



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Producción Pirolítica de Combustible a partir de Residuos
Plásticos. Una Revisión Sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Guillen Atalaya, Flavio Cesar (orcid.org/0000-0002-0908-8550)

Osorio Estela, Lourdes Andrea (orcid.org/0000-0001-7848-4103)

ASESOR:

Dr. Sernaque Aucchuasi, Fernando Antonio (orcid.org/0000-0003-1485-5854)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA — PERÚ

2021

Dedicatoria

A mis abuelos, que en vida estuvieron presentes en los momentos importantes de mi vida, que me dieron la razón de salir adelante y por las promesas que hoy en día pude cumplirla, por ello hoy les dedico este trabajo y sé que están orgullosos desde arriba, protegiéndome en cada paso que doy. A mi madre, por ser la amiga que me ha ayudado a crecer, gracias por estar conmigo en todo momento, por la paciencia que has tenido para enseñarme; por el amor que me das, por los regaños que me merecía y no entendía gracias mamá. Posiblemente en estos momentos no entiendas mis palabras, pero cuando seas grande capaz, quiero que te des cuenta de lo que significas para mí, eres la razón por la cual día a día me esforzaba por el presente y por el mañana, eres mi gran motivación, gracias hija. Dedicamos este trabajo a todas las personas que estuvieron apoyándonos y confiando en nosotros durante toda nuestra carrera universitaria.

Agradecimiento

Agradecemos a nuestro asesor de Tesis, el Dr. Fernando Antonio Sernaque Auccahuasi por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así también por habernos tenido la paciencia de guiarnos durante el desarrollo de nuestra tesis. La Universidad César Vallejo por darnos la bienvenida al mundo universitario, por las oportunidades que nos ha brindado, por su cálido recibimiento y su amplia infraestructura para poder aprender mejor durante nuestro camino como futuros profesionales.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de gráficos y figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	3
III. METODOLOGÍA	13
3.1. Tipo y diseño de investigación	13
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización	13
3.3. Escenario de estudio	15
3.4. Participantes	15
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	15
3.6. Procedimientos	16
3.7. Rigor científico	19
3.8. Método de análisis de datos	20
3.9. Aspectos éticos	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
V. CONCLUSIONES	33
VI. RECOMENDACIONES	34
REFERENCIAS	35
ANEXOS	

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de categorización apriorística.	13
Tabla 2. Criterios selección de artículos potenciales	15
Tabla 3. Condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos.	19
Tabla 4. Características del combustible a partir de los residuos plásticos	24
Tabla 5. Rendimiento de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis a partir de la revisión sistemática	26

Índice de gráficos y figuras

Figura 1. Producción de biocombustible líquido a partir de residuos sólidos urbano.....	18
Figura 2. Biochar como tecnología de emisión negativa.	19
Figura 3. Procedimiento para la revisión sistemática.	24
Figura 4. Temperatura máxima de calentamiento.	29
Figura 5. Tiempo máximo de calentamiento.	30
Figura 6. Tipos de plásticos empleados en la pirólisis.	31
Figura 7. Relación de la temperatura y el rendimiento	35

Resumen

La pirólisis ofrece la valorización de los desechos plásticos obteniendo otros productos con valor agregado, sin embargo, antes de aplicarse esta técnica, debe adquirirse los conocimientos necesarios, por tal motivo se revisaron fuentes científicas con la finalidad de sintetizar la información sobre la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos y servir de sustento para el desarrollo de la tecnología estudiada. Los resultados demostraron que las condiciones de operación como temperatura, tiempo de exposición, equipos y catalizadores determinan el rendimiento de los productos, por lo tanto, se concluye que en temperaturas de 200 a 900 °C con tiempo de 15 a 180 minutos se obtienen rendimientos de 12,8 a 97,0%, donde la pirólisis se realiza en equipos avanzados como reactores y hornos, y en equipos simples como una estufa queroseno, asimismo la mayoría de los autores emplea catalizadores como la zeolita. Con respecto a sus propiedades como el punto de inflamación los valores incluyen desde 30.2 a 44.0 °C, el calentamiento elevado de 41.6 a 49.4 MJ/kg y la densidad de 0.72 a 0.92 g/mL, mientras que en cuanto a la composición se destaca valores mayores en 48.3%, 32.6%, 26.0% de estireno, etilbenceno y tolueno respectivamente.

Palabras Clave: Pirólisis, residuos plásticos, valorización, biomasa.

Abstract

Pyrolysis offers the recovery of plastic waste by obtaining other products with added value, however, before applying this technique, the necessary knowledge must be acquired, for this reason, scientific sources were reviewed in order to synthesize the information on the pyrolytic production of fuel from plastic waste and to serve as a basis for the development of the technology studied. The results showed that the operating conditions such as temperature, exposure time, equipment and catalysts determine the performance of the products, therefore, it is concluded that in temperatures from 200 to 900 °C with time from 15 to 180 minutes are obtained yields of 12.8 to 97.0%, where pyrolysis is performed in advanced equipment such as reactors and furnaces, and in simple equipment such as a kerosene stove, likewise most authors use catalysts such as zeolite. With respect to its properties as the flash point the values include from 30.2 to 44.0 °C, the raised heating of 41.6 to 49.4 MJ/kg and the density of 0.72 to 0.92 g/mL, while in terms of the composition higher values are highlighted in 48.3%, 32.6%, 26.0% styrene, ethylbenzene and toluene respectively.

Keywords: Pyrolysis, plastic waste, recovery, biomass.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación es uno de los más grandes problemas que amenaza el entorno natural, por ello se enlaza con el crecimiento poblacional mediante las necesidades y satisfacciones generando un efecto multiplicador en la producción de desechos, por la misma razón que no son tratados de una manera correcta al no decretar una política en función a la valorización de estos residuos, especialmente de los plásticos cuya producción requiere elevadas cantidades de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural cuyas utilidades son indispensables en el sector industrial (Ferronato y Torretta, 2019).

De esta manera a nivel mundial la producción de plástico consume alrededor del 4% de petróleo y gas como un elemento base (Ragaert, Delva y Van Geem, 2017) lo que a su vez desencadena la generación de altas cantidades de emisiones contaminantes que contribuyen al cambio climático y causan enfermedades como cáncer en los trabajadores de las industrias relacionadas con el petróleo y plástico debido a la exposición crónica (Wang et al., 2020), de tal modo esta situación se agrava porque se generan más de 400 millones de toneladas cada año, un peso similar al aproximado de la población mundial (Mundy, 2019).

Por otro lado, el consumo en los últimos años se ha aumentado drásticamente desde 1,5 millones de toneladas en la década de 1950 hasta en la actualidad alrededor de 12.000 millones de toneladas de basura resultaron en los vertederos y espacios naturales, inclusive tan solo 8 millones de toneladas de plástico son vertidas en los océanos, asimismo se prevé un pronóstico estimado de 33.000 millones de toneladas hasta el 2050 (Wang, 2020). Esta situación sucede porque el 50 % de estos residuos son de un solo uso con bajo costo y accesible a todos los estratos sociales como parte de la vida diaria y de la industria (Gravis, 2017).

La problemática de los polímeros descrita anteriormente se está neutralizando a través de diversas alternativas ambientalmente sostenibles, así el reciclaje

de los residuos plásticos mediante la obtención de combustible a partir de energías térmicas como la pirólisis que cada vez tiene mayor alcance en la cultura científica, por lo que la justificación teórica del presente estudio se enfoca en aportar la referencia necesaria en el ámbito académico de la ingeniería ambiental sobre la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos, debido a que son pocos los estudios sobre la fabricación de productos de valor mediante el pirólisis (Zaman et al., 2017).

De esta manera, la presentación de una alternativa para la gestión de residuos permite conocer las condiciones y parámetros del método más factible para la producción de un combustible no convencional, con la finalidad de motivar nuevas investigaciones tanto en laboratorio como en campo en el Perú que avalen futuras decisiones con respecto a la valorización social, ambiental y económica de los residuos plásticos. Lo cual representa una disminución de las enfermedades derivadas de la contaminación, pues este proceso acelera la degradación del plástico (Thahir et al., 2019) y tiene costos de aproximadamente 2,2 a 20,8 veces más bajos que los precios de mercado existentes del combustible convencional (Fivga y Dimitriou, 2018^a).

En este contexto, el problema general de estudio surge: ¿Cómo es la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos?, los problemas específicos son ¿Cómo son las condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos?, ¿Cómo son las características del combustible a partir de los residuos plásticos? y ¿Cuál es el rendimiento de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis a partir de la revisión sistemática?

En cuanto el objetivo general se enfoca en realizar una revisión sistemática para conocer la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos, asimismo los objetivos específicos se orientan a determinar las condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos, identificar las características del combustible a partir de los residuos plásticos y comparar el rendimiento de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis a partir de la revisión sistemática.

II. MARCO TEÓRICO

La recuperación de residuos plásticos mediante el pirólisis ha surgido como un método de reciclaje químico prometedor para recuperar energía y materiales de este recurso, así diversos autores han investigado sobre el pirólisis:

Singh, Verma y Singh (2020) tuvieron el objetivo de evaluar la eficacia del catalizador-cenizas volantes y zeolita en la producción de biocombustible a partir de plásticos como un intento de contribuir a la reducción de la contaminación por residuos plásticos en el medio ambiente. Para ello en la metodología experimental se ha construido una planta a escala de laboratorio con tamaño de partícula de alimentación de $3 \pm 1,5 \text{ cm}^2$ a temperatura de pirólisis a aproximadamente $500 \text{ }^\circ\text{C}$ con relación de carga de catalizador de 1:10 a la alimentación y sin catalizador. El resultado muestra que la pirólisis plástica sin catalizadores tiene el rendimiento de fracción líquida más alta con un rendimiento promedio del 24%, mientras que aquellos con catalizador tienen un rendimiento más bajo (16-22%) y otros con zeolita producen una fracción líquida del 22%.

Miandad et al. (2016) tuvo como objetivo analizar el efecto de la temperatura y el tiempo de reacción sobre el rendimiento y la calidad del aceite líquido producido a partir de pirólisis. Para lo cual en la metodología experimental se utilizaron residuos plásticos de tipo poliestireno como materia prima en un reactor de pirólisis discontinuo a pequeña escala piloto a temperatura de $400 \text{ }^\circ\text{C}$ con tiempo de reacción de 75 min. Los resultados evidenciaron que el rendimiento del aceite líquido fue del 76% con características de una viscosidad dinámica de 1,77 mPas, una viscosidad cinemática de 1,92 cSt, una densidad de $0,92 \text{ g/ cm}^3$, un punto de fluidez de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, un punto de congelación de $64 \text{ }^\circ\text{C}$, un punto de inflamación de $30,2 \text{ }^\circ\text{C}$ y un poder calorífico alto de $41,6 \text{ MJ/kg}$ lo cual es similar al diésel convencional.

Suriapparao *et al.* (2020) tuvo el objetivo de realizar una copolización de paja de arroz y bagazo de caña de azúcar con polipropileno y poliestireno usando

microondas, y los vapores de pirólisis se mejoraron catalíticamente usando catalizador HZSM-5. Se investigaron a fondo los rendimientos del producto, la composición y las propiedades del bioaceite de la pirólisis de materias primas individuales y mezclas de igual composición antes y después de la mejora catalítica. Los rendimientos de aceite de pirólisis a partir de polipropileno (82% en peso) y poliestireno (98% en peso) fueron altos en comparación con los de paja de arroz (26% en peso) y bagazo (29% en peso). Aumento catalítico a una velocidad espacial horaria en peso de 11 h⁻¹ como resultado una mayor selectividad a hidrocarburos aromáticos y alifáticos insaturados. Las propiedades del bioaceite mejorado a partir de mezclas de biomasa-polipropileno eran similares a las del fuelóleo ligero con alto poder calorífico (43 MJ / kg), baja viscosidad (1 cP), densidad óptima (0,850 g / cm³) y punto de inflamación (70 ° C). El contenido de oxígeno en el bioaceite de co-pirólisis mejorado catalíticamente fue bajo (<5%) en comparación con el bioaceite de pirólisis mejorado (14-18%) y el bioaceite de pirólisis sin mejora (20-24%).

Ghenai, Alamara y Inayat (2019) tuvieron como objetivo convertir los desechos sólidos en combustibles alternativos y utilizar energía renovable para ayudar en el proceso de conversión química térmica. Para el estudio experimental, se pirolizan partículas de plástico como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y cloruro de polivinilo (PVC) de 3-4 mm de diámetro en un pequeño reactor de laboratorio a presión atmosférica y temperatura de 500 °C. Los resultados muestran que se obtuvo un mayor (87%) rendimiento de aceite de pirólisis con el plástico de poliestireno PS, además los valores caloríficos de los plásticos PS, PE y PP son, respectivamente, 40, 43 y 44 MJ/kg, mientras que la densidad, la conductividad térmica y el punto de fusión de PS son respectivamente 0.96-1.04 g/cm³, 240o C y 0.033 W/m.K.

