



CO-PIRÓLISIS DE LA MEZCLA DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA Y RESIDUOS PLÁSTICOS

Co-pyrolysis of the mixture of lignocellulosic biomass and plastic waste

iD	¹ Katherine Ulpo *
iD	¹ Daniel Espín
iD	^{1,2} Paúl Palmay

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.

² Department of Mechanical Engineering, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain.

*katherine.ulpo@esPOCH.edu.ec

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar el proceso de co-pirólisis de la mezcla de biomasa lignocelulósica con residuos plásticos de poliestireno y polipropileno para obtener biocombustible y determinar sus características fisicoquímicas. Se utilizó un reactor batch con una tasa de calentamiento de 12 °C·min⁻¹ a una presión de -0,05 MPa, purgado con nitrógeno, conectado a un sistema de enfriamiento; para las pruebas de co- pirólisis se trabajó con una temperatura de 400°C (T1) y otra de 450°C (T2) con 2 composiciones de mezcla, la primera C1: 25%Biomasa+75%Plástico (50% PP+50%PS) y la segunda C2: 25%Biomasa+75% Plástico (25% PP+75%PS). A partir del análisis de los biocombustibles se observó que estaban constituidos principalmente por compuestos oxigenados, olefinas, naftenos y compuestos nitrogenados. Su poder calorífico fue de 40152 kJ kg⁻¹. Finalmente se determinó que el biocombustible a T2-C2 obtuvo mayor rendimiento (73%) porque en su composición había mayor presencia de poliestireno que por su estructura polimérica es más fácil su despolimerización por adición de calor, sin embargo, si se excediera dicha temperatura se promovería a la formación de gases. Además, por sus características fisicoquímicas el biocombustible podría ser usado como aditivo de combustibles convencionales.

Palabras claves: *Co-pirólisis, Biomasa, Poliestireno, Polipropileno, Biocombustibles.*

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the co-pyrolysis process of the mixture of lignocellulosic biomass with polystyrene and polypropylene plastic wastes to obtain biofuel and to determine its physicochemical characteristics. A batch reactor was used with a heating rate of 12 °C·min⁻¹ at a pressure of -0.05 MPa, purged with nitrogen, connected to a cooling system; for the co-pyrolysis tests, a temperature of 400°C (T1) and another of 450°C (T2) were used with 2 mixture compositions, the first C1: 25%Biomass+75%Plastic (50% PP+50%PS) and the second C2: 25%Biomass+75% Plastic (25% PP+75%PS). From the analysis of the biofuels it was observed that they were mainly constituted by oxygenated compounds, olefins, naphthenes and nitrogen compounds. Their calorific value was 40152 kJ kg⁻¹. Finally, it was determined that the biofuel at T2-C2 obtained a higher yield (73%) because in



its composition there was a greater presence of polystyrene which, due to its polymeric structure, is more easily depolymerized by the addition of heat; however, if this temperature were exceeded, gas formation would be promoted. In addition, due to its physicochemical characteristics, the biofuel could be used as an additive for conventional fuels.

Keywords: *co-pyrolysis, biomass, polystyrene, polypropylene, biofuels.*

I. INTRODUCCIÓN

Con la creciente contaminación ambiental y el incremento del consumo de combustibles convencionales se ha impulsado la búsqueda de alternativas empleando diferentes métodos para la obtención de estos, por ejemplo, procesos térmicos como la pirólisis y la gasificación de los cuales se obtienen productos eficientemente energéticos como el bio-char, aceite pirolítico, gas de síntesis, etc. (1,2). Los residuos plásticos han sido una de las fuentes principales utilizadas para este fin ya que son polímeros derivados del petróleo que mediante estos tratamientos pueden ser utilizados como fuente de energía alterna (3), en anteriores investigaciones (4,5) se han empleado plásticos como el poliestireno y el polipropileno como materias primas ya que pueden ser encontrados fácilmente en Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en gran concentración ya que están presentes en materiales de uso cotidiano como los envases de comida y las botellas plásticas. Por otro lado la biomasa representa el material renovable que más abunda en el mundo pues esta proviene de todos los residuos orgánicos y es considerada como alternativa de energías convencionales al ser una fuente de energía natural (6). La biomasa puede clasificarse de acuerdo con su origen en residuos: naturales, secos, húmedos y cultivos energéticos, la mayoría de estos contienen material lignocelulósico por lo que se los conoce como biomasa lignocelulósica específicamente a los que provienen de residuos agrícolas, forestales e industriales. La biomasa lignocelulósica en su estructura se compone de elementos como el carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, y también de polímeros naturales como la celulosa, hemicelulosa y lignina (7,8).

