con el calor, por lo que no pueden ser refundidos” (Carmona Y. & Espinoza J., 2024)

De acuerdo con la tabla 2, valores de rendimiento, se tiene que como coque un porcentaje promedio del 73,2 %, es un alto porcentaje que se desecha como residuo. Este coque que al final de proceso, sin temperatura elevada en el tanque reactor, se torna frágil, que mediante un golpe se rompe y su fácil desalojo. Este coque es desechable sin uso alguno

REFERENCIAS

- Amar S., Ardilla A., & Barrera R. (2019). *Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos*. 37(2), 308-326.
- Angulo M., & Torres R. (s. f.). *Obtención de combustible líquido, mediante el proceso de pirólisis a partir de residuos plásticos*.
- Arizaga I., & Escalante J. (s. f.). *Propuesta de elaboración de combustible por pirólisis a base de botellas desechadas de tereftalato de polietileno*. 2023.
- Barrera A. (2024, junio 11). *El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)*. <https://www.linkedin.com/pulse/ecuador-le-declara-la-guerra-al-pl%C3%A1stico-torme/>
- Bolaño J. (2019). *Reciclado de plástico PET*.
- Calderón F. (2019). *Validación del Modelo Térmico para un Reactor tipo Horno Rotatorio de Pirólisis de Plástico, a nivel de Planta Piloto PlastiCombustibles*. 12.
- Carmona Y. & Espinoza J. (2024). *Obtención de combustible líquido a partir de tereftalato de polietileno mediante procesos de pirólisis*.
- Crespo J. (2019). *Viabilidad de conversión de plásticos en combustible mediante el calor producido en un parque de colectores Fresnel*.
- López C. & López G. (2022). *Elaboración de combustible para vehículos de combustión interna a partir de las botellas plásticas recicladas de polietileno tereftalato* (2022.^a ed.).
- Proaño O. & Crespo S. (2009). *Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos*. 30, 137-144.
- Rejas L., Carreón B., Ortiz M., Llanes L., & Copa M. (2015). *Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos*. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635-642.
- Salazar D., Pauca R.rchuco, & Cochachi A. (2024). *Obtención de combustible líquido a partir de residuos plásticos*. *Prospectiva Universitaria*, 1, 105-110.
<https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2022.19.1960>