Miandad et al. (2017) tuvo como objetivo examinar la pirólisis catalítica de varios desechos plásticos en presencia de catalizadores zeolíticos naturales y sintéticos. La metodología experimental se llevó a cabo en un reactor de pequeña escala piloto para realizar la pirólisis catalítica de poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno (PE) y sus mezclas en diferentes proporciones

a 450 °C y 75 min. Los residuos plásticos de PS dieron como resultado el rendimiento de aceite líquido más alto del 54% con zeolita natural y del 50% con catalizadores de zeolita sintética. La mezcla de PS con otros desechos plásticos redujo el rendimiento de aceite líquido, mientras que todas las mezclas del PP y PE dieron como resultado un rendimiento de aceite líquido más alto, además los aceites líquidos de pirólisis de todas las muestras consistían principalmente en hidrocarburos aromáticos con algunos compuestos de hidrocarburos alifáticos.

Xue, Johnston y Bai (2017) tuvo como objetivo pirolizar polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y tereftalato de polietileno (PET) usando zeolita HZSM-5 en un micro-pirolizador en tándem para investigar los efectos del tipo de plástico, el catalizador y el contacto con la materia prima, así como el tipo de gas portador en la distribución del producto. Entre los cuatro plásticos, el PS produjo los rendimientos aromáticos más altos hasta el 85%, mientras que el PE y el PP produjeron principalmente hidrocarburos alifáticos. En comparación con el pirólisis ex situ, el pirólisis in situ de los plásticos produjo más residuos sólidos, pero también promovió la formación de hidrocarburos aromáticos, excepto PS. Durante la pirólisis in situ, el catalizador redujo las temperaturas de descomposición de los plásticos en el orden de PE, PP, PS y PET de mayor a menor. El hidrógeno fue más beneficioso para el PS y el PET que el PE y el PP en términos de reducción del rendimiento de coque y aumento del rendimiento de hidrocarburos.

Das y Tiwari (2018) tuvieron objetivo de estimar las propiedades del aceite derivado de plástico obtenido en diferentes etapas del proceso de pirólisis. La concentración de parafina aumenta al aumentar la temperatura de pirólisis. Por otro lado, el aumento de la temperatura de pirólisis disminuye la concentración de olefinas. El contenido olefínico en la DOP se encontró comparativamente más alto cuando el PP estaba en el alimento. La presencia de polipropileno en la alimentación provocó la producción de DOP con componentes de hidrocarburos de cadena ramificada con alto índice de isoparafina y índice de octano de investigación (RON).6 - C 20). El rendimiento de las fracciones media y ligera disminuyó a medida que la temperatura del

reactor de pirólisis alcanzó el valor máximo (~ 400 ° C). El patrón de desprendimiento de gas depende tanto de la temperatura de pirólisis como de la composición de la alimentación.

Baena-González et al. (2020) tuvo como objetivo desarrollar un proceso pirolítico de recuperación de plástico en el que se recuperan diversos compuestos y materiales del aceite de pirólisis obtenido de los residuos plásticos. La metodología experimental se llevó a cabo en una destilación del aceite de pirólisis condujo a un betún y una fracción destilada. Se encontró que la composición del betún, determinada por análisis de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (SARA) contenía principalmente aromáticos (55,05% en peso) y saturados (33,41% en peso) y tiene un gran potencial como modificador de mezclas bituminosas al disminuir las viscosidades o puntos de ablandamiento de los productos finales. Además, el PS reciclado optimizado se caracterizó por proporcionar un rendimiento del 77,64% y un Mw superior a 53.000 g / mol; este exhibió propiedades térmicas similares a las del PS convencional preparado utilizando fuentes petroquímicas.

Kunwar et al. (2016) tuvo el objetivo de estudiar la viabilidad de la conversión pirolítica catalítica y no catalítica de plástico de polietileno de alta densidad (HPDE) posconsumo de bajo valor en petróleo crudo y su posterior destilación. La traducción de las condiciones optimizadas para la pirólisis catalítica y no catalítica de TGA a un sistema a escala de banco se validó utilizando otro tipo de plástico (HDPE). Los aceites de PC resultantes se destilaron en fracciones de gasolina de motor, diésel n ° 1, diésel n ° 2 y gasóleo al vacío. Se observó un aumento en las fracciones de gasolina y diésel con zeolita y MgCO³ catalizadores, respectivamente. Las propiedades del combustible del destilado de rango diésel (fracción diésel) eran comparables a las del combustible diésel ultrabajo en azufre (ULSD). La demanda del mercado, el crecimiento y el valor de los productos finales determinarán qué proceso, no catalítico o catalítico es el más adecuado para proporcionar la cartera de productos para un escenario particular.

Ma et al. (2017) realizó la pirólisis catalítica de poliestireno de alto impacto retardado por llama (Br-HIPS) en presencia de cinco catalizadores ácidos sólidos diferentes con el fin de eliminar el bromo del aceite de pirólisis derivado. Para lo cual en la metodología se utilizaron catalizadores de zeolita (HY, H β y HZSM-5) y dos sólidos mesoporosos (MCM-41 totalmente de sílice y Al₂O₃ activo). Los resultados mostraron que en presencia de zeolitas HY y H β , se obtuvo una reducción de aproximadamente 50 % en peso en el rendimiento de aceite y un aumento correspondiente en los rendimientos de cera y gas en comparación con la degradación térmica. . La adición de HZSM-5 mostró un menor impacto en la distribución del producto y produjo más aceite en comparación con las otras zeolitas. El catalizador mesoporoso de MCM-41 totalmente de sílice obtuvo el rendimiento de aceite más alto de 67,9 % en peso y redujo el rendimiento de cera a 8,73 % en peso. En términos de la composición del aceite de pirólisis, el HZSM-5 y el MCM-41 totalmente de sílice fueron favorables para producir aromáticos de anillo único más valiosos, tales como tolueno, etilbenceno y cumeno .

Ratnasari, Nahil y Williams (2017) tuvieron como objetivo analizar la pirólisis catalítica de residuos plásticos mediante catálisis para la producción de aceites de hidrocarburos de la gama de gasolina. El proceso catalítico involucró un catalizador mesoporoso en capas sobre un catalizador microporoso como MCM-41 mesoporoso seguido de ZSM-5 microporoso, y se investigaron diferentes relaciones de catalizador MCM-41: zeolita ZSM-5. El MCM-41 y la zeolita ZSM-5 también se usaron solos para la comparación. Los resultados mostraron que al utilizar la catálisis por etapas se obtuvo un alto rendimiento de producto de aceite (83,15 % en peso) a partir de polietileno de alta densidad en una relación MCM-41: ZSM-5 de 1: 1 en el proceso de pirólisis-catálisis por etapas. Los principales gases producidos fueron C₂ (principalmente eteno), C₃ (principalmente propeno) y C₄(principalmente buteno y butadieno) gases. Además, el producto de aceite fue altamente aromático (95,85%). % en peso de aceite) que consistía en 97,72 % en peso de hidrocarburos de la gama de la gasolina.

Zhang et al. (2019) tuvo el objetivo de realizar la pirólisis catalítica de residuos plásticos sobre siete tipos de carbones activados comerciales y caseros en un reactor de tubo fácil, para lo cual se adaptó un diseño experimental compuesto central para optimizar las condiciones de reacción. Los resultados del experimento revelaron que estos carbones activados, aunque generados a través de varios procesos de activación física y química, podrían exhibir un excelente rendimiento catalítico en la conversión de polietileno de baja densidad en combustible para aviones. Se puede concluir que la acidez fue un factor crítico en la determinación de la actividad del catalizador, donde los alcanos y aromáticos del rango del combustible de aviación se vieron favorecidos mediante el uso de carbones activados de acidez fuerte débil y relevante, respectivamente. Además, la producción de combustible para aviones también se logró a partir de residuos plásticos diarios, lo que también fue confirmado por análisis de resonancia magnética nuclear.

Sembiring, Purnomo y Purwono (2018) tuvieron como objetivo realizar la mezcla de plásticos de polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET) mediante pirólisis con catalizador a varias temperaturas de funcionamiento. La metodología se llevó a cabo en un reactor de material de acero inoxidable equipado con un calentador eléctrico programable con el diámetro de 23 cm y la altura de 35 cm, donde se usó una velocidad de calentamiento constante, 1 kg de la materia prima de plástico a la temperatura máxima para PP fueron 400, 450 y 500 °C y para la mezcla PP+PET se utilizó 400° C. Los resultados demostraron un rendimiento de 532.06 g a 810,21 g en temperatura de 500 °C, siendo la mejor temperatura para producir la mayor cantidad de aceites líquidos sin catalizador, sin embargo, para el uso de catalizador es lo contrario. PET es el tipo de plástico que no es adecuado para ser tratado con pirólisis, pero mediante la mezcla de PET con PP como materias primas y el uso de catalizador adecuado el problema se puede minimizar.

Sharuddin et al. (2017) tuvo como objetivo investigar la producción potencial de combustible líquido en función de su diferente composición de residuos plásticos, donde la metodología experimental se realizó en reactor con flujo de nitrógeno de 200 ml/min durante 30 min de tiempo de reacción. También

se estudió la adición de poliestireno (a la composición de NRP para evaluar la mejora de la calidad del líquido. Los resultados evidenciaron que la temperatura más efectiva para optimizar el rendimiento de aceite líquido en la pirólisis plástica estaría en el rango de 500-550 °C para la pirólisis térmica. Sin embargo, con el uso de catalizador en la pirólisis, la temperatura óptima podría reducirse a 450 C y se obtuvo un mayor rendimiento líquido, donde el LDPE produjo el mayor rendimiento de aceite líquido (93,1% en peso), seguido por el HDPE (84,7%) y el PP (82,12%) en pirólisis térmica.

Sekar et al., (2021) tuvo el objetivo de examinar la técnica de pirólisis para extraer aceite plástico de residuos plásticos mixtos no biodegradables, para ello en la metodología se empleó un reactor de tornillo y los compuestos químicos, donde el rendimiento y la emisión se analizaron en diferentes condiciones de carga mediante la realización de una serie de pruebas en un motor diésel monocilíndrico en varias presiones efectivas de frenado de 1,3 bar, 2,6 bar, 3,9 bar y 5,2 bar para las mezclas de prueba, PO (aceite de pirólisis puro) y P25A (25% PO + 75% diésel con 25 ppm). A partir de los resultados obtenidos, la adición de las nuevas nanopartículas aumenta la producción de potencia de frenado en un 35% con una emisión reducida del 45% y del 60% de HC y CO₂ respectivamente. Por otro lado, la emisión de NO_x se redujo en un 15% y un 9% que el aceite plástico puro y el combustible diésel. Además, el uso del aceite de pirólisis al 25% generó efectos positivos tanto en la combustión como en la emisión en comparación con el PO puro.

Es necesario especificar el marco de referencia sobre los productos de pirólisis de residuos plásticos, en primer lugar, los desechos como biomasa sólida representan un recurso energético abundante que existe en todo el mundo, de tal manera los necesarios para el proceso térmico son tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta y baja densidad (HDPE y LDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y otros componentes de desechos plásticos importantes, mientras que los productos de pirólisis resultan de la transformación de los residuos plásticos y mezclas de materias primas de biomasa sólida (KLAIMY et al., 2021).

Estos productos ofrecen ventajas de consumo sobre otros materiales porque son ligeros, flexibles, resistentes, económicos y duraderos, de tal modo el inadecuado manejo de los residuos plásticos condiciona una situación crítica en el deterioro estético de las ciudades por la acumulación de la basura, ocasionando daño a la biodiversidad y potencialmente la salud de las personas y animales (Heinrichs, 2018). Por lo tanto, los plásticos se convierten en materiales ideales para una gran cantidad de aplicaciones, incluidos envases, dispositivos médicos, construcción, transporte.

Sin embargo, la mayoría son de un solo uso, lo cual no es sostenible debido a la durabilidad de los polímeros involucrados que adicionado con una cultura del descarte se conduce a la acumulación de estos desechos plásticos, generando contaminación y la pérdida de recursos valiosos (Narancic & O'Connor, 2019), pues el proceso de degradación de manera física del plástico es a través de la presión, la humedad y el calor del sol, además por sus compuestos químicos, los enlaces entre los monómeros de hidrocarburos son tan fuertes que dificultan el proceso de degradación a temperatura ambiente en 32 °C. Como resultado, es muy difícil ser degradado biológicamente por enzimas y bacterias (Thahir et al. 2019).

Frente a ello surge una alternativa de reciclaje mediante la generación de productos a partir de energías térmicas, como la pirólisis para la valorización de los desechos plásticos obteniendo otros productos con valor agregado (Miandad et al., 2017). Así la demanda de combustible producido a partir de recursos no renovables, en particular de derivados del petróleo, generan elevadas cantidades de emisiones contaminantes como CO₂ y disminución de las fuentes fósiles, además, impacta en las necesidades energéticas de muchos países, pues son necesarias para la realización de sus actividades económicas (Czajczyńska et al. 2017).

Por otro lado, los desechos como biomasa sólida representan un recurso energético abundante que existe en todo el mundo y no son aprovechados adecuadamente. Pues los costos de producción de combustible mediante la pirólisis de residuos plásticos son aproximadamente 2,2 a 20,8 veces más bajos que los precios de mercado existentes del combustible convencional,

indicando su viabilidad económica (Fivga y Dimitriou 2018^b). De esta manera el combustible se produce a través de varias metodologías termoquímicas tales como el pirólisis en forma lenta, rápida y ultrarrápida, gasificación y conversión hidrotérmica, siendo el primer proceso el más utilizado debido a que se obtienen productos sólidos, líquidos y/o vapores en proporciones completamente diferentes (Zurita, 2016).