A nivel mundial existe una problemática ambiental respecto a la generación y acumulación tanto de residuos plásticos como de orgánicos, por una parte los plásticos ocupan un gran volumen llegándose a acumular en grandes cantidades a esto se le suma sus largos periodos de degradación, por otro lado la biomasa

lignocelulósica se regenera en gran medida y de manera constante mediante procesos naturales y actividades humanas llegando a producirse millones de toneladas anuales (9,10), originándose un impacto ambiental importante dado que éstos desechos en su mayoría no tienen una gestión adecuada ni tratamiento en sí (11). En América Latina predomina el método de recolección y disposición final, dejando de lado el aprovechamiento, reciclaje, tratamiento y disposición final idónea, únicamente utilizando vertederos, botaderos a cielo abierto, rellenos sanitarios, etc., en los cuales casi nunca se aprovechan los residuos o desechos que terminan depositados allí (12).

Estos residuos al ser reciclables una vez que hayan cumplido su ciclo de vida podrán ser materias primas en diferentes procesos de los cuales se pueden obtener subproductos energéticos. Para aprovechar y recuperar su poder calorífico se han empleado tratamientos donde los residuos se reciclan en sus monómeros mediante procesos termoquímicos (13) como el reciclaje químico que abarca métodos como la pirólisis o co-pirólisis, esta última ideal para tratar ambos materiales obteniendo productos como el bio-char, aceite pirolítico (biocombustible) y gas.

La co-pirólisis tiene el mismo fundamento que la pirólisis, la diferencia es que se realiza una co-alimentación de dos materiales uno de tipo renovable y otro de tipo fósil, el proceso se lleva a cabo en un reactor pirolítico a temperaturas moderadamente altas entre 350 °C – 650 °C en ausencia de oxígeno, y con gases de arrastre como el nitrógeno (14), además, se opera en condiciones específicas de velocidad de calentamiento, presión, temperatura, tiempo de residencia, etc. (15)

Los productos líquidos denominados biocombustibles requieren de ciertas condiciones de operación enfocadas para obtener un mayor rendimiento que otros productos que se van

formando durante todo el proceso (16), si bien no se conocen las condiciones específicas para ello, se puede experimentar a diferentes temperaturas y mezclas teniendo en cuenta los parámetros generales del proceso de co-pirólisis y el tipo de reactor en el que se trabaja puesto que tienen un efecto en la formación y distribución de los productos (17) como se mencionó anteriormente. Dado que ambos tipos de residuos contienen materias volátiles que contribuyen a la producción de la fracción líquida (18) lo cual favorece el proceso obteniendo buenos rendimientos, se debe aclarar que los residuos plásticos tienen un alto contenido de material volátil y su estructura es más sencilla que los polímeros que componen la biomasa, por lo que se despolimerizan con mayor facilidad al momento de exponerlos a ciertas temperaturas aportando en mayor medida a la formación de biocombustibles que pueden ser utilizados como combustibles o aditivos de combustibles convencionales como la gasolina, el diesel, etc. De este modo se podría satisfacer la demanda energética que existe hoy en día, además, países que no producen combustibles podrían implementar este método haciendo uso de sus propios residuos como materias primas (19,20).

Por las razones expuestas se realizó el reciclaje químico de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos mediante co-pirólisis para la obtención de biocombustibles que tengan características similares a los combustibles convencionales como el diesel.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención y preparación de los materiales

Se empleó biomasa lignocelulósica de los residuos de poda de áreas verdes. Los residuos plásticos con los que se trabajó fueron poliestireno (PS) y polipropileno (PP) obtenidos de una planta recicladora de la ciudad de Riobamba, lavados y triturados para ser empleados en el proceso.

La biomasa lignocelulósica se secó a 105 °C durante 24 horas en una estufa para obtener una humedad menor al 10% y reducir el contenido de agua en los productos finales, seguidamente se trituró la biomasa seca en un equipo de molienda y tamizado para obtener tamaños de partícula entre 2 a 3 mm y alcanzar mayores velocidades de calentamiento y conversión de la materia más estable y eficiente. Es importante

realizar el análisis de biomasa debido a que este nos indica los elementos y el porcentaje en que se encuentran presentes, además, estos serán precursores de ciertos compuestos orgánicos en los productos.

Equipo

Se trabajó en un reactor tipo batch con una capacidad de 5L acoplado a un intercambiador de calor alimentado con agua a 10 °C por un sistema de enfriamiento con el fin de condensar los gases y convertirlos en productos líquidos. El reactor operó en condiciones normales con una tasa de calentamiento a 12 °C m⁻¹ a presión de -0.05 MPa, antes de iniciar con el proceso el reactor se purgó con nitrógeno para mantener una atmósfera inerte.

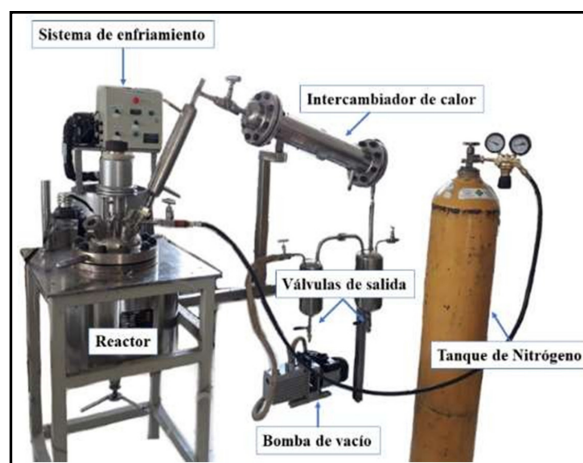


Figura 1. Reactor pirólitico tipo batch.

Obtención de los productos de co-pirólisis

Para la experimentación se estableció 2 temperaturas: 400 °C (T1) y 450 °C (T2) y 2 composiciones de mezcla: (C1) con 25%Biomasa+75%Plástico (50%PP+50%PS) y (C2) con 25%Biomasa+75%Plástico (25%PP+75%PS), por cada prueba se realizó 3 repeticiones, obteniendo 12 datos del rendimiento líquido (biocombustible).

Para iniciar con las pruebas de co-pirólisis el reactor se cargó con 500 g mezcla correspondiente a C1 o C2, al iniciar se seteó con la temperatura debida y una vez ejecutado el proceso se esperó de 5 a 6 horas para que el mismo culmine, observándose que a los 35 minutos el reactor llega a la temperatura seteada y comienza el proceso de co-pirólisis esto se puede notar ya que paralelamente la presión va aumentando debido a la formación de gases, una presión



más alta fomenta la formación de gases livianos disminuyendo la formación de productos líquidos por lo cual se debe purgar los gases con una bomba al vacío y de esta manera disminuirla hasta presión normal del reactor. Culminado el proceso, los productos líquidos (biocombustibles) se recolectaron a través de las válvulas de salida del reactor en botellas ámbar selladas correctamente y guardadas a bajas temperaturas para evitar su volatilización.

Caracterización de los productos líquidos

Obtenido los productos, se realizó una homogenización para definir 4 biocombustibles denominados: T1-C1, T1-C2, T2-C1 y T2-C2. Todos analizados para determinar sus características fisicoquímicas en base a la Tabla 1.

ENSAYO	NORMA
Destilación	ASTM-D86
Densidad, grados API	ASTM-1298
Viscosidad	ASTM-445
Poder calorífico	ASTM-D240
Punto de inflamación (°C)	NTE INEN 1493
ICC	NTE INEN 1495

Tabla 1. Análisis fisicoquímicos de los biocombustibles.

Para determinar los grupos funcionales y compuestos que están presentes en los biocombustibles se utilizaron técnicas de FT-IR y cromatografía GC-MS.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis elemental de biomasa

Los resultados obtenidos del análisis elemental de biomasa fueron de 1.20 % de nitrógeno, 46.37 % de carbono y 5.79 % de hidrógeno, estos valores son comparables con los residuos de álamo utilizado en procesos de pirólisis los cuales contenían 48.3 % de carbono, 0.1 % de nitrógeno y 5.8 % hidrógeno (21). Debido al poco contenido de hidrógeno que generalmente se evidencia en la biomasa la co-alimentación con plásticos es relevante ya que éstos actúan como donadores de hidrógeno que promueven a la formación de productos líquidos y además mejoran sus características fisicoquímicas (9).

Rendimiento de los productos

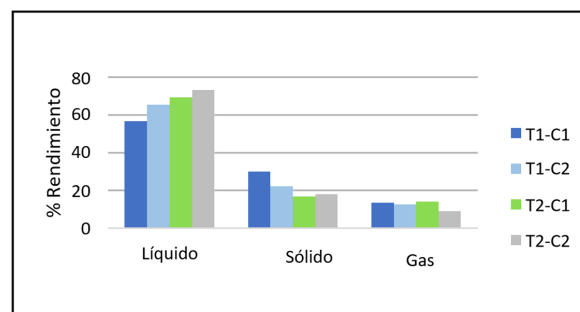


Figura 2. Rendimiento de los productos obtenidos.

En la Figura 2. podemos observar los rendimientos obtenidos de los biocombustibles los cuales superaron el 50% considerándose bueno, además, el rendimiento más alto fue del 73% a T2-C2, una temperatura de 450 °C con la composición de mezcla 2 serían las condiciones óptimas para obtener una gran cantidad de producto líquido, es importante señalar que en C2 existe mayor presencia de PS, por lo que se promovería a la formación de productos líquidos ya que el PS por su estructura lineal puede despolimerizarse con mayor facilidad al adicionar calor, sin embargo, (4) plantea que a temperaturas alrededor de 450 °C los enlaces C-C del PS se rompen con mayor facilidad generando una mayor producción de gases livianos que no son condensables por lo cual no sería favorable para el rendimiento líquido trabajar a temperaturas más altas, es así que, (18) obtiene un rendimiento líquido del 63% de mezclas de PS y residuos de pino al trabajar con una temperatura de 500 °C, aunque no se ve como rendimiento bajo se debe considerar que las condiciones de operación y el tipo de reactor pueden ser diferentes.

Destilación

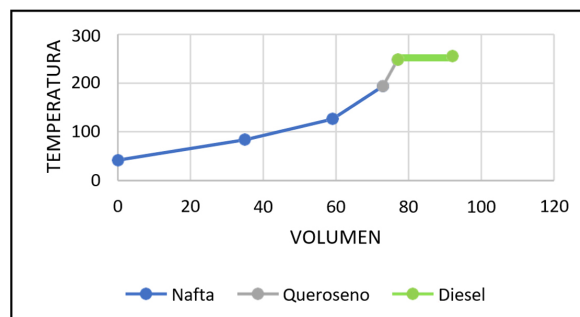


Figura 3. Curva general de destilación.

En el proceso de destilación se obtuvieron fracciones altas de nafta (gasolinas) del 79%, mientras que la fracción de diesel obtenido fue del 17%, en cuanto a las fracciones queroseno e

hidrocarburos pesados fueron menores al 10% siendo casi insignificantes. La destilación de los biocombustibles empezó a los 42 °C y culminó a los 256 °C esto se puede observar en la Figura 3.

Densidad

Biocombustibles	Densidad, kg/m ³	Gravedad Específica, -	Grados API
T1 - C1	874,09	0,875	31,15
T1 - C2	870,08	0,871	31,12
T2 - C1	869,74	0,870	31,06
T2 - C2	886,67	0,887	27,95

Tabla 2. Densidad, gravedad relativa y grados API de los biocombustibles.

La densidad, gravedad específica y los grados API nos ayudan a clasificar a los crudos a través de su peso (22). En la Tabla 2. se observan los valores obtenidos de densidad entre 0.870 y 0.887, aunque los mismos no fueron similares a los descritos por (16) que manifiesta que la densidad de los productos líquidos obtenidos de mezclas de PP y PS con bagazo fueron de 0.937 y 0.951 correspondientemente, sin embargo, nuestros biocombustibles se encuentran dentro del rango del diesel entre 0.820 y 0.900 (23).

Viscosidad

	Viscosidad, cSt
T1-C1	2,19
T1-C2	3,84
T2-C1	3,45
T2-C2	3,82

Tabla 3. Viscosidad de los biocombustibles.

Los valores expuestos en la Tabla 3. son los resultados de la viscosidad de cada biocombustible, a pesar de que son valores inferiores conseguidos por (18) en líquidos piróliticos de la mezcla de biomasa con HDPE a 500 °C con viscosidades entre 6.23 y

12.29 mm² s⁻¹, nuestros valores son semejantes a los del diesel que tiene una viscosidad entre 2 y 4.5 mm² s⁻¹.

Poder calorífico

El poder calorífico del biocombustible fue de 40152 kJ kg⁻¹ el cual es un valor que se acerca al poder calorífico del diesel que se encuentra alrededor de 45000 kJ kg⁻¹ (24), además, como

se ha mencionado anteriormente es necesario recalcar que la co- alimentación con plástico ayuda en el aumento del número de átomos de hidrógeno permitiendo mejorar el poder calorífico del biocombustible al provocar un aumento en la relación H/C, es así que (25) obtiene un poder de calorífico en su producto líquido de 22529.59 kJ kg⁻¹ al solo realizar pirólisis de residuos de palma africana.

Punto de inflamación

Biocombustible	Punto de inflamación, °C
T1 - C1	21
T1 - C2	19
T2 - C1	20
T2 - C2	19

Tabla 4. Punto inflamación de los biocombustibles.

Los resultados expuestos en la Tabla 4. del punto inflamación de los biocombustibles no varían mucho respecto a la temperatura del ambiente, dándonos a notar que son líquidos inflambles, además, al ser valores por debajo de los combustibles convencionales como el diesel que (24) plantea que se encuentra alrededor de 53.9 °C, lo cual nos indica que nuestros biocombustibles tienen presencia de hidrocarburos livianos como las gasolinas.

Índice de cetano calculado (ICC)

Biocombustibles	ICC
T1-C1	18,7
T1-C2	19,85
T2-C1	20,15
T2-C2	15,38

Tabla 5. ICC de los biocombustibles.

El ICC obtenido de los biocombustibles reporta valores bajos como se puede observar en la Tabla 5. en comparación al diesel que tiene un valor mínimo de 45 esto ocurre según la NTE INEN 1495 porque en la destilación de los biocombustibles no se superaron los 260 °C al momento de llegar al punto final del destilado, también la presencia de compuestos aromáticos y alcoholes que se forman por la biomasa influyen en este resultado, de tal forma (26) al obtener combustibles líquidos por pirólisis únicamente de plásticos obtiene un índice de cetano igual a 49.



Análisis FT-IR

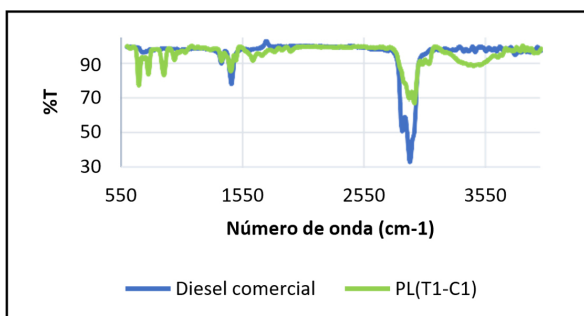


Figura 4. FT-IR del biocombustible T1-C1.

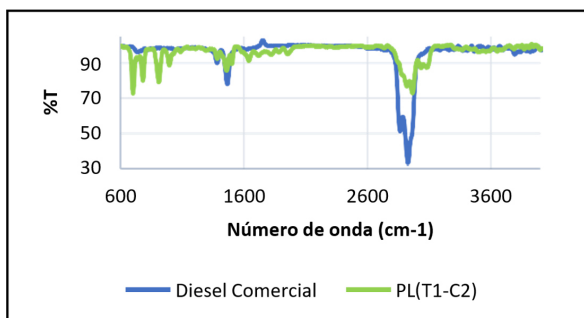


Figura 5. FT-IR del biocombustible T1-C2.

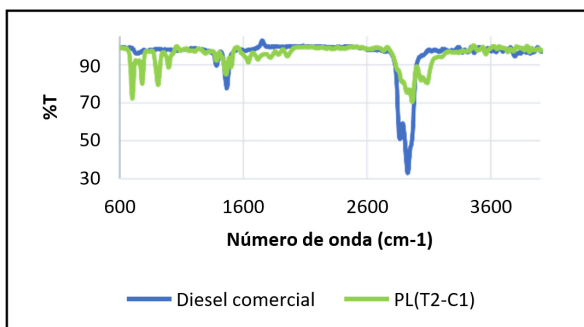


Figura 6. FT-IR del biocombustible T2-C1.

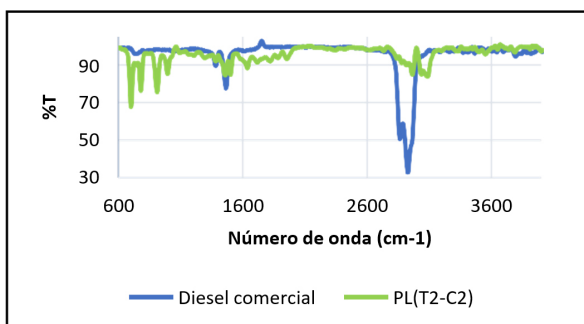


Figura 7. FT-IR del biocombustible T2-C2.

Con el análisis de Fourier FT-IR realizado a los biocombustibles se determinó que en su estructura presentan grupos funcionales que corresponde a haluros de alquilo, ácidos carboxílicos, ésteres, compuestos nitrogenados, aromáticos, alquenos, aminas aromáticas, aminas alifáticas, aminas secundarias, aminas primarias, aminas, amidas, fenoles, alcoholes, etc. Las

figuras presentadas anteriormente representan una comparación FT- IR entre los biocombustibles y diesel comercial encontrando picos similares entre 2850 – 3000 cm^{-1} , 1400 – 1500 cm^{-1} que corresponden a parafinas y picos entre 1450 – 1470 cm^{-1} que determina la presencia de anillos aromáticos. (26) al comparar aceite pirolítico con diesel comercial halló picos similares en ambos combustibles alrededor de 725 cm^{-1} correspondientes a alcanos y alquinos y picos entre 2800 – 3000 cm^{-1} que corresponden a los mismos grupos funcionales, no obstante el aceite pirolítico también tuvo la presencia de grupos funcionales aromáticos, alquenos y compuestos oxigenados que de igual forma se observan en nuestros biocombustibles.

Cromatografía GC-MS

% Hidrocarburos	
C4 - C12	86,67
C10 - C17	33,33
C12 - C23	16,67
C23 - C40	3,33

Tabla 6. Hidrocarburos presentes en T2-C1.

% Hidrocarburos	
C4 - C12	78,66
C10 - C17	28,29
C12 - C23	20,70
C23 - C40	4,14

Tabla 7. Hidrocarburos presentes en T2-C2.

Los biocombustibles con mayor rendimiento (T2-C1 y T2-C2) fueron analizados por GC- MS que identificó la mayoría de compuestos que los conforman, observándose que predominan los hidrocarburos de C4 - C12 que corresponden a las gasolinas. Ambos combustibles tienen una baja cantidad de hidrocarburos pesados tal como (26) informó en su investigación al realizar análisis FT-IR de aceite de pirólisis obteniendo mayor presencia de hidrocarburos como el diesel y la gasolina entre el 35 y el 48% respectivamente con un bajo contenido de fracciones pesadas.

Propiedades del biocombustible

Se detallan las propiedades del mismo en la Tabla 8. con estos resultados se puede determinar que el biocombustible no es apto para ser utilizado de manera directa dado a que tiene un índice de cetano bajo, sin embargo, al tener un poder calorífico alto cercano al diesel (24) se

puede utilizar como aditivo para combustibles convencionales que tengan características similares y de esta manera mejorar sus propiedades.

ENSAYO	Valor Obtenido	Unidades
Temperatura de Destilación	256	°C
Densidad, grados API	27.95	°API
Viscosidad	3.82	cSt
Poder calorífico	40152	kJ kg ⁻¹
Punto de inflamación	19	°C
ICC	15.38	-

Tabla 8. Propiedades del biocombustible T2-C2.

IV. CONCLUSIONES

- Se realizó el reciclaje químico de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos mediante co-pirólisis obteniendo productos líquidos (biocombustibles) de los cuales el mayor rendimiento obtenido fue del 73% a 450 °C con composición de mezcla 2 donde prevalecía la presencia de PS que al ser un polímero lineal permitió una mayor producción de la fracción líquida, sin embargo, si se excede esta temperatura se favorece a la formación de productos livianos no condensables.
- Los biocombustibles fueron analizados para determinar sus propiedades fisicoquímicas
- Debido a sus características fisicoquímicas no sería adecuado usar los biocombustibles de manera directa, ya que al tener un ICC bajo afectaría al sistema de los motores a diesel retardando el tiempo de autoignición provocando explosiones discontinuas que afectarían a la potencia y al rendimiento de estos, sin embargo, al tener un poder calorífico alto de 40152 kJ kg⁻¹ se podría utilizar como aditivo de combustibles convencionales como el diesel que al tener características similares beneficiarían su rendimiento.

V. REFERENCIAS

1. Zamora-Hernández T, Prado-Fuentes A, Capataz-Tafur J, Barrera-Figueroa BE, Peña-Castro JM. Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales. *Educ Quim* [Internet]. 2014;25(2):122–7. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(14\)70534-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(14)70534-8)
2. Wu X, Bourbigot S, Li K, Zou Y. Co-pyrolysis characteristics and flammability of polylactic acid and acrylonitrile-butadiene-styrene plastic blend using TG, temperature-dependent FTIR, Py-GC/MS and cone calorimeter analyses. *Fire Saf J* [Internet]. 2022;128(September 2021):103543. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103543>
3. Sajdak M. Impact of plastic blends on the product yield from co-pyrolysis of lignin-rich materials. *J Anal Appl Pyrolysis* [Internet]. 2017;124:415–25. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.03.002>
4. Palmay P et al. Influence of Temperature and Reaction Time on the Performance of Thermal Pyrolysis of Compact Polystyrene Waste. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* [Internet]. 2021;728(1):1–8. Available from: https://www.researchgate.net/publication/351030750_Influence_of_Temperature_and_Reaction_Time_on_the_Performance_of_Thermal_Pyrolysis_of_Compact_Polystