

## OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS PET MEDIANTE PIRÓLISIS CON DIFERENTES MÉTODOS DE COMBUSTIÓN OBTAINING FUEL FROM PET PLASTIC WASTE BY PYROLYSIS WITH DIFFERENT COMBUSTION METHODS

**Autores: <sup>1</sup>Alexsander Alexis Vargas Mamani, <sup>2</sup>Fabiola Del Rocío Apaza Paredes y <sup>3</sup>Jeanfranco Alfredo Ibarra Kocfú.**

<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4207-3000>

<sup>2</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3829-7655>

<sup>3</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2122-2609>

<sup>1</sup>E-mail de contacto: [aavargasm@unjbg.edu.pe](mailto:aavargasm@unjbg.edu.pe)

<sup>2</sup>E-mail de contacto: [fdapazap@unjbg.edu.pe](mailto:fdapazap@unjbg.edu.pe)

<sup>3</sup>E-mail de contacto: [jibarrak@unjbg.edu.pe](mailto:jibarrak@unjbg.edu.pe)

Afiliación: <sup>1\*2\*3\*</sup>Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

Artículo recibido: 26 de Noviembre del 2025

Artículo revisado: 29 de Noviembre del 2025

Artículo aprobado: 2 de Diciembre de 2025

<sup>1</sup>Estudiante de la carrera profesional de Ingeniera Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>2</sup>Estudiante de la carrera profesional de Ingeniera Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>3</sup>Catedrático de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

### Resumen

En el presente artículo se aborda la problemática ambiental generada por la acumulación de residuos plásticos, especialmente los derivados del tereftalato de polietileno (PET), ampliamente utilizados en la industria del envasado. Se destaca que, a nivel mundial y en países como Perú, la generación de basura plástica es significativa y en gran parte no se recicla adecuadamente, contribuyendo a la contaminación de suelos, ríos y océanos. Como solución, se plantea el proceso de pirólisis, un método térmico que descompone los plásticos en ausencia de oxígeno para obtener productos como biocombustibles, gases y cenizas. La investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia del proceso de pirólisis de residuos plásticos PET en la producción de combustible. Para ello, se construyó un reactor casero con una olla a presión y un sistema de condensación que permite recuperar los líquidos y gases generados. Los resultados obtenidos fueron que la combustión a base de leña que tuvo una temperatura de 550 °C, generó 20 ml como máximo en un tiempo de 60 minutos, por otro lado, la combustión a base de gas que tuvo una temperatura de 420 °C generó 15 ml en el mismo tiempo y la combustión a base de cocina eléctrica que tuvo una temperatura 300 °C

género 8 ml de combustible. Para analizar los resultados se utilizó un diseño estadístico completamente al azar que evalúa el impacto de dos variables, como el tipo de combustión que produjo cierta temperatura (°C) y el tiempo del proceso (minutos).

**Palabras clave: Pirólisis, Reactor, Plástico, Tereftalato de polietileno, Temperatura.**

### Abstract

This article addresses the environmental problems generated by the accumulation of plastic waste, especially those derived from polyethylene terephthalate (PET), widely used in the packaging industry. It highlights that, globally and in countries like Peru, the generation of plastic waste is significant, and much of it is not properly recycled, contributing to the pollution of soils, rivers, and oceans. As a solution, we propose the pyrolysis process, a thermal method that decomposes plastics in the absence of oxygen to obtain products such as biofuels, gases, and ash. The research aims to evaluate the efficiency of the PET plastic waste pyrolysis process in fuel production. To this end, a homemade reactor was built with a pressure cooker and a condensation system that allows the recovery of the generated liquids and gases. The results obtained were that the wood-based combustion that had a temperature of 550 °C, generated 20

ml maximum in a time of 60 minutes, on the other hand, the gas-based combustion that had a temperature of 420 ° C generated 15 ml in the same time and the electric stove-based combustion that had a temperature of 300 ° C generated 8 ml of fuel. To analyze the results, a completely randomized statistical design was used that evaluates the impact of two variables, such as the type of combustion that produced a certain temperature (° C) and the process time (minutes).