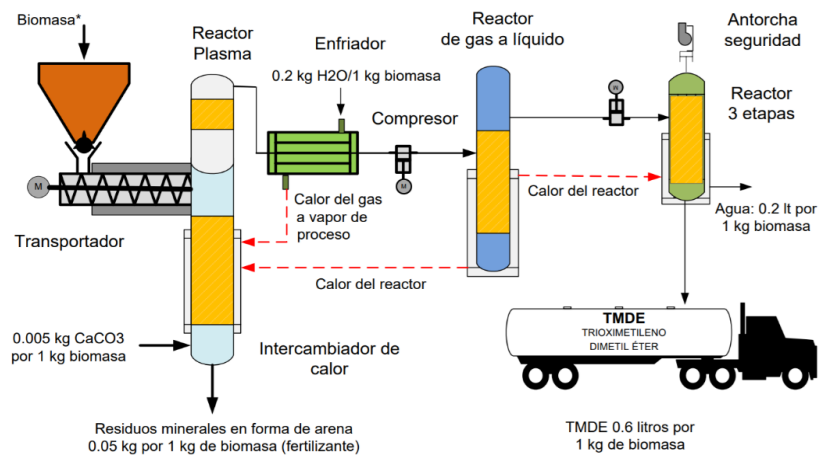


Figura 1. Producción de biocombustible líquido a partir de residuos sólidos urbanos. Fuente:(Open Media Solutions S.L 2020).

En el proceso de la pirólisis en función a la biomasa, se relaciona con las temperaturas que oscilan entre los $400 \text{ }^\circ\text{C}$ a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ en calidades mínimas de oxígeno (Pariona et al., 2020) donde su clasificación de los productos sólidos son biocarbón y ceniza, de la misma manera en productos líquidos son usualmente biocombustibles o bioaceites, y en productos gaseosos que no son condensados son los dióxidos de carbono y otros que se visualizan en la figura 2, esto se puede especificar en las aplicaciones como los productos de energía y remedios en suelo (Aguilar et al., 2020).

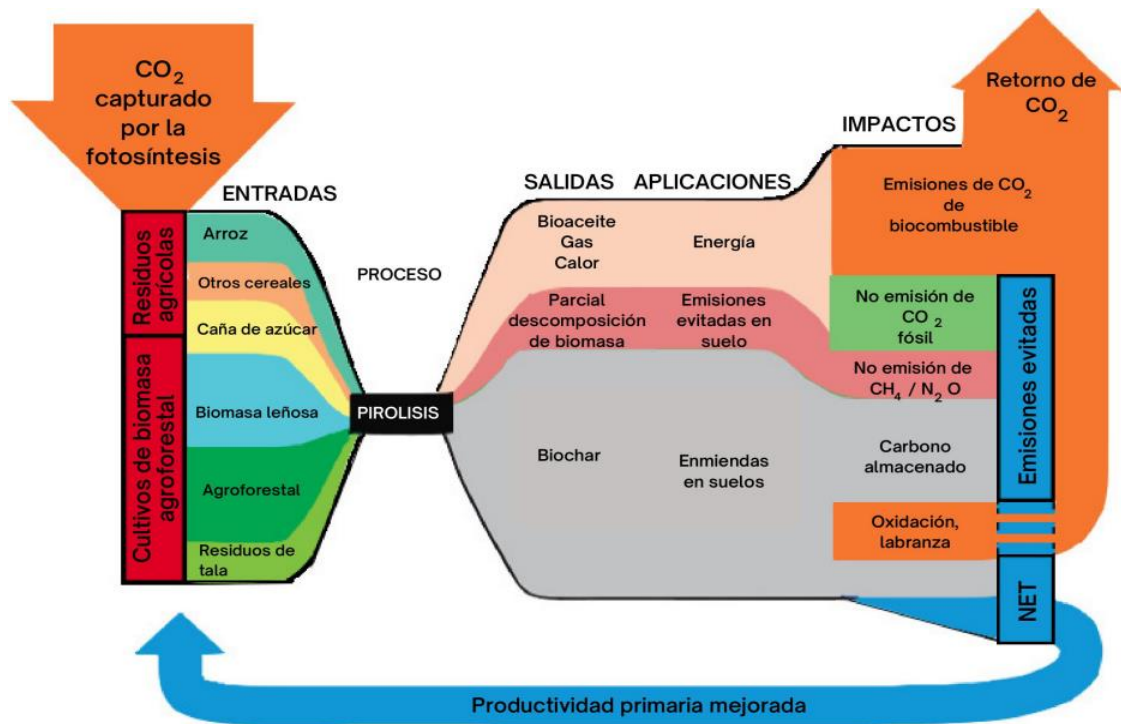


Figura 2. Biochar como tecnología de emisión negativa. Fuente: Woolf et al., 2010 citado por (Pariona-Palomino, Matos Ormeño y Huillca Huanaco 2020)

Por otro lado, el conversión hidrotérmica se basa en agregar materiales a temperaturas altas, sometidos en agua, evitando que genere ebullición, se llegó a visualizar que dentro de los factores del mecanismo y cinético fueron afectados en la reacción de la producción del combustible (Pariona et al., 2020). Entre ellos estas variables forman una reacción profunda en la secuencia y cinética de los efectos termoquímicos y también en el rendimiento, así mismo se presentan como composición del material, temperatura, intervalo de calentamiento, presión del reactor, el uso de catalizadores y la atmosfera presente. (Kambo y Dutta, 2015 citado en Escalante et al., 2016).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación según su finalidad será aplicado porque representan la solución de un problema y ofrece asistencia para resolverlo mediante los hallazgos encontrados. Esto debido a que se dirige a decidir a través de la información científica, implicando los medios tales como técnicas, metodologías, protocolos e innovaciones (Arias, 2018), asimismo es descriptivo debido a que se logrará consensuar resultados de estudios que han aplicado las teorías de pirólisis de residuos plásticos a fin de brindar alternativas de solución ante la problemática (Ñaupas et al. 2018).

En cuanto al diseño es no experimental con metodología narrativo de tópicos porque se llevó a cabo el análisis de datos, la recolección, la observación y la descripción de los fenómenos investigados a un nivel longitudinal ya que los estudios primarios ya sucedieron los fenómenos (Escudero y Cortez 2018), de esta manera, se sintetiza los hallazgos indicando un tópico de los elementos significativos en los microaspectos como categorías y subcategorías (Arias y Alvarado, 2016). En este caso, se tomó en cuenta estudios experimentales que realizaron otros investigadores con respecto a la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos para consensuar ideas y llegar a conclusiones específicas.

3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización

El enfoque cualitativo requiere la categorización de la investigación, el cual es uno de los procesos básicos a tener en cuenta para la distribución o división de los temas a tratar a partir de la organización y recopilación de la información (Herrera et al., 2015). Para ello la construcción de categorías y subcategorías, surge de la formulación de problemas y objetivos de la investigación, así las categorías denotan un tópico en sí mismo, mientras que las subcategorías detallan los tópicos en micro aspectos (Galeano, 2015).

En este caso, el estudio se realiza la elección de diversos artículos alineados al tema de productos de pirólisis de residuos plásticos, por lo tanto, la categorización del estudio se ha realizado en función de los objetivos específicos, pues de cada uno se desprende una categoría de estudio para el orden de presentación de los resultados, además cada categoría presenta subdivisiones para facilitar la explicación de los datos (Hernández-Sampieri y Mendoza 2018).

Tabla 1.
Matriz de categorización apriorística.

Problemas específicos	Objetivos específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
¿Cuáles son las condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos?	Determinar las condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos.	Condiciones operacionales	Temperatura (°C) Equipos Tiempo (h) Catalizador	(Zhang et al. 2020) (Agblevor et al., 2010) (Poerschmann et al., 2013) (Yang, Liu y Lu 2021)
¿Cuáles son las características del combustible a partir de los residuos plásticos?	Identificar las características del combustible a partir de los residuos plásticos.	Características del combustible	Densidad Punto de inflamación Poder Calorífico	(Abbas et al. 2018) (Sun et al. 2018)
¿Cuál es el rendimiento de los combustibles según los tipos de plástico a partir de la revisión sistemática?	Comparar el rendimiento de los combustibles según los tipos de plástico a partir de la revisión sistemática	Rendimiento de los combustibles según los tipos de plástico	Tipo de plástico Porcentaje de rendimiento	(Yunilasari, Sufardi y Zaitun 2020) (Lu et al. 2017)

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudios examinados en la revisión sistemática en su mayoría llevó a cabo el proceso de pirólisis en laboratorios a escala piloto según la metodología por cada autor de los participantes, por lo tanto, esto ayuda al investigador a sumergirse en los elementos que estructuran el fenómeno para poder llegar a su comprensión (Flores y Anselmo, 2019). Esta aproximación al escenario de estudio permite además que los participantes se sientan identificados con el investigador favoreciendo la empatía, confianza y seguridad de los participantes (Guerrero et al., 2017).

3.4. Participantes

Los participantes serán los artículos a inspeccionar para conseguir información de beneficio en la investigación, de esta manera se encontraron en la base de datos digitales a través de búsqueda web para la administración de la información con el fin de enriquecer en la generación de conocimientos nuevos que se presentan en la literatura científica (Espinoza, 2020), Por lo tanto las siguientes fuentes de datos serán ScienceDirect, Pubmed y PROQUEST ya que estos repositorios se catalogan por ser informaciones recientes, confiables, veras, verídico.

De esta manera, las habilidades de búsqueda inicial se registraron una totalidad de 2,094 artículos de referencias, ya que fueron filtrados en base a los objetivos de la revisión, resultando así unos 908 artículos que emprenden a estudios primarios, asimismo en el periodo de elección fueron analizados con objeto de título y resumen dando 93 artículos, también se llegaron a revisar 61 estudios completos llegando a considerar 40 investigaciones que pasaron a revisión sistemática.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos son el análisis documental que consiste en un proceso de revisión de trabajos sobre el tema de investigación para obtener información de la realidad documentada, organizándola mediante un conjunto de estrategias de forma sistematizada usando un registro de la

observación de la investigación (Hernández-Sampieri y Mendoza 2018). En cuanto al instrumento será una ficha de datos como se evidencia en el anexo 1, que definirá las unidades junto con sus características y, sus modalidades que pueden ser cualitativas o cuantitativas (Ñaupas et al., 2018), donde se recolectará información específica necesaria, según los objetivos de la investigación con la finalidad de sintetizar y ordenar la gama de información y a posterior, poder entablar un análisis interpretativo con mayor facilidad.

3.6. Procedimientos

Los procedimientos de la revisión sistemática se separan de cuatro etapas de selección, identificación, inclusión y elegibilidad según Khalil et al., (2016), ya que se realizan criterios como una guía para entender las propuestas de los examinadores y, como importancia principal un modelo para que sigan un proceso de decisiones sobre las reseñas que se adjuntaran en la revisión inicial, por ello la justificación de cada criterio de inclusión se describirá transparentemente en la siguiente tabla:

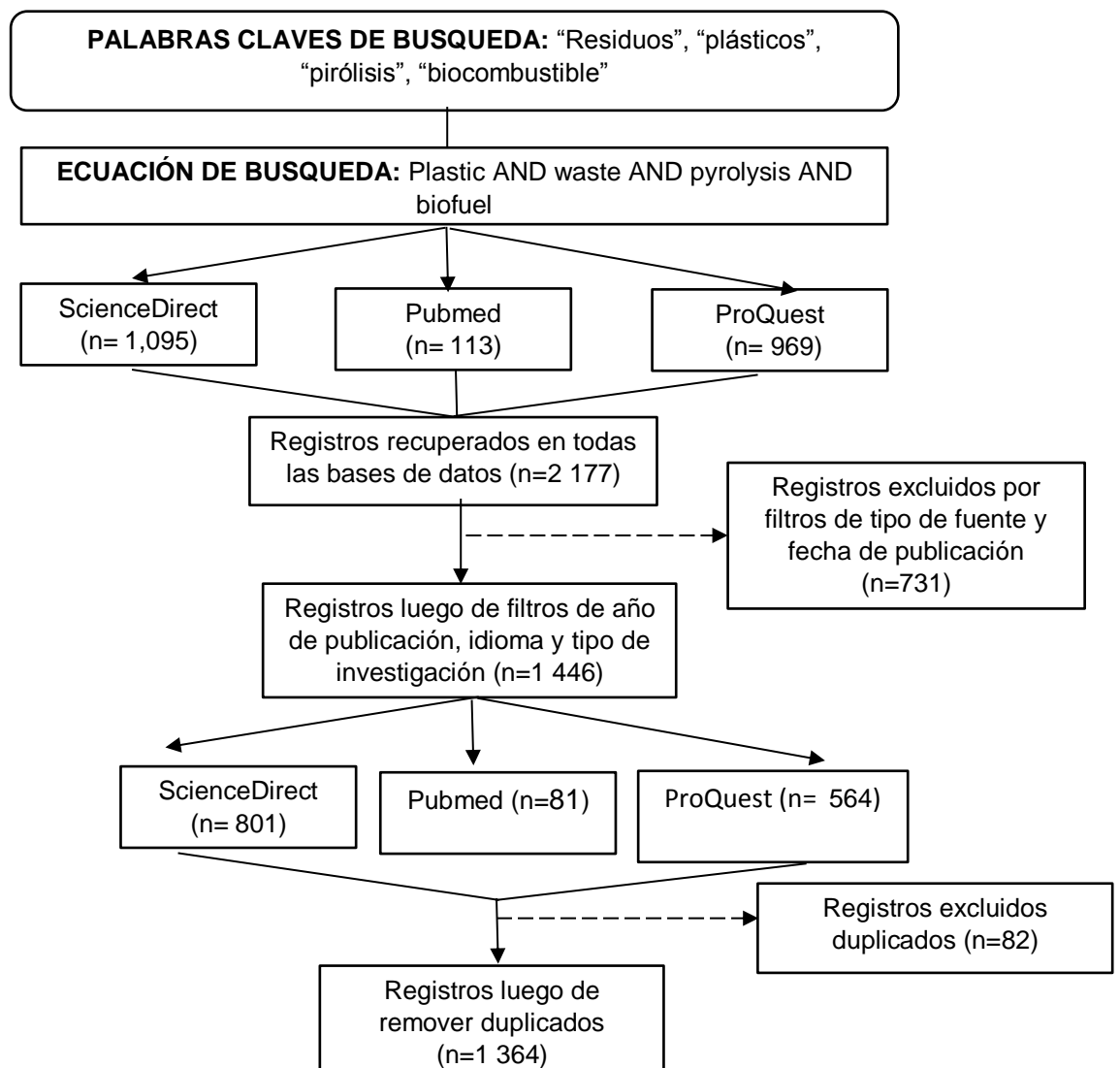
Tabla 2.
Criterios selección de artículos potenciales

Factores	Criterio de inclusión	Criterio de exclusión
Años de publicación	2016-2021	Antes del 2015
Idioma	Artículos redactados en idioma español e inglés	Artículos escritos en un idioma distinto al inglés y español
Tipo de estudio	Artículos primarios o de experimentación	Artículos secundarios o de revisión y otros
Tema de investigación	Producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos	Producción pirolítica de combustible a partir de residuos no plásticos

La ejecución de la revisión iniciara en la primera etapa como una búsqueda limitada de las base de datos utilizando palabras claves “residuos”, “plásticos”, “pirólisis”, “biocombustible” mediante una ecuación de búsqueda (plastic AND waste AND pyrolysis AND biofuel), posteriormente se seleccionó los presentes artículos que comprendieron estas palabras claves como en el título y el resumen para la toma de decisiones en si contienen datos de suma importancia que explican de una manera verídica los

principales indicadores de producción de combustible a partir de residuos plásticos.

En la segunda etapa se llevó a cabo un filtro de información en selección de los artículos más importantes para contribución de la investigación por medio de una lectura generalizada, por ello como más importante se tomaron los aspectos de cómo se lograron las experimentaciones y de qué forma los actores expongan las variables de su resultado. Por último, en la tercera etapa se tuvo como desarrollo el análisis de información a través de las observaciones en base a los descubrimientos incluidos en las fuentes para ser explicados sistemáticamente en los resultados, discusiones y conclusiones de la investigación como los requerimientos importantes, según se muestra en la siguiente figura.



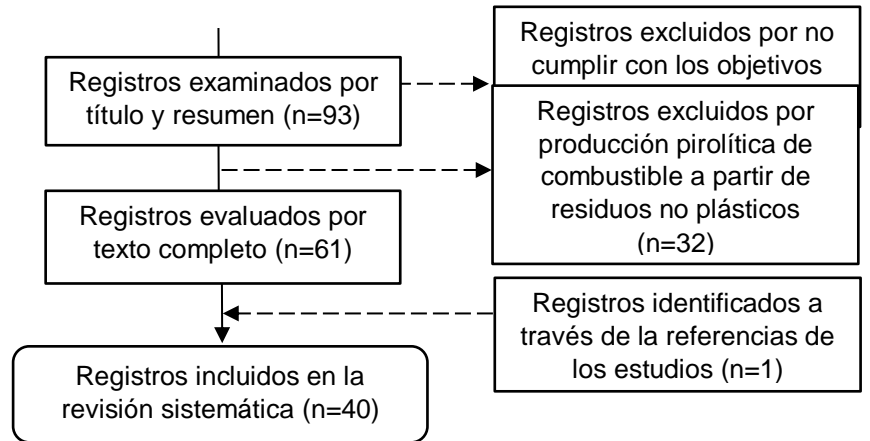


Figura 3. *Procedimiento para la revisión sistemática.*

3.7. Rigor científico

La aplicación estricta del método científico para asegurar un diseño, metodología, análisis, interpretación e informe de resultados robustos e imparciales, esto incluye total transparencia en la notificación de detalles para abordar la complejidad y la naturaleza entrelazada del rigor científico (Viorato y Reyes, 2019). Pues el incumpliendo los aspectos de calidad conducirá a la desinformación con conclusiones erróneas y, en última instancia, puede conducir a hallazgos de mala conducta en la investigación al informar (DePoy y Gitlin, 2018).

Por lo tanto, en primero lugar, la credibilidad se refiere a la generación de confianza en los descubrimientos a través de observaciones con los participantes (Osorio, 2019). De esta manera, se juntó información verídica y de fuentes certificadas como plataformas digitales de investigación que nos brindaran bases de datos y de texto completos de revistas indizadas y especializadas. Mientras que la consistencia lógica se valoró por cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión con la finalidad de mantener una estabilidad de los datos (Chambi, 2017).

Por lo tanto, se asegura que en el presente estudio los datos obtenidos sobre la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos son reales y confiables. Además, la auditabilidad o conformabilidad remite a la neutralidad donde los resultados no estén influenciados por motivación, interés o inclinación del propio investigador (Lara, 2017), así este aspecto se cumple tanto en la presentación como en la interpretación de resultados neutrales, razonables y justos, asegurando la veracidad de los mismos.

Por otro lado, la transferencia se refiere al grado de aplicación de los resultados en otros contextos similares a la investigación, aportando un nuevo conocimiento científico que contribuya al mejoramiento de la calidad de vida (Rodríguez, Tristancho y Ortega, 2015). En este aspecto, la redacción y conclusiones de la revisión sistemática se proyectan como beneficiosos para mejorar la comprensión de producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos y fomentar investigaciones

experimentales en el campo de la ingeniería ambiental con la finalidad de evitar la contaminación por plásticos y demás problemas que conlleve su disposición en la naturaleza.

3.8. Método de análisis de datos

El enfoque de análisis de datos se basará en función a García-Perdomo (2018) que tiene como base el análisis crítico y análisis de sensibilidad para una correcta revisión sistemática y adecuado manejo de información con el fin de minimizar sesgos. Por lo tanto, se obtuvieron datos en base a la matriz de categorización apriorística para la inclusión y exclusión de los artículos con la finalidad de precisar resultados más fiables para la generación de nuevas ideas (Elliott et al. 2017).

Así el análisis crítico permite evaluar la información a través de un razonamiento crítico a fin de minimizar los errores sistemáticos e identificar vacíos en todas las etapas de la investigación (Lockwood et al. 2019). Este método se utilizó en la lectura generalizada de los artículos para descubrir cuáles son los problemas y estimar las conclusiones. Mientras que el análisis de sensibilidad permite suprimir información deshonesto mediante una revisión minuciosa para obtener datos auténticos (Fernandez-Chinguel et al., 2019). Este método se empleó durante la búsqueda de artículos en bases de datos relevantes y fidedignas.

3.9. Aspectos éticos

Uno de los fundamentos más destacado con respecto a la investigación es el pleno cumplimiento y respeto de todos los derechos de los miembros. Donde no debe haber posibilidad de segregación y debe estar libre de cualquier orientación a partir de cualquier fuente que pueda ser deducido como vulnerable en la atracción por el resultado de la revisión (Loaiza y Heredia, 2018). Además, hay que tener en cuenta, aspectos como citar el documento, los creadores, integrantes, agradecimientos, las estrategias de publicación y la propia publicación (DePoy y Gitlin 2016).

De esta manera en el presente estudio se considera el respeto a la autoría de los autores mediante un correcto citado en base al reglamento de la Universidad César Vallejo que establece las conductas éticas en los analistas. Asimismo, la información expuesta es original porque se comprueba en un análisis de plagio mediante el programa de turnitin que realiza un reporte de similitud con otros documentos, de esta manera la investigación está contenida en rangos menores del 25% para demostrar una originalidad de información.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El control de pirólisis puede proporcionar ventajas significativas en la producción de combustibles de alto valor añadido. Para lograr este control, es necesario un conocimiento más profundo tanto de las condiciones operacionales equipo, temperatura máxima, tiempo y catalizador como la materia prima plástica que presenta gran variedad, por lo tanto, cuando las condiciones son óptimas permiten una mejora en el rendimiento y la calidad del bioaceite producido.

Tabla 3.

Condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos.

Autor	Temperatura máxima (°C)	Tiempo máximo (min)	Equipo	Catalizador	Tipo de plástico
Baena-González et al. (2020)	600	30	Reactor continuo	Sin catalizador	PS
Akancha, Kumari y Singh (2019)	600	24	Reactor semi-lote	Sin catalizador	PP
Fekhar, Gombor y Miskolczi (2019)	550	22	Reactor semi-discontinuo	Níquel y Zeolita ZSM-5	LDPE, HDPE, PP, PVC, PS
Xu et al. (2021)	600	180	Horno de mufla	Zeolita ZSM-5	TPO
Li et al. (2020)	600	75	Reactor tubular	Zeolita HZSM-5	TPO
Ghorbannezhad, Park y Onwudili (2020)	700	-	Reactor tándem	Carbonato de sodio y zeolita HZSM-5	PET
Xue et al. (2018)	600	30	Reactor de cama fija	Cloruro de magnesio y zeolita HZSM-5	HDPE
(Kumagai et al. 2016)	650	65	Reactor de tubo	Sin catalizador	PE
Kai, Yang y Li (2019)	515	-	Horno de mufla	Sin catalizador	HDPE
(Yang et al. 2016)	600	60	Reactor de tubo desplegable	zeolita HZSM-5	LDPE
(Özsin y Pütün 2018)	500	50	Reactor de lecho fijo	Ceniza	PET, PS PVC
Mumbach et al. (2019)	525	-	Reactor de lecho fijo	zeolita HZSM-5	PP, LDPE, HDPE, PVC, PET y PS
Miandad et al. (2016)	450	75	-	Sin catalizador	LDPE
Kunwar et al., (2016)	475	-	Horno de mufla	Y-zeolita / MgCO ³	HDPE

Ma et al. (2017)	410	41	Reactor de lote de vacío	Sílice MCM-41	PS
Ratnasari et al. (2017)	500	-	Reactor de cama fija Semi-lote	Sílice MCM-41	PP
Batool et al. (2016)	240	-	Horno de mufla	Cetiltrimetil amonio	LDPE
Anuar et al. (2017)	500	25	Reactor de lecho fijo	Sin catalizador	PE
Xue et al. (2017)	900	30	Reactor de cama fluidizada	Zeolita HZSM-5	HDPE
Miandad et al. (2017)	450	75	-	Sin catalizador	PS, PE, PET
Machiraju et al. (2018)	200	-	Reactor de cama fija Semi-lote	Sin catalizador	PET, PE, HDPE
Budsaerechai et al. (2019)	700	70	Reactor de lote presurizado	Sin catalizador	PS, PP, LDPE, HDPE
Miandad et al. (2018)	450	45	Reactor lote de cama fija	Zeolita HZSM-5	PS, PE, PP y PET
Das y Tawari (2018)	500	30	Horno de mufla	Sin catalizador	PET
Quesada et al. (2019)	500	80	-	Zeolita ZSM-5	LDPE
Zhang, et al. (2019)	550	20	Horno de mufla	Zeolitas-Y	PE
Riedewald et al. (2020)	450	15	-	Zinc fundido	HDPE, PP, PS
Singh, Verma y Singh (2020)	500	-	Estufa queroseno	Cenizas volantes y zeolita	LDPE
Zhang, et al. (2020)	500	60	Horno de mufla	Arena de cuarzo	HDPE Y PP
Fahim et al. (2021)	425	60	Reactor de lote presurizado	Y-zeolita / MgCO ₃	PS
Suriapparao et al. (2020)	450	60	Horno de mufla	Sin catalizador	HDPE
Adeola et al. (2021)	520	-	Reactor de lote de vacío	Sílice MCM-41	PVC
Khairil et al. (2019)	450	60	Reactor de cama fija Semi-lote	MCM-41: ZSM-5	HDPE
Kunwar et al. (2020)	425	60	Reactor de lecho fijo	Zeolita HZSM-5	PP
Samosir et al. (2018)	850	-	Reactor de cama fluidizada	Sin catalizador	PS, PP, PE
Damodhara n et al. (2018)	750	-	Reactor de lecho fluidizado burbujeante	Alúmina activada	PS, PP, LDPE, HDPE
Fadillah et al. (2021)	700	-	Horno de mufla	Arcilla de bentonita	PET
Sharuddin et al. (2017)	850	30	Reactor de cama de doble fluido	Sin catalizador	PE
Joseph et al. (2017)	800	30	Reactor lote de cama fija	Sin catalizador	PE, PP, PS, PET
Lam et al. (2020)	500	60	Horno de mufla	Sin catalizador	HDPE

De acuerdo con la tabla 3 se puede observar que la totalidad de los artículos revisados explican sobre las condiciones operacionales de la obtención de combustible a partir de los residuos plásticos, resultando que mayormente se atribuye a diversas interacciones sinérgicas entre el nivel y duración de calentamiento con la materia prima. De esta manera la temperatura de pirólisis incluye temperaturas de 200 a 900 °C con tiempo de 15 a 180 minutos, sin embargo, en el caso del tiempo del proceso pirolítico solo 28 autores mencionaron datos relevantes, tal como se muestra en la figura 4 y 5 respectivamente.

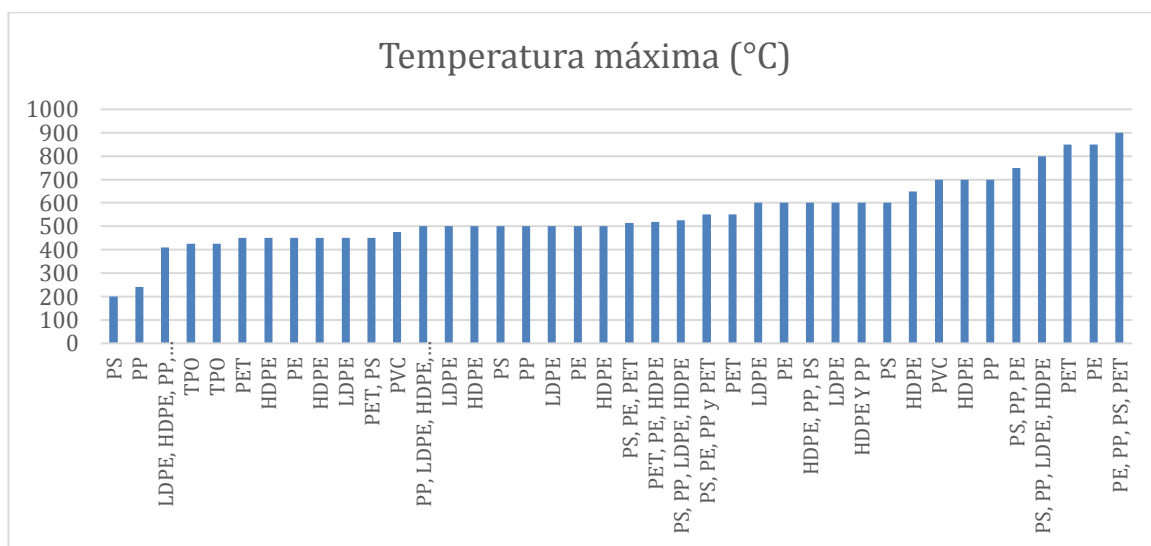


Figura 4. Temperatura máxima de calentamiento.

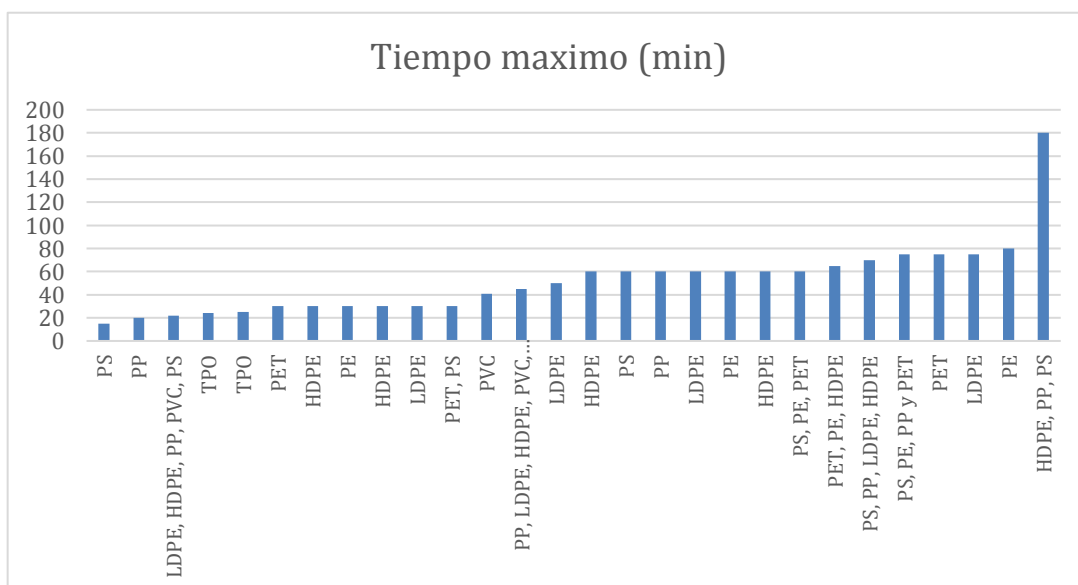


Figura 5. Tiempo máximo de calentamiento.

Por otro lado, respecto a los equipos donde se lleva a cabo la reacción de calentamiento, según las referencias bibliográficas se emplea modelos avanzados como reactores y hornos representados por el 69% y 28% respectivamente, así como también en modelos simples como una estufa queroseno en un 3%. Asimismo, la mayoría emplea catalizadores, es decir, el 63% de los autores, para promover la degradación catalítica con la finalidad de obtener mayor rendimiento de los productos combustibles, donde la zeolita como Y, HZSM y ZSM-5 han ganado un significado principal debido a su estructura porosa.

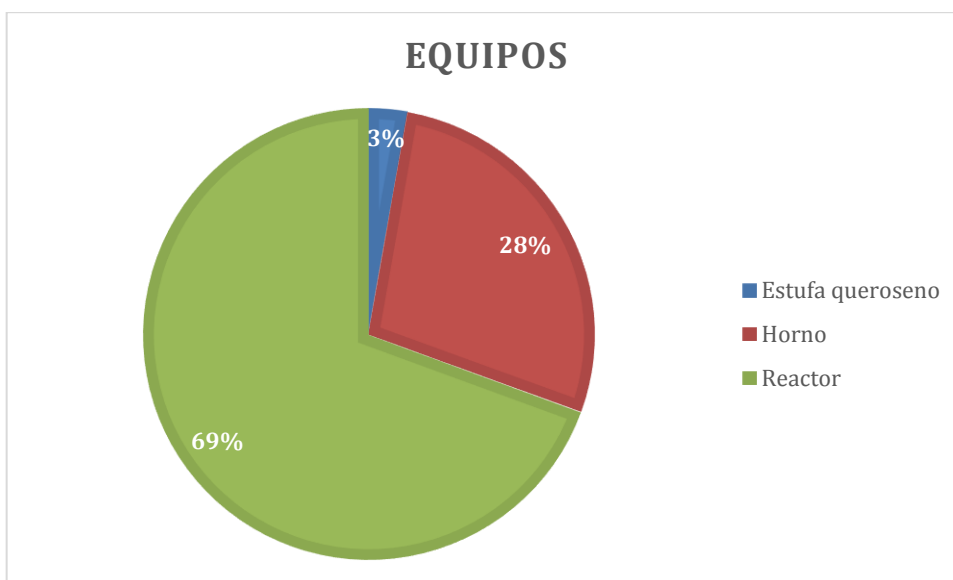


Figura 6. Tipos de equipos utilizados.

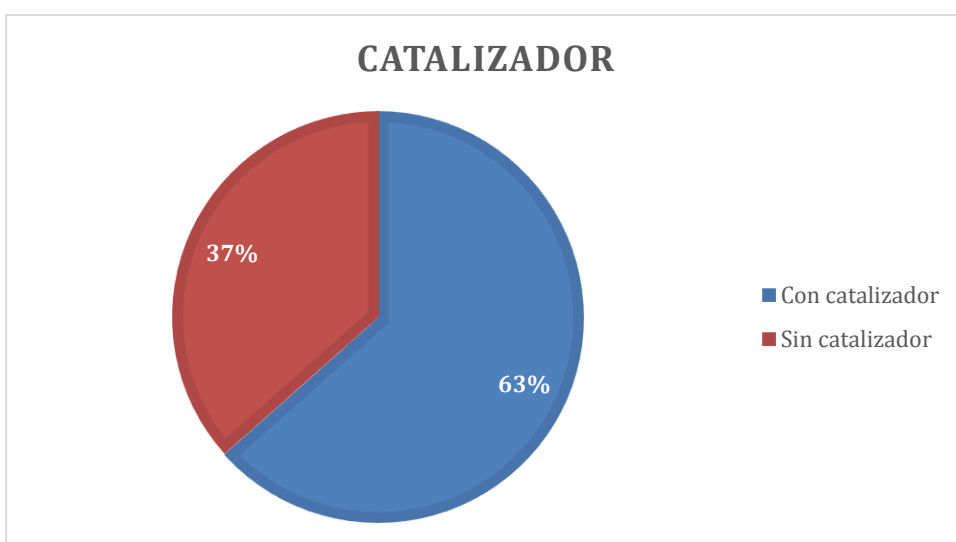


Figura 7. Utilización de catalizadores.

Así de manera general se puede evidenciar que el tipo de plástico para la conversión térmica es variado, entre ellos, el polietileno tereftalato (PET), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polietileno de baja densidad (LDPE), el polietileno de alta densidad (HDPE), el poliolefina termoplástica (TPO), el polietileno (PE) y el policloruro de vinilo (PVC), de los cuales el HDPE resultó ser el más utilizado tal como se evidencia en la figura 6.

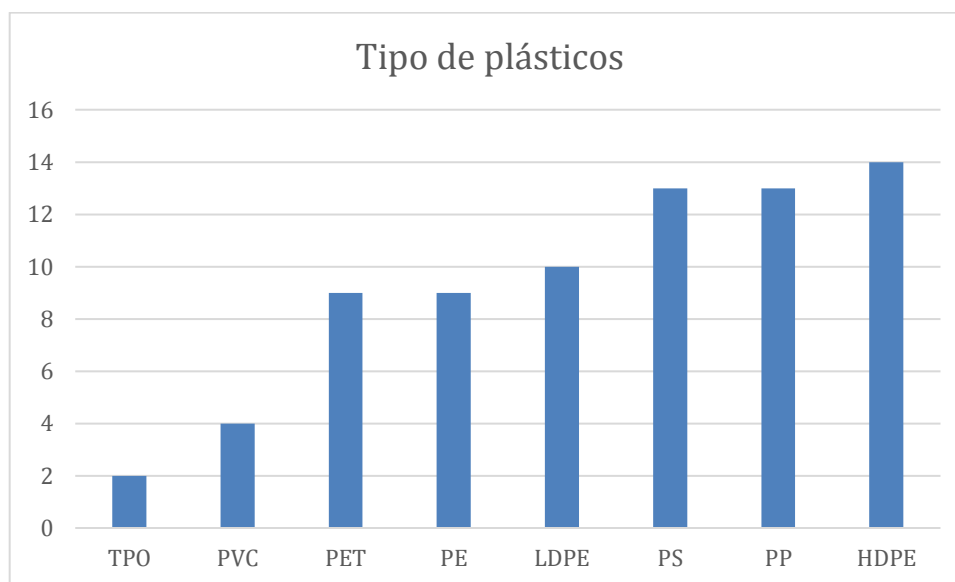


Figura 8. *Tipos de plásticos empleados en la pirólisis.*

De esta manera la discusión de la información recolectada incluye que respecto a la temperatura, Quesada et al. (2019) y Zhang et al (2019) trabajaron con diferentes temperaturas variables de 450 y 550 °C, pero Miandad et al (2016) y Riedewald et al (2020) solo desarrollaron la técnica de pirolización en 450 °C, mientras que Das y Tawari (2018), Singh, Verma y Singh (2020) y Zhang et al (2020) realizaron la pirólisis en temperatura de 500°C, por lo que este parámetro se convierte en el mayor utilizado por los autores. Además, con el fin de modificar el aceite de pirólisis, la utilización de catalizadores también es la más desarrollada.

Sin embargo, otros autores indican que la producción de bioaceites de alto rendimiento y calidad a partir de los residuos lignocelulósicos se pueden realizar a presión ambiente y sin necesidad de reactivos adicionales a través de la pirólisis de biomasa con materias primas ricas en hidrógeno como los

plásticos (Akancha, Kumari y Singh, 2019). Inclusive la pirólisis de varias combinaciones de polímeros sintéticos de HDPE, LDPE, PP, PS y PVC han sido investigados en ausencia de catalizadores. No obstante, Machiraju et al. (2018) informaron de que el pirólisis de PET, PE, HDPE a 200 °C obtenía baja producción de petróleo en un reactor de cama fija Semi-lote.

Por otro lado, la naturaleza de los residuos plásticos es variada, y por ende cuando se utilizan como materia prima en un proceso de pirólisis, los productos que resulten de esta transformación también serán diversos en sus características, de los cuales son más relevantes el punto de inflamación, valor de calentamiento elevado y la densidad respecto a sus propiedades, mientras que en la composición destacan principalmente el estireno, etilbenceno y tolueno.

Tabla 4.
Características del combustible a partir de los residuos plásticos

Autor	Punto de inflamación (° C)	Valor de calentamiento elevado (MJ/kg)	Densidad (g/mL)	Estireno (%)	Etilbenceno (%)	Tolueno (%)
Baena-González et al. (2020)	-	42.3	0.86	33.6	18.7	9.7
Akancha, Kumari y Singh (2019)	40.8	43.8	0.80	-	-	-
Li et al. (2020)	-	49.4	-	-	1.3	9.4
Miandad et al. (2016)	30.2	49.3	0.72	48.3	21.2	25.6
Ma et al. (2017)	31.6	42.3	0.77	41.47	32.6	6.8
Batool et al. (2016)	30.2	41.6	0.92	48.0	21.0	26.0
Xue et al. (2017)	43.0	45.0	0.85	-	-	7.2
Machiraju et al. (2018)	42.8	46.1	0.75	-	-	5.7
Budsareecha i et al. (2019)	44.0	44.8	0.83	-	-	-
Miandad et al (2018)	41.7	44.2	0.79	-	-	-

De acuerdo con la tabla 4 se puede evidenciar que pocos autores en representación de un conjunto de 10 artículos mencionan información relevante sobre las características del combustible a partir de los residuos plásticos que se relacionan con la información presentada en la tabla anterior, pues dependen del tipo y contacto de los componentes, la duración de la pirólisis, la temperatura, la velocidad de calentamiento y la adición de catalizadores. Por lo

tanto, la discusión de la información recolecta incluye que el pirólisis lento se atribuye a la generación de fluidos con baja generación de gases, ya que implica una velocidad de calentamiento lenta con una temperatura por debajo de 500 °C (Ma et al., 2017).

En cambio, a temperaturas más altas con elevada velocidad de calentamiento de hasta 1000 ° C por segundo se atribuye una pirólisis rápida que conduce a líquidos con compuestos moleculares mayores en subproductos gaseosos (Budsareechai et al., 2019). Sin embargo, estos no son apropiados para el uso de combustible y obligan a una purificación adicional para promover el uso como gasolina para combustible de automóviles, combustible diesel, combustible residual, en barcos, fábricas de energía y para la generación de electricidad con valor de mercado general en comparación con el bioaceite de materiales convencionales como residuos agrícolas (Machiraju et al., 2018).

Mientras que, en relación con la utilización de catalizadores, Mumbach et al., (2019) indica que la zeolita puede promover las reacciones de agrietamiento y desoxigenación de moléculas pesadas, lo que resulta en un bio-aceite con menor viscosidad, mayor poder calorífico y alta química estabilidad. Esto concuerda con los resultados de Singh, Verma y Singh (2020), quienes determinaron que la zeolita como catalizador es adecuado para obtener aceite más claro y menos denso, mientras que Joseph et al. (2017) evidenció que la combinación con catalizadores de zeolita mejoró los rendimientos de hidrocarburos aromáticos y alifáticos en el aceite.

Asimismo, la evaluación del efecto sinérgico en la pirólisis rápida de LDPE con catalizador de zeolita mejoró el contenido de hidrocarburos debido al aumento de compuestos alifáticos y aromáticos, resultando en la mejora de la calidad del aceite, cuyo efecto positivo depende del tipo de biomasa de la materia prima (Yang et al. 2016). Por otro lado, las cenizas resultan buenos catalizadores debido a que los óxidos de metales alcalinos presentes en la ceniza catalizan reacciones secundarias reduciendo así la energía de activación durante la pirólisis y pueden favorecer la formación de carbones, agua y productos gaseosos (Özsin y Pütün, 2018).

Con respecto a la densidad y la viscosidad, se encontraron ligeras tendencias crecientes tanto sin catalizadores como con ellos. Sin embargo, los catalizadores tuvieron un efecto ventajoso en ambas propiedades. La densidad y viscosidad del aceite de pirólisis fue de 0,851 g / cm³ y 1,905 mm² / s sin catalizadores, respectivamente, por lo que la densidad podría aumentarse en un 1,99%, mientras que la viscosidad en un 5,49% sin catalizadores (Fekhar, Gombor y Miskolczi, 2019). Está claro que los catalizadores pueden aumentar tanto la densidad como el aumento de la viscosidad del aceite de pirólisis al final del tratamiento.

Recientemente, se ha informado de influencias positivas de la mezcla de plástico en la biomasa lignocelulósica porque mejora el contenido de carbono e hidrógeno y reduce el contenido de oxígeno en las materias primas, que a menudo se combinan con procesos catalíticos (Batool et al., 2016). Por lo tanto, debido a que los compuestos oxigenados pueden causar algunas desventajas a la posible aplicación de aceite de pirólisis de residuos plásticos en calderas térmicas o motores, los catalizadores podrían utilizarse para eliminar el oxígeno.

Por otro lado, las condiciones de pirólisis y la variedad de las materias primas plásticas influyen en gran medida en el rendimiento del producto resultante, pues la temperatura óptima para un rendimiento máximo de aceite depende de las características del plástico, por lo que de acuerdo con la tabla 5, los rendimientos de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis a partir de la revisión sistemática de varios estudios han evidenciado que los aceites líquidos son productos valiosos que se obtienen en el rango de 12,8 a 97,0% en peso a una temperatura de 200 a 900 °C.

Tabla 5.

Rendimiento de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis a partir de la revisión sistemática

Autor	Tipo de plástico	Tipo de combustible	Rendimiento
Baena-González et al. (2020)	PS	Aceite	88.6
Akancha, Kumari y Singh (2019)	PP	Gasolina	87
Fekhar, Gombor y Miskolczi (2019)	LDPE, HDPE, PP, PVC, PS	Aceite	97
Xu et al. (2021)	TPO	Aceite	92.3
Ghorbannezhad, Park y Onwudili (2020)	PET	Aceite	67.9
Li et al. (2020)	TPO	Aceite	65
Xue et al. (2018)	HDPE	Aceite	91.2
Yang et al. (2016)	LDPE	Aceite	80.8
(Özsin y Pütün 2018)	PET, PS, PVC	Aceite	83.2
Riedewald et al. (2020)	HDPE, PP, PS	Aceite	70
Singh, Verma y Singh (2020)	LDPE	Aceite	16
Zhang, et al (2020)	HDPE	Petróleo	15
	PP	Gasolina	89
Miandad et al (2016)	LDPE	Aceite	23.1
Suriapparao et al (2020)	HDPE	Aceite	12.8
Adeola et al. (2021)	PVC	Gasolina	90.8
Das y Tiwari (2018)	PET	Aceite	43.2
Kunwar et al. (2020)	PP	Aceite	58.2
Ma et al. (2017)	PS	Aceite	89.9
Ratnasari et al. (2017)	PP	Aceite	80.5
Zhang et al. (2019)	PE	Gasolina	74.6
Sharuddin et al. (2017)	PE	Gasolina	65.4
Xue et al (2017)	HDPE	Gasolina	86
Lam et al (2020)	HDPE	Aceite	44.4
Miandad et al. (2017)	PS, PE, PET	Aceite	71.1
Kunwar et al., (2016)	HDPE	Aceite	20.6
Fahim et al (2021)	PS	Aceite	83.3
Khairil et al (2019)	HDPE	Aceite	20.8
Batool et al. (2016)	LDPE	Aceite	36
Anuar et al. (2017)	PS	Aceite	38.3
Joseph et al. (2017)	PE, PP, PS, PET	Aceite	30.5
Samosir et al (2018)	PS, PP, PE	Aceite	25.7
Machiraju et al. (2018)	PET, PE, HDPE	Aceite	26.6
Damodharan et al (2018)	PS, PP, LDPE, HDPE	Aceite	24
Miandad et al (2018)	PS, PE, PP y PET	Aceite	18.6

De esta manera, se ha evidenciado que los plásticos que se utilizan en la pirólisis son variados, sin embargo, los que consiguen mejor calidad incluyen polietileno tereftalato, el poliestireno, el poliolefina termoplástica y el policloruro de vinilo debido a que la pirólisis térmica de plásticos de tipo polietileno como el polietileno de baja densidad y el polietileno de alta densidad junto con el polipropileno es problemático para someterse a pirólisis debido a su baja conductividad térmica y la presencia de estructuras de hidrocarburos de cadena cruzada. Además, se encontró que a menor temperatura se obtienen mayor cantidad de producto líquido, sin embargo, esto puede variar por el empleo de catalizadores tal como se muestra en la figura 9.

En este contexto, se ha informado un rendimiento extra de aceite entre 1,42 y 22% en peso y un aumento significativo en el valor calorífico del aceite en varios estudios de copirólisis de biomasa y plástico (Lam et al., 2020). Por ejemplo, un estudio de pirólisis en lecho fijo había demostrado que se generaba menos biocarbón y más bioaceite a partir de madera de pino y polietileno (Anuar et al., 2017), asimismo este mecanismo de interacción fue apoyado por Kunwar et al. (2020) que también estudiaron mezclas de madera de pino y PP. Además, Xue et al. (2018) informaron de que la co-pirólisis de cáscaras de almendras y mezclas de HDPE a 600 °C aumentaba sinérgicamente la producción de petróleo.

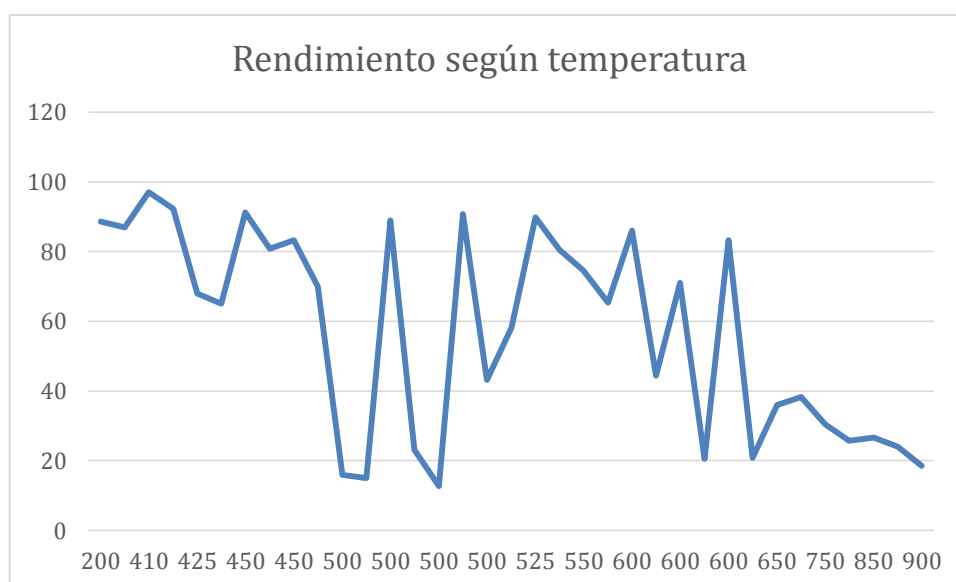


Figura 9. *Relación de la temperatura y el rendimiento*

Por otro lado, respecto a los mayores rendimientos se evidencia como ejemplo en el trabajo de Fekhar, Gombor y Miskolczi (2019), donde se obtuvo un 97% de combustible a partir de diversos plásticos como LDPE, HDPE, PP, PVC, PS empleando como catalizador la zeolita sintética altaque, la cual puede aumentar drásticamente el rendimiento de gas debido a las áreas de poros más grandes y la relación Si / Al más alta. En cambio, Suriapparao et al (2020) consiguió el menor rendimiento de 12.8% a partir de HDPE, lo cual se debe a las interacciones entre la biomasa y los intermediarios plásticos en la fase de fusión, de esta manera el plástico es muy resistente a las altas temperaturas y

tiene poca composición de hidrocarburos condensables, asimismo no se utilizó catalizador en el proceso.

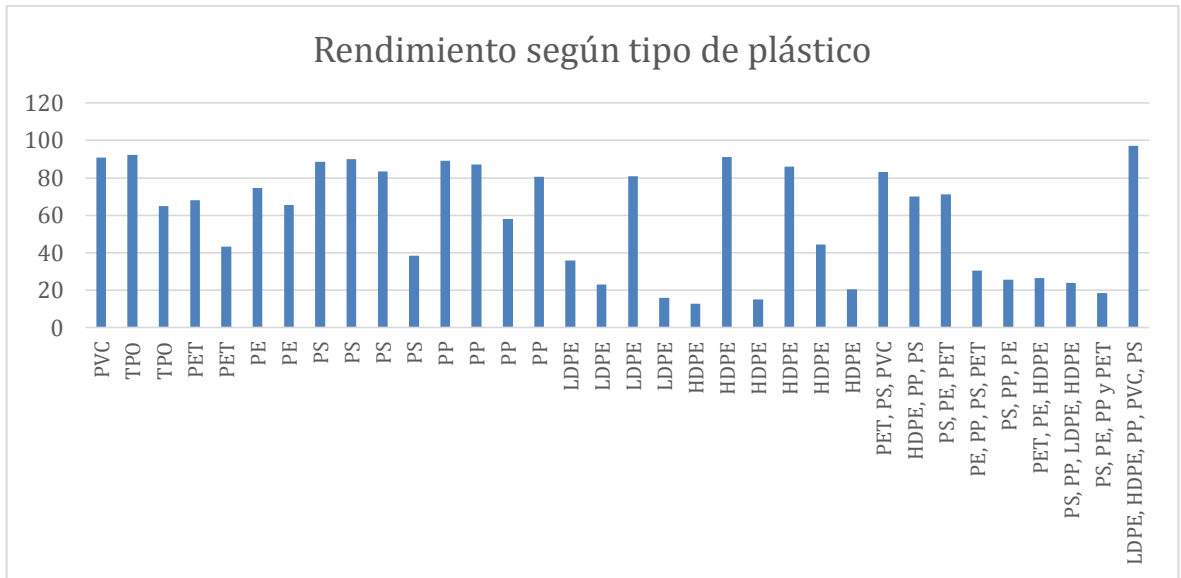


Figura 10. Relación del rendimiento y el tipo de plástico.

V. CONCLUSIONES

- Teniendo como referencia los 40 artículos indexados se concluye que los autores en su mayoría sostienen que existen diversos tipos de residuos plásticos pero el más utilizado es el HDPE para la pirólisis que se desarrolla a temperaturas de 200 a 900 °C con tiempo de calentamiento de 15 a 180 minutos en equipos avanzados como reactores y hornos, así como también en equipos simples como una estufa queroseno. Además, la mayoría emplea catalizadores para promover la degradación catalítica para obtener productos combustibles, donde la zeolita como Y, HZSM y ZSM-5 han ganado un significado principal debido a su estructura porosa.
- Se concluye que las características del combustible a partir de los residuos plásticos son variables y solamente 10 autores precisaron en la especificación del líquido para verificar su calidad, así con respecto a sus propiedades como el punto de inflamación los valores incluyen desde 30.2 a 44.0 °C, el calentamiento elevado en rango de 41.6 a 49.4 MJ/kg y la densidad de 0.72 a 0.92 g/mL. En cuanto a la composición se destaca valores mayores en 48.3%, 32.6%, 26.0% de estireno, etilbenceno y tolueno respectivamente.
- En la mayoría de los hallazgos sobre el rendimiento de los combustibles obtenidos por procesos de pirólisis a partir de la revisión sistemática se concluye que con temperaturas más bajas es donde se llega a realizar mayor rendimiento de los productos de la pirólisis que abarca un rango de 12,8 a 97,0% en peso, sin embargo, cabe recalcar que no todos los investigadores coinciden con esto, ya que para algunos el tiempo es también parte fundamental.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda una gestión diferenciada de los residuos aprovechables y no aprovechables mediante campañas de capacitación y concientización en la población, con nueva dirección de valorización y reciclaje mecánico de los desechos plásticos enfocada en la obtención de productos con valor económico a partir de procesos de pirólisis.
- Se recomienda utilizar la simulación en programas de ingeniería respecto a la producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos con la finalidad de una mejor comprensión del proceso que permita optimizar el funcionamiento y evitar la generación de subproductos.
- Se recomienda realizar un análisis de costo y beneficio para la implementación de una planta de pirólisis generadora de biocombustibles a partir de plásticos mixtos con la finalidad de solucionar la problemática referente a los residuos sólidos en alguna localidad y disminuir los costos de manejo de los residuos sólidos en la separación.
- Se recomienda investigar sobre los gases peligrosos como metano, etano, etileno y propileno generados en las plantas de pirólisis que afectan la salud de los colaboradores en las plantas de pirólisis, así como la búsqueda de alternativas para reducir los riesgos asociados a la salud humana.

REFERENCIAS

- ABBAS, Q., LIU, G., YOUSAF, B., ALI, M.U., ULLAH, H., MUNIR, M.A.M. y LIU, R., 2018. Contrasting effects of operating conditions and biomass particle size on bulk characteristics and surface chemistry of rice husk derived-biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 134, no. xxxx, pp. 281-292. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2018.06.018.
- AGUILAR, A.M.G., ÁVILA, J.M.R., BLANCAS, F.E. y CUETO, M.E.T. del, 2020. Caracterización del proceso de pirólisis de residuos de poliestireno expandido. *Ingenio Magno*, vol. 11, no. 2, pp. 135-146. ISSN 2422-2399.
- AKANCHA, KUMARI, N. y SINGH, R.K., 2019. Co-pyrolysis of waste polypropylene and rice bran wax– production of biofuel and its characterization. *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, no. 4, pp. 933-946. ISSN 1743-9671. DOI 10.1016/j.joei.2018.07.011.
- ANUAR SHARUDDIN, S.D., ABNISA, F., WAN DAUD, W.M.A. y AROUA, M.K., 2017. Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 925-934. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2017.06.046.
- ARIAS CARDONA, A.M. y ALVARADO SALGADO, S.V., 2016. Investigación narrativa: apuesta metodológica para la construcción social de conocimientos científicos. *CES Psicología*, vol. 8, no. 2, pp. 171-181-181. ISSN 2011-3080. DOI 10.21615/3022.
- ARIAS, J., 2018. *Proyecto de Tesis guía para la elaboración*. S.l.: s.n. ISBN 9786120054161.
- BAENA-GONZÁLEZ, J., SANTAMARIA-ECHART, A., AGUIRRE, J.L. y GONZÁLEZ, S., 2020. Chemical recycling of plastic waste: Bitumen, solvents, and polystyrene from pyrolysis oil. *Waste Management*, vol. 118, pp. 139-149. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2020.08.035.

- CHAMBI, E., 2017. Nivel de rigor científico de las tesis de Maestría en Educación, el caso de una Universidad Pública. *Consensus*, vol. 22, no. 1, pp. 37-47. ISSN 1680-3817. DOI 10.33539/consensus.v22n1.991.
- CZAJCZYŃSKA, D., ANGUILANO, L., GHAZAL, H., KRZYŻYŃSKA, R., REYNOLDS, A.J., SPENCER, N. y JOUHARA, H., 2017. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 3, pp. 171-197. ISSN 2451-9049. DOI 10.1016/J.TSEP.2017.06.003.
- DAS, P. y TIWARI, P., 2018. The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel. *Waste Management*, vol. 79, pp. 615-624. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2018.08.021.
- DEPOY, E. y GITLIN, L., 2018. Getting rigorous with scientific rigor. *Carcinogenesis*, vol. 39, no. 1, pp. 21. DOI 10.1093/CARCIN/BGX085.
- DEPOY, E. y GITLIN, L.N., 2016. Research Ethics. *Introduction to Research*, pp. 24-42. DOI 10.1016/B978-0-323-26171-5.00003-3.
- ELLIOTT, J.H., SYNNOT, ANNELIESE; TURNER, T., SIMMONDS, M., AKL, E.A., MCDONALD, S., SALANTI, G., MEERPOHL, J., MACLEHOSE, H., HILTON, J., TOVEY, D., SHEMILT, I. y THOMAS, J., 2017. Living systematic review: 1. Introduction—the why, what, when, and how. *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 91, pp. 23-30. ISSN 18785921. DOI 10.1016/j.jclinepi.2017.08.010.
- ESCALANTE, A., PÉREZ, G., HIDALGO, C., LÓPEZ, J., CAMPO, J., VALTIERRA, E. y ETCHEVERS, J., 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil. *Terra Latinoamericana*, vol. 34, pp. 367-382.
- ESCUADERO, C. y CORTEZ, L., 2018. *Técnicas y métodos cualitativos para la investigación científica* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12501/1/Tecnicas-y-MetodoscualitativosParaInvestigacionCientifica.pdf>.

- ESPINOZA, E., 2020. La búsqueda de información científica en las bases de datos académicas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, vol. 3, no. 1, pp. 31-35. ISSN 2631-2662.
- FEKHAR, B., GOMBOR, L. y MISKOLCZI, N., 2019. Pyrolysis of chlorine contaminated municipal plastic waste: In-situ upgrading of pyrolysis oils by Ni/ZSM-5, Ni/SAPO-11, red mud and Ca(OH)₂ containing catalysts. *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, no. 5, pp. 1270-1283. ISSN 1743-9671. DOI 10.1016/j.joei.2018.10.007.
- FERNANDEZ-CHINGUEL, J.E., ZAFRA-TANAKA, J.H., GOICOCHEA-LUGO, S., PERALTA, C.I. y TAYPE-RONDAN, A., 2019. Aspectos básicos sobre la lectura de revisiones sistemáticas y la interpretación de meta-análisis. *Acta Médica Peruana*, vol. 36, pp. 157-169. ISSN 1728-5917.
- FERRONATO, N. y TORRETTA, V., 2019. Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 6. DOI 10.3390/IJERPH16061060.
- FIVGA, A. y DIMITRIOU, I., 2018a. Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment. *Energy*, vol. 149, pp. 865-874. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/J.ENERGY.2018.02.094.
- FIVGA, A. y DIMITRIOU, I., 2018b. Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment. *Energy*, vol. 149, pp. 865-874. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/J.ENERGY.2018.02.094.
- FLORES, S. y ANSELMO, F., 2019. Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, vol. 13, no. 1, pp. 102-122. ISSN 2223-2516. DOI 10.19083/ridu.2019.644.
- GALEANO, M., 2015. *Diseño de proyectos en la investigación cualitativa*. Medel: Universidad EAFIT. ISBN 958-8173-78-7.

- GARCÍA-PERDOMO, H.A., 2018. Network meta-analysis, a new statistical technique at urologists' disposal to improve decision making. *International braz j urol*, vol. 44, pp. 422-428. ISSN 1677-5538, 1677-6119. DOI 10.1590/S1677-5538.IBJU.2018.03.02.
- GHENAI, C., ALAMARA, K. y INAYAT, A., 2019. Solar Assisted Pyrolysis of Plastic Waste: Pyrolysis oil Characterization and Grid-Tied Solar PV Power System Design. *Energy Procedia*, vol. 159, pp. 123-129. ISSN 1876-6102. DOI 10.1016/j.egypro.2018.12.029.
- GHORBANNEZHAD, P., PARK, S. y ONWUDILI, J.A., 2020. Co-pyrolysis of biomass and plastic waste over zeolite- and sodium-based catalysts for enhanced yields of hydrocarbon products. *Waste Management*, vol. 102, pp. 909-918. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2019.12.006.
- GRAVIS, L., 2017. The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics & Catalysing Action. *Ellen MacArthur Foundation*, pp. 68. ISSN 10980121. DOI 10.1103/Physrevb.74.035409.
- GUERRERO-CASTAÑEDA, R.F., MENEZES, T.M. de O. y VARGAS, M.G.O., 2017. Acercamiento al escenario de estudio fenomenológico en México: relato de experiencia. *Revista Brasileira de Enfermagem*, vol. 70, pp. 885-890. ISSN 0034-7167, 1984-0446. DOI 10.1590/0034-7167-2016-0601.
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C.P., 2018. *Metodología de la Investigación. Las rutas Cuantitativa Cualitativa y Mixta*. S.l.: s.n. ISBN 978-1-4562-6096-5.
- HERRERA RODRÍGUEZ, J.I., GUEVARA FERNÁNDEZ, G.E. y MUNSTER DE LA ROSA, H., 2015. Los diseños y estrategias para los estudios cualitativos. Un acercamiento teórico-metodológico. *Gaceta Médica Espirituana*, vol. 17, no. 2, pp. 120-134. ISSN 1608-8921.
- KAI, X., YANG, T. y LI, Prof.R., R.D., 2019. TG-FTIR-MS study of synergistic effects during co-pyrolysis of corn stalk and high-density polyethylene (HDPE).

- Energy Conversion and Management*, vol. 181, pp. 202-213. DOI 10.1016/j.enconman.2018.11.065.
- KHALIL, H., PETERS, M., GODFREY, C.M., MCINERNEY, P., SOARES, C.B. y PARKER, D., 2016. An Evidence-Based Approach to Scoping Reviews. *Worldviews on Evidence-Based Nursing*, vol. 13, no. 2, pp. 118-123. ISSN 1741-6787. DOI 10.1111/wvn.12144.
- KLAIMY, S., LAMONIER, J.F., CASETTA, M., HEYMANS, S. y DUQUESNE, S., 2021. Recycling of plastic waste using flash pyrolysis – Effect of mixture composition. *Polymer Degradation and Stability*, vol. 187, pp. 109540. ISSN 01413910. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109540.
- KUMAGAI, S., FUJITA, K., KAMEDA, T. y YOSHIOKA, T., 2016. Interactions of beech wood–polyethylene mixtures during co-pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 122, pp. 531-540. ISSN 0165-2370. DOI 10.1016/j.jaap.2016.08.012.
- KUNWAR, B., MOSER, B.R., CHANDRASEKARAN, S.R., RAJAGOPALAN, N. y SHARMA, B.K., 2016. Catalytic and thermal depolymerization of low value post-consumer high density polyethylene plastic. *Energy*, vol. 111, pp. 884-892. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/j.energy.2016.06.024.
- LARA, G.T., 2017. La investigación cualitativa y el estudio de casos: una revisión teórica para su discusión. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores* [en línea], [Consulta: 30 septiembre 2021]. ISSN 2007-7890. Disponible en: <https://www.dilemascontemporaneoseduccionpoliticyvalores.com/index.php/dilemas/article/view/125>.
- LI, Z., ZHONG, Z., ZHANG, B., WANG, W., SEUFITELLI, G.V.S. y RESENDE, F.L.P., 2020. Catalytic fast co-pyrolysis of waste greenhouse plastic films and rice husk using hierarchical micro-mesoporous composite molecular sieve. *Waste Management*, vol. 102, pp. 561-568. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2019.11.012.

- LOAIZA, L.F.M. y HEREDIA, L.P.D., 2018. Aspectos éticos en la investigación cualitativa con niños. *Revista Latinoamericana de Bioética*, vol. 18, no. 34-1, pp. 51-67. ISSN 2462-859X. DOI 10.18359/rlbi.2955.
- LOCKWOOD, C., PORRITT, K., MUNN, Z., RITTENMEYER, L., SALMOND, S., BJERRUM, M., LOVEDAY, H., CARRIER, J. y STANNARD, D., 2019. Chapter 2: Systematic Reviews of Qualitative Evidence. . S.l.: s.n.,
- LU, K., YANG, X., GIELEN, G., BOLAN, N., OK, Y.S., NIAZI, N.K., XU, S., YUAN, G., CHEN, X., ZHANG, X., LIU, D., SONG, Z., LIU, X. y WANG, H., 2017. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, vol. 186, pp. 285-292. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2016.05.068.
- MA, C., YU, J., WANG, B., SONG, Z., XIANG, J., HU, S., SU, S. y SUN, L., 2017. Catalytic pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene over various solid acid catalysts. *Fuel Processing Technology*, vol. 155, pp. 32-41. ISSN 0378-3820. DOI 10.1016/j.fuproc.2016.01.018.
- MIANDAD, R., BARAKAT, M.A., REHAN, M., ABURIAZAIZA, A.S., ISMAIL, I.M.I. y NIZAMI, A.S., 2017. Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. *Waste Management*, vol. 69, pp. 66-78. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2017.08.032.
- MIANDAD, R., NIZAMI, A.S., REHAN, M., BARAKAT, M.A., KHAN, M.I., MUSTAFA, A., ISMAIL, I.M.I. y MURPHY, J.D., 2016. Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Management*, vol. 58, pp. 250-259. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2016.09.023.
- MUMBACH, G.D., ALVES, J.L.F., DA SILVA, J.C.G., DE SENA, R.F., MARANGONI, C., MACHADO, R.A.F. y BOLZAN, A., 2019. Thermal investigation of plastic solid waste pyrolysis via the deconvolution technique using the asymmetric double sigmoidal function: Determination of the kinetic

triplet, thermodynamic parameters, thermal lifetime and pyrolytic oil composition for clean energy recovery. *Energy Conversion and Management*, vol. 200, pp. 112031. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2019.112031.

MUNDY, P., 2019. EI ATLAS DEL PLÁSTICO. . S.I.: Heinrich Böll Stiftung.

ÑAUPAS, H. y PAITÁN, MARCELINO RAÚL VALDIVIA DUEÑAS, JESÚS JOSEFA PALACIOS VILELA, H.E.R.D., 2018. *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. S.I.: s.n. ISBN 9788578110796.

OPEN MEDIA SOLUTIONS S.L, 2020. Plantas catalíticas de biomasa para generación de Biocombustible Líquido. . España:

OSORIO, B., 2019. Criterios de Calidad y Rigor en la Metodología Cualitativa. ,

ÖZSIN, G. y PÜTÜN, A.E., 2018. A comparative study on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with polyethylene terephthalate, polystyrene, and polyvinyl chloride: Synergistic effects and product characteristics. *Journal of Cleaner Production*, vol. 205, pp. 1127-1138. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.09.134.

PARIONA-PALOMINO, J., MATOS ORMEÑO, W. y HUILLCA HUANACO, E., 2020. Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático. *South Sustainability*, vol. 1, pp. e014. DOI 10.21142/ss-0102-2020-014.

RAGAERT, K., DELVA, L. y VAN GEEM, K., 2017. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management (New York, N.Y.)*, vol. 69, pp. 24-58. ISSN 1879-2456. DOI 10.1016/J.WASMAN.2017.07.044.

RATNASARI, D.K., NAHIL, M.A. y WILLIAMS, P.T., 2017. Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 124, pp. 631-637. ISSN 0165-2370. DOI 10.1016/j.jaap.2016.12.027.

- RODRÍGUEZ, M.B., TRISTANCHO, S.L.Z. y ORTEGA, S.P.Q., 2015. La revisión sistemática de la literatura científica y la necesidad de visualizar los resultados de las investigaciones. *Revista logos ciencia y tecnología*, vol. 7, no. 1, pp. 101-103. ISSN 2145-549X.
- SEKAR, M., 2021. Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor. *Journal of Cleaner Production*, vol. 318, pp. 128551. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.128551.
- SEMBIRING, F., PURNOMO, C.W. y PURWONO, S., 2018. Catalytic Pyrolysis of Waste Plastic Mixture. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering* [en línea], vol. 316, no. 1. [Consulta: 16 octubre 2021]. ISSN 17578981. DOI <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/316/1/012020>. Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/2556808125/abstract/C4E21F9CF05A422APQ/4>.
- SINGH, T.S., VERMA, T.N. y SINGH, H.N., 2020. A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study. *Fuel*, vol. 277, no. May, pp. 118176. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2020.118176.
- SUN, C., CHEN, T., HUANG, Q., WANG, J., LU, S. y YAN, J., 2018. Enhanced adsorption for Pb(II) and Cd(II) of magnetic rice husk biochar by KMnO₄ modification. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 9, pp. 8902-8913. ISSN 16147499. DOI 10.1007/s11356-019-04321-z.
- SURIAPPARAO, D.V., VINU, R., SHUKLA, A. y HALDAR, S., 2020. Effective deoxygenation for the production of liquid biofuels via microwave assisted co-pyrolysis of agro residues and waste plastics combined with catalytic upgradation. *Bioresource Technology*, vol. 302, pp. 122775. ISSN 1873-2976. DOI 10.1016/j.biortech.2020.122775.

- THAHIR, R., ALTWAY, A., JULIASTUTI, S.R. y SUSIANTO, 2019. Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. *Energy Reports*, vol. 5, pp. 70-77. ISSN 2352-4847. DOI 10.1016/J.EGYR.2018.11.004.
- VIORATO ROMERO, N.S. y REYES GARCÍA, V., 2019. La ética en la investigación cualitativa. *Revista CuidArte* [en línea], vol. 8, no. 16. [Consulta: 30 septiembre 2021]. ISSN 2395-8979. Disponible en: <http://revistas.unam.mx/index.php/cuidarte/article/view/70389>.
- WANG, Y.L., LEE, Y.H., CHIU, I.J., LIN, Y.F. y CHIU, H.W., 2020. Potent impact of plastic nanomaterials and micromaterials on the food chain and human health. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, no. 5, pp. 1-14. ISSN 14220067. DOI 10.3390/ijms21051727.
- XU, D., YANG, S., SU, Y., SHI, L., ZHANG, S. y XIONG, Y., 2021. Simultaneous production of aromatics-rich bio-oil and carbon nanomaterials from catalytic co-pyrolysis of biomass/plastic wastes and in-line catalytic upgrading of pyrolysis gas. *Waste Management (New York, N.Y.)*, vol. 121, pp. 95-104. ISSN 1879-2456. DOI 10.1016/j.wasman.2020.12.008.
- XUE, X., PAN, Z., ZHANG, C., WANG, D., XIE, Y. y ZHANG, R., 2018. Segmented catalytic co-pyrolysis of biomass and high-density polyethylene for aromatics production with MgCl₂ and HZSM-5. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 134, pp. 209-217. ISSN 0165-2370. DOI 10.1016/j.jaap.2018.06.010.
- XUE, Y., JOHNSTON, P. y BAI, X., 2017. Effect of catalyst contact mode and gas atmosphere during catalytic pyrolysis of waste plastics. *Energy Conversion and Management*, vol. 142, pp. 441-451. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2017.03.071.
- YANG, C., LIU, J. y LU, S., 2021. Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils.

Geoderma, vol. 397, no. September, pp. 115097. ISSN 00167061. DOI 10.1016/j.geoderma.2021.115097.

YANG, J., RIZKIANA, J., WIDAYATNO, W.B., KARNJANAKOM, S., KAEWPANHA, M., HAO, X., ABUDULA, A. y GUAN, G., 2016. Fast co-pyrolysis of low density polyethylene and biomass residue for oil production. *Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 422-429. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.05.008.

YUNILASARI, M., SUFARDI y ZAITUN, 2020. Effects of biochar and cow manure on soil chemical properties and peanut (*Arachis hypogaea* L.) yields in entisol. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 425, no. 1. ISSN 17551315. DOI 10.1088/1755-1315/425/1/012014.

ZAMAN, C.Z., PAL, K., YEHYE, W.A., SURESHSAGADEVAN, SHAH, S.T., ADEBISI, G.A., EMYMARLIANA, RAFIQUE, R.F. y JOHAN, R. Bin, 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *Pyrolysis*, DOI 10.5772/INTECHOPEN.69036.

ZHANG, H., SHAO, J., ZHANG, S., ZHANG, X. y CHEN, H., 2020. Effect of phosphorus-modified biochars on immobilization of Cu (II), Cd (II), and As (V) in paddy soil. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 390, no. li, pp. 121349. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.121349.

ZHANG, Y., DUAN, D., LEI, H., VILLOTA, E. y RUAN, R., 2019. Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy*, vol. 251, pp. 113337. ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.113337.

ZURITA, D., 2016. Pirólisis y gasificación de residuos sólidos de polietilentereftalato. ,

Anexo 2. Artículos de recolección de información

Nº	IDIOMA	AUTOR	AÑO	PLATAFORMA INDEXADA	ENLACE
1	INGLÉS	Miandad et al	2016	PUBMED	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27717700/
2	INGLÉS	Suriapparao et al	2020	PUBMED	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31986334/
3	INGLÉS	Dan Xu	2021	PUBMED	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33360310/
4	INGLÉS	Singh, Verma y Singh	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120311728
5	INGLÉS	Das y Tiwari	2018	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18305087
6	INGLÉS	Kunwar et al.	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544216307976
7	INGLÉS	Ma et al.	2017	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382016300194
8	INGLÉS	Ratnasari et al.	2017	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237016306015
9	INGLÉS	Zhang et al.	2019	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919310116
10	INGLÉS	Sharuddin et al.	2017	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417305915
11	INGLÉS	Xue et al	2017	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417302820
12	INGLÉS	Miandad et al	2017	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17306050
13	INGLÉS	Miandad et al	2018	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582018300776
14	INGLÉS	Baena-González et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X20304773
15	INGLÉS	Ghenai et al	2019	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218313249
16	INGLÉS	Fekhar et al	2016	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967118308596
17	INGLÉS	Johansson et al	2018	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016523701830295X
18	INGLÉS	Ghorbannez et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19307482
19	INGLÉS	Xu et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019324176
20	INGLÉS	Lam et al	2019	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119305672
21	INGLÉS	Akancha et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967118302708
22	INGLÉS	Ahamed et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389419314037
23	INGLÉS	Hu et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/scie

					nce/article/abs/pii/S0959652620311495
24	INGLÉS	Li et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19307093
25	INGLÉS	Salvilla et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920311648
26	INGLÉS	Mumbach et al	2019	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419310374
27	INGLÉS	Yuan et al	2019	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852419313069
28	INGLÉS	Lin et al	2018	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18304434
29	INGLÉS	Huo et al	2020	SCIENCE DIRECT	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720319240
30	INGLÉS	Sekar et al	2021	PROQUEST	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621027591
31	INGLÉS	Sembiring et al	2018	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2556808125/C4E21F9CF05A422APQ/4?accountid=37408
32	INGLÉS	Joseph et al	2017	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2568470840/C97F877DF0F43DDPQ/1?accountid=37408
33	INGLÉS	Adeola et al	2021	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2512297803/C97F877DF0F43DDPQ/3?accountid=37408
34	INGLÉS	Devi et al	2019	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2535621081/C97F877DF0F43DDPQ/4?accountid=37408
35	INGLÉS	Juwono et al	2019	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2565339696/C97F877DF0F43DDPQ/7?accountid=37408
36	INGLÉS	Fadillah, et al	2021	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2554464824/C97F877DF0F43DDPQ/8?accountid=37408
37	INGLÉS	Damodharan et al	2018	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2043102617/C97F877DF0F43DDPQ/11?accountid=37408
38	INGLÉS	Samosir et al	2018	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2557133566/C97F877DF0F43DDPQ/18?accountid=37408
39	INGLÉS	Khairil et al	2019	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2435035354/C97F877DF0F43DDPQ/19?accountid=37408
40	INGLÉS	Fahim et al	2021	PROQUEST	https://www.proquest.com/docview/2503206858/C97F877DF0F43DDPQ/15?accountid=37408



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SERNAQUE AUCCAHUASI FERNANDO ANTONIO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "Producción Pirolytica de Combustible a partir de Residuos Plásticos. Una Revisión Sistemática", cuyos autores son GUILLEN ATALAYA FLAVIO CESAR, OSORIO ESTELA LOURDES ANDREA, constato que la investigación cumple con el índice de similitud establecido, y verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

Hemos revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

SAN JUAN DE LURIGANCHO, 15 de Enero del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SERNAQUE AUCCAHUASI FERNANDO ANTONIO DNI: 07268863 ORCID 0000-0003-1485-5854	Firmado digitalmente por: FSERNAQUEA el 15-01- 2022 18:22:31

Código documento Trilce: INV - 0788490