**Keywords:** Pyrolysis, Reactor, Plastic, Polyethylene terephthalate, Temperature.

### **Sumário**

Este artigo aborda os problemas ambientais gerados pelo acúmulo de resíduos plásticos, especialmente aqueles derivados do polietileno tereftalato (PET), amplamente utilizado na indústria de embalagens. Destaca que, globalmente e em países como o Peru, a geração de resíduos plásticos é significativa, e grande parte deles não é reciclada adequadamente, contribuindo para a poluição de solos, rios e oceanos. Como solução, propomos o processo de pirólise, um método térmico que decompõe plásticos na ausência de oxigênio para obter produtos como biocombustíveis, gases e cinzas. A pesquisa visa avaliar a eficiência do processo de pirólise de resíduos plásticos PET na produção de combustível. Para tanto, foi construído um reator caseiro com uma panela de pressão e um sistema de condensação que permite a recuperação dos líquidos e gases gerados. Os resultados obtidos foram que a combustão a lenha, com temperatura de 550 °C, gerou no máximo 20 ml em um tempo de 60 minutos; por outro lado, a combustão a gás, com temperatura de 420 °C, gerou 15 ml no mesmo tempo, e a combustão em fogão elétrico, com temperatura de 300 °C, gerou 8 ml de combustível. Para analisar os resultados, utilizou-se um delineamento estatístico inteiramente casualizado, que avalia o impacto de duas variáveis, como o tipo de combustão que produziu uma determinada temperatura (°C) e o tempo do processo (minutos).

**Palavras-chave:** Pirólise, Reator, Plástico, Tereftalato de polietileno, Temperatura.

### **Introducción**

El plástico desempeña un papel fundamental en la vida diaria y se encuentra presente en casi todas las industrias, desde el envasado de alimentos hasta la fabricación de productos de higiene, medicina, electrónica y construcción, consolidándose como uno de los materiales más versátiles y demandados en el mundo contemporáneo (Costales, 2024). Sin embargo, esta creciente dependencia de materiales plásticos, especialmente de aquellos de tipo no biodegradable, ha generado una acumulación progresiva de residuos que sobrepasan la capacidad de gestión de los sistemas de tratamiento y reciclaje. En 2019, la producción mundial de residuos plásticos alcanzó los 353 millones de toneladas métricas, situando al tereftalato de polietileno (PET) como uno de los polímeros más ampliamente utilizados y, en consecuencia, uno de los principales contaminantes cuando no recibe un tratamiento adecuado (Barrientos et al., 2024). Este polímero se caracteriza por su alta resistencia mecánica, bajo costo, estabilidad térmica y facilidad de moldeo, cualidades que han impulsado su uso masivo en botellas, envases, fibras textiles y películas plásticas; sin embargo, estas mismas propiedades dificultan su degradación en el ambiente, prolongando su permanencia durante cientos de años (Granados, 2025).

La acumulación de residuos plásticos, especialmente PET, se ha convertido en una problemática global que afecta ecosistemas terrestres y acuáticos. Estudios internacionales han evidenciado que, tras su uso, gran parte de los plásticos terminan en vertederos, mares y ríos, donde se fragmentan en microplásticos capaces de ingresar a la cadena alimentaria y de generar efectos tóxicos en seres vivos, incluidos los humanos. Según Dhaka et al. (2022), la persistencia del PET se relaciona con su

estructura química, compuesta por enlaces éster altamente estables que requieren de condiciones extremas para descomponerse. La situación se agrava por los bajos índices de reciclaje: se estima que solo un 9 % de todo el plástico producido históricamente ha sido reciclado, mientras que el resto es incinerado o permanece acumulado en el ambiente. Esto refleja una crisis ambiental que exige la búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas para el tratamiento y valorización de residuos. En el contexto asiático, particularmente en países como Corea del Sur, China, India y Australia, la demanda de PET continúa en ascenso, pero los procesos de recuperación siguen siendo insuficientes, alcanzando apenas un 42 % de reciclaje, mientras que el 38 % se destina a vertederos y el 20 % a incineración, prácticas que contribuyen directamente a la contaminación del aire, agua y suelo. Esta problemática no es ajena a América Latina: en Perú, por ejemplo, se consumen aproximadamente 950 mil toneladas de plástico cada año, de las cuales solo un 10 % es reciclado adecuadamente (MINAM, 2024).

En Lima Metropolitana y Callao se generan diariamente más de 886 toneladas de basura plástica, y una proporción considerable termina en cuerpos de agua o en botaderos informales. A escala nacional, cada peruano utiliza alrededor de 6,000 bolsas plásticas anuales, evidenciando una cultura de consumo que incrementa la huella ecológica del país. Esta situación también se manifiesta a nivel local: en la ciudad de Tacna se producen cerca de 230 toneladas de residuos sólidos por día, muchos de ellos plásticos que son dispuestos en el Botadero Alto Intiorko, un espacio que abarca 24 hectáreas y que genera impactos ambientales significativos, como la degradación del paisaje, la emisión de gases y la contaminación de suelos (Moreno, 2019; MINAM, 2020). Ante

este escenario, se hace imprescindible explorar alternativas tecnológicas que permitan transformar residuos plásticos en recursos aprovechables. Una de estas alternativas es la pirólisis, proceso termoquímico que consiste en la descomposición de polímeros en ausencia de oxígeno o en condiciones de oxígeno limitado, generando productos sólidos, líquidos y gaseosos según la temperatura, presión y tiempo de exposición. Por lo general, este proceso opera en rangos térmicos entre 400 °C y 900 °C, donde la estructura del PET comienza a romperse, liberando compuestos que pueden condensarse para formar combustibles líquidos o gasificarse para producir energía térmica. La versatilidad de la pirólisis permite convertir un residuo altamente contaminante en combustibles sintéticos con valor energético, reduciendo no solo el impacto ambiental sino también la dependencia de fuentes tradicionales de energía. Además, la pirólisis puede implementarse a pequeña escala mediante reactores artesanales, lo cual la convierte en una estrategia accesible para comunidades con recursos limitados y con alta producción de residuos plásticos.

Si bien existen procesos industriales avanzados para la conversión termoquímica del PET, la investigación experimental a nivel local resulta fundamental para determinar la viabilidad de construcciones caseras que permitan replicar el proceso de manera flexible y económica. En este sentido, el estudio se enfoca en evaluar la eficiencia de un reactor artesanal basado en una olla a presión modificada, sometida a diferentes métodos de combustión, para determinar cómo la temperatura influye en la producción de combustible líquido. La calidad y cantidad del producto obtenido dependen de parámetros estructurales del reactor, de la conductividad térmica, del sistema de refrigeración y de la estabilidad del método de combustión, por lo

que analizar estas variables resulta clave para comprender el comportamiento del PET durante su descomposición. Por consiguiente, la presente investigación se plantea como objetivo evaluar la eficiencia del proceso de pirólisis del tereftalato de polietileno para la obtención de combustible, considerando diferentes tipos de combustión que generan temperaturas variables y evaluando su impacto en la cantidad de combustible producido. Este estudio no solo busca generar conocimiento científico aplicable, sino también contribuir al desarrollo de alternativas sostenibles para la gestión de residuos plásticos en contextos locales y regionales, enfatizando la importancia de la innovación tecnológica y la economía circular como pilares para mitigar la crisis ambiental asociada al PET.

### **Materiales y Métodos**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, orientado a evaluar experimentalmente la eficiencia del proceso de pirólisis del tereftalato de polietileno (PET) para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos. Con el propósito de analizar de manera objetiva la influencia de dos factores determinantes; la temperatura generada por el tipo de combustión y el tiempo de exposición, se implementó un diseño completamente aleatorizado (DCA). Este diseño estadístico permitió comparar los tratamientos de manera independiente y determinar si existían diferencias significativas en el rendimiento de combustible producido bajo las condiciones evaluadas. Para el análisis estadístico se empleó el software Statgraphics, que posibilitó la generación de tablas ANOVA, gráficos comparativos de medias e intervalos de confianza, garantizando una interpretación precisa y validada de los resultados experimentales. El material principal utilizado fue plástico PET proveniente de botellas

recicladas, recolectadas con fines experimentales, asegurando una disponibilidad homogénea del material para evitar variaciones debidas a diferencias en el origen o el grado de degradación del polímero. Se utilizó un total de 5 kg de PET triturado para cada tratamiento, lo que permitió mantener un volumen constante de materia prima en las tres pruebas realizadas. Antes de ser procesado, el PET fue limpiado, secado y cortado en pequeñas piezas para facilitar su degradación térmica y asegurar un calentamiento uniforme dentro del reactor. Este procedimiento de preparación previa es fundamental, dado que residuos de líquidos o etiquetas pueden alterar el proceso termoquímico.

Para llevar a cabo la pirólisis, se diseñaron y construyeron tres reactores artesanales con características idénticas, uno destinado a cada tipo de combustión: gas, leña y cocina eléctrica. La base del reactor consistió en una olla a presión de aluminio con capacidad para 5 litros, seleccionada por su resistencia a altas temperaturas y su cierre hermético, indispensable para evitar el ingreso de oxígeno durante el proceso. En la parte superior de la olla se soldó un tubo de cobre de aproximadamente medio metro de longitud y un diámetro adecuado para permitir el flujo controlado de vapores generados durante la descomposición térmica del PET. Este tubo fue conectado mediante una manguera de gas de medio metro, cuyo uso permitió una unión flexible y segura, minimizando posibles fugas que pudieran afectar el rendimiento o comprometer la seguridad del procedimiento. El sistema de condensación se diseñó para permitir la recuperación del combustible líquido y de los gases condensables. Para ello, el extremo del tubo de cobre fue introducido en un frasco de vidrio resistente al calor, el cual se llenó con agua y hielo para funcionar como un

condensador rudimentario. Este sistema facilitó la rápida disminución de la temperatura de los vapores, provocando su transición de fase y su recolección en forma de aceite pirólitico. El uso de un condensador simple permitió reproducir un proceso de pirólisis accesible en contextos con recursos limitados, aunque manteniendo principios semejantes a los sistemas industriales que emplean intercambiadores de calor o condensadores metálicos de alta eficiencia. El proceso experimental consistió en someter los 5 kg de PET, previamente preparados, a cada tipo de combustión durante un tiempo fijo de 60 minutos. Para el tratamiento con combustión a leña se alcanzaron temperaturas aproximadas de 550 °C, mientras que la combustión a gas produjo temperaturas de alrededor de 420 °C, y la cocina eléctrica generó cerca de 300 °C. Estas temperaturas fueron monitoreadas mediante un termómetro externo de contacto, permitiendo asegurar que los niveles térmicos se mantuvieran dentro del rango establecido para cada tratamiento. La elección de estos tres métodos de combustión respondió a la necesidad de comparar condiciones térmicas distintas y accesibles, ya que representan fuentes de energía comúnmente disponibles en entornos domésticos y rurales.

Durante cada ensayo, se controlaron variables como la posición del reactor respecto a la fuente de calor, la estabilidad de la combustión y la continuidad del proceso, para evitar fluctuaciones bruscas de temperatura que pudieran alterar la despolimerización del PET. Una vez finalizados los 60 minutos de pirólisis, se procedió a medir el volumen de combustible obtenido mediante cilindros graduados, registrando tres repeticiones por cada tratamiento para garantizar confiabilidad estadística. Estos datos constituyeron la base para el análisis en Statgraphics, permitiendo evaluar las diferencias entre las medias y

determinar si la variación observada entre los métodos respondía a efectos reales del tratamiento o a variación aleatoria. En conjunto, la metodología permitió desarrollar un procedimiento experimental controlado y replicable, en el que cada una de las etapas; preparación del material, construcción del reactor, ejecución del proceso térmico y análisis estadístico, fue estructurada para obtener resultados precisos y comparables, aportando evidencia sobre el comportamiento del PET bajo diferentes condiciones de pirólisis.

### **Resultados y Discusión**

Los resultados obtenidos muestran variaciones notorias en la cantidad de combustible líquido generada a partir de 5 kg de residuos plásticos mediante tres métodos de combustión: leña a 550 °C (Combustión 1), gas a 420 °C (Combustión 2) y cocina eléctrica a 300 °C (Combustión 3) durante 60 minutos. Los valores registrados evidencian que el método de combustión con mayor temperatura (leña) produce consistentemente un rendimiento superior frente a los métodos basados en gas y electricidad. En la combustión 1, los valores obtenidos (20, 19 y 19 ml) se mantienen agrupados, lo que refleja una mayor estabilidad térmica y un proceso de pirólisis más eficiente, permitiendo una mayor despolimerización del plástico y, por ende, una mayor cantidad de hidrocarburos condensables. Este comportamiento contrasta con la combustión 2, cuyo rango de 15 a 12 ml sugiere una eficiencia intermedia influida por la menor temperatura del proceso, lo que ralentiza las reacciones endotérmicas asociadas a la ruptura de cadenas poliméricas. Finalmente, la combustión 3 presenta los valores más bajos (8, 6 y 5 ml), demostrando que la energía suministrada por la cocina eléctrica es insuficiente para alcanzar un rendimiento óptimo cuando se trabaja con residuos plásticos de alta densidad energética.



Al comparar la dispersión de los datos, se observa que la combustión 1 posee baja variabilidad, lo que indica un proceso más controlado y un comportamiento homogéneo del plástico bajo condiciones térmicas elevadas. Por el contrario, la combustión 3 presenta mayor variabilidad relativa; esto puede atribuirse a fluctuaciones en la estabilidad térmica y a la incapacidad de mantener una temperatura constante cercana al punto óptimo de pirólisis (400–500 °C). Además, el método eléctrico presenta una transferencia de calor más lenta y menos envolvente, reduciendo la conversión térmica efectiva. Esto confirma que la temperatura es un factor crítico en la producción de combustible líquido, ya que la pirólisis requiere niveles energéticos suficientemente altos para romper enlaces carbono-carbono presentes en el polietileno (PE) y polipropileno (PP), principales componentes de los residuos plásticos domésticos (ver tabla 1):

**Tabla 1.** Cantidad de combustible (ml) obtenido con diferentes tipos de combustión

Combustión	Tiempo (min)	Cantidad de combustible (ml)
1	60	20
1	60	19
1	60	19
2	60	15
2	60	13
2	60	12
3	60	8
3	60	6
3	60	5

Fuente: elaboración propia

Seguidamente, el análisis ANOVA proporciona evidencia estadística de que las diferencias observadas no son producto del azar. Debido a que el valor-P de la prueba F es menor que 0.05, se determina la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de producción de combustible de los tres tipos de combustión con un nivel de confianza del 95

%. Esto implica que al menos uno de los métodos supera de manera sistemática a los otros en términos de rendimiento. En términos prácticos, este resultado respalda que el incremento de temperatura en el proceso mejora considerablemente la eficiencia de pirólisis, lo cual concuerda con estudios previos que señalan temperaturas superiores a 500 °C como óptimas para maximizar la producción de combustibles líquidos derivados de plásticos.

Asimismo, la evidencia estadística sugiere que las condiciones operativas influyen directamente en la cinética de ruptura térmica. El método de gas (combustión 2), aunque más eficiente que la combustión eléctrica, no alcanza los valores producidos por la combustión con leña debido a la diferencia de 130 °C entre ambos procesos. Esto muestra que el rango térmico intermedio favorece una degradación parcial del plástico, generando menores volúmenes de condensado. La combustión eléctrica obtiene los valores más reducidos, lo que confirma que temperaturas por debajo de 350 °C generan una conversión incompleta, predominando residuos carbonosos y fracciones gaseosas no condensables. En consecuencia, los datos respaldan la pertinencia de utilizar fuentes térmicas capaces de sostener temperaturas elevadas para garantizar un proceso continuo, estable y con mejores parámetros de eficiencia energética. Finalmente, este conjunto de resultados permite afirmar que las diferencias entre los métodos de combustión no solo son cuantitativas sino también cualitativas, afectando directamente la composición del combustible producido, su viscosidad y rendimiento energético potencial. La confirmación estadística obtenida mediante ANOVA valida la hipótesis de que la temperatura es el factor determinante en la producción de combustibles líquidos derivados de la pirólisis de residuos plásticos. Este

hallazgo es clave para futuras implementaciones a escala piloto o industrial, donde la selección del método de calentamiento, la estabilidad térmica y el control del proceso serán fundamentales para maximizar la recuperación de energía y reducir el impacto ambiental de los residuos plásticos. (ver tabla 2):

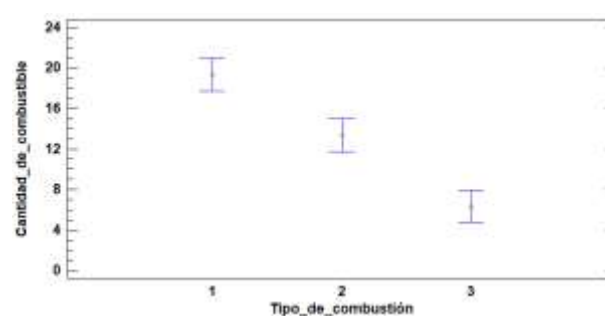
**Tabla 2.** ANOVA para cantidad de combustible por tipo de combustión

Fuente	Suma de Cuadrados	G L	Cuadrado medio	Razón n-F	Valor-P
Entre grupos	254.0	2	127.0	76.20	0.0001
Intra grupos	10.0	6	1.66667		
Total (Corr.)	264.0	8			

Fuente: elaboración propia

El gráfico presentado evidencia de manera clara que el método de combustión basado en leña a 550 °C es el que genera la mayor cantidad de combustible líquido a partir de 5 kg de residuos plásticos procesados durante 60 minutos. Esta superioridad en el rendimiento se refleja en medias claramente diferenciadas y en intervalos de confianza del 95% calculados mediante el método Tukey HSD, los cuales no se superponen con los intervalos de los otros métodos, lo cual confirma estadísticamente que el proceso térmico de mayor temperatura produce resultados significativamente superiores. El método intermedio, correspondiente al uso de gas a 420 °C, presenta una media más baja pero aún consistente, ubicándose en segundo lugar en términos de producción. Finalmente, el método de cocina eléctrica a 300 °C, que opera con la menor energía suministrada, muestra los valores promedio más bajos y la mayor variabilidad

relativa, confirmando que temperaturas por debajo del umbral óptimo de pirólisis reducen de manera notable la capacidad de conversión térmica del plástico en fracciones líquidas condensables. La disposición de los intervalos de confianza evidencia que el proceso de pirólisis no responde de forma lineal a incrementos leves de temperatura, sino que depende de la capacidad del sistema para alcanzar y mantener rangos térmicos suficientemente altos para inducir la ruptura eficiente de las cadenas poliméricas. Por ello, la diferencia entre 300 °C y 420 °C se hace evidente en el rendimiento, pero la brecha entre 420 °C y 550 °C es aún mayor, confirmando que el tramo superior del rango pirolítico produce reacciones más profundas y sostenidas. Este comportamiento coincide con fundamentos termodinámicos y cinéticos que establecen que la despolimerización del polietileno (PE), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET) requiere superar barreras energéticas específicas para maximizar la producción de combustibles líquidos frente a la formación de gases o residuos carbonosos (ver figura 1):



**Figura 1.** Medias y 95.0% de Tukey HSD de la obtención de combustible de diferentes métodos de combustión

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Guillén y Osorio (2021), quienes, en su revisión sistemática sobre la producción pirolítica de combustibles derivados de residuos plásticos, establecen que el rendimiento depende de manera crítica de las condiciones de

operación, especialmente la temperatura y el tiempo de residencia. En su estudio, los autores describen cómo rangos entre 200 y 900 °C, aplicados durante 15 a 180 minutos, pueden generar rendimientos que van desde 12,8 % hasta 97 %, lo cual demuestra que la eficiencia del proceso está estrechamente vinculada al nivel energético suministrado al sistema. Esto guarda una relación directa con el comportamiento observado en la figura 1, donde el método a 550 °C se acerca más a las condiciones óptimas definidas en la literatura para maximizar la generación de hidrocarburos líquidos. Asimismo, lo expuesto por Angulo y Torres (2023) respalda estos hallazgos al documentar que la pirólisis de plásticos como PET y PP suele realizarse alrededor de los 400 °C, temperatura en la cual se logra una despolimerización efectiva que permite obtener combustible líquido de manera controlada. En su investigación, se utilizó un reactor de pirólisis para someter los residuos plásticos a condiciones térmicas específicas, confirmando que la estabilidad térmica y el diseño del reactor influyen directamente en la calidad del producto final. Al comparar estos antecedentes con los presentes resultados, se observa que los métodos que operan por debajo del rango óptimo tienden a producir menos combustible, como ocurre en el caso de la cocina eléctrica a 300 °C, donde la energía aportada no es suficiente para activar plenamente las reacciones pirolíticas requeridas.

En conjunto, la figura 1 y los antecedentes teóricos y experimentales convergen en una conclusión sólida: la temperatura es el factor determinante en la eficiencia de conversión térmica de residuos plásticos en combustibles líquidos. Los métodos que logran temperaturas más altas y estables favorecen no solo mayores rendimientos, sino también una distribución más homogénea de los productos obtenidos, lo

cual se refleja en medias más elevadas, intervalos de confianza más estrechos y diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Este comportamiento confirma que la pirólisis, cuando se realiza en condiciones adecuadas, constituye una alternativa viable y eficiente para la valorización energética de los residuos plásticos.

### **Conclusiones**

Los resultados permitieron concluir que el proceso de pirólisis aplicado al tereftalato de polietileno (PET) utilizando el reactor artesanal construido demostró ser una alternativa técnicamente viable para la obtención de combustible líquido, evidenciando que la eficiencia del proceso depende directamente de las condiciones térmicas generadas por cada tipo de combustión. Se comprobó que las variaciones en la temperatura influyen significativamente en el rendimiento final, dado que, a mayor energía térmica disponible, mayor es la descomposición de las cadenas poliméricas del PET y, por consiguiente, mayor es la cantidad de hidrocarburos condensados en forma de combustible. Este comportamiento coincide con fundamentos teóricos del pirólisis y con estudios previos que indican que el rendimiento del proceso está estrechamente relacionado con la estabilidad térmica del material y con la energía requerida para romper enlaces en los polímeros. Asimismo, se estableció que la combustión mediante leña, alcanzando 550 °C, fue la más eficiente entre las probadas, logrando un máximo de 20 ml de combustible en 60 minutos, lo cual supera a los demás métodos en proporciones claras. Este resultado refleja la importancia del nivel térmico en la degradación del PET, pues temperaturas bajas o insuficientes, como las alcanzadas en la cocina eléctrica (300 °C), no permiten una ruptura adecuada de las cadenas



moleculares, produciendo solo 8 ml de combustible en el mismo intervalo de tiempo. La combustión a gas, con una temperatura intermedia de 420 °C, generó 15 ml, lo que confirma la relación proporcional entre temperatura y rendimiento. Dichos hallazgos respaldan estudios como los de Guillén y Osorio (2021), quienes destacan que la producción óptima de combustibles por pirólisis depende directamente del rango térmico empleado.

Por otro lado, el análisis estadístico mediante un diseño completamente al azar permitió verificar que las diferencias en la cantidad de combustible producido no se deben al azar, sino al efecto real del tipo de combustión utilizado. El valor-P altamente significativo ( $<0.05$ ) indicó que existe una diferencia estadísticamente válida entre los métodos, reforzando la conclusión de que la temperatura es un factor determinante en la producción de hidrocarburos líquidos. Esto evidencia que incluso en un reactor artesanal, el control de parámetros térmicos adquiere un papel fundamental. El comportamiento consistente entre réplicas sugiere que la técnica de pirólisis aplicada podría optimizarse mediante ajustes en los materiales del reactor, el sistema de aislamiento térmico y la eficiencia del condensador para maximizar la recuperación del combustible. Finalmente, se concluye que la pirólisis del PET representa un proceso de valorización energética con potencial para contribuir a la gestión sostenible de residuos plásticos, especialmente en regiones donde la acumulación de PET constituye un problema socioambiental relevante. Si bien los rendimientos obtenidos son modestos en comparación con instalaciones industriales, la investigación demuestra que incluso con recursos limitados es posible transformar residuos en fuentes de energía aprovechable. Futuras investigaciones podrán ampliar el

tiempo de exposición, mejorar el diseño del reactor, evaluar catalizadores que incrementen el rendimiento y analizar la calidad fisicoquímica del combustible obtenido. Todo ello permitirá fortalecer la aplicabilidad del proceso como alternativa de reciclaje avanzado y producción de energía en contextos locales..

### **Referencias Bibliográficas**

- Angulo, M., & Torres, R. (2023). *Obtención de combustible líquido mediante el proceso de pirólisis a partir de residuos plásticos* (Tesis de licenciatura). <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26153>
- Barrientos, K., Montoya, M., Gaviria, M., & Gutierrez, J. (2024). *Plásticos: identificando sus impactos socioeconómicos en un mundo en evolución*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/004e39ff-0f4c-4599-92a1-654a58b83cbf>
- Costales, A. (2024). El impacto de los plásticos en nuestra vida diaria. En I. Martínez, N. Millán, & V. Alonso (Eds.), *Transversalizar la Agenda 2030 en la docencia e investigación universitarias* (pp. 63–68). Economistas sin Fronteras. <https://ecosfron.org/wp-content/uploads/2024/03/Transversalizar-A2030-Universidad-1.pdf>
- Dhaka, V., Singh, S., Anil, A., Sunil, T., Garg, S., Samuel, J., Kumar, M., Ramamurthy, P., & Singh, J. (2022). Occurrence, toxicity and remediation of polyethylene terephthalate plastics: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 1777–1800. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01384-8>
- Duarte, J. (2010). *Nuevos desarrollos en la modificación y procesamiento del PET con aplicación en su envase*. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/383>
- Granados, I. (2025). *Incorporación de montmorillonita en películas multicapa de PBAT para envasado de alimentos*.

<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/6771>

- Guillen, F., & Osorio, L. (2021). Producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos: Una revisión sistemática. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/104859>
- Maurya, A., Bhattacharya, A., & Khare, S. (2020). Enzymatic remediation of polyethylene terephthalate (PET)-based polymers for effective management of plastic wastes: An overview. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.602325>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2024). *Minam e Indecopi se unen para luchar frente a la contaminación por plástico en el país*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/961030-minam-e-indecopi-se-unen-para-luchar-frente-a-la-contaminacion-por-plastico-en-el-pais>
- MINAM. (2020). *Tacna: Alrededor de 230 toneladas de residuos se generan diariamente en dicha ciudad*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/307719-tacna-alrededor-de-230-toneladas-de-residuos-se-generan-diariamente-en-dicha-ciudad>
- Moreno, K. (2019). Una mirada a las prácticas de reciclaje: El caso de una asociación de recicladores en Tacna, Perú. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, 7(3), 1–16.
- Rhodes, C. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science Progress*, 101(3), 207–260. <https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Alexsander Alexis Vargas Mamani, Fabiola Del Rocío Apaza Paredes y Jeanfranco Alfredo Ibarra Kocfú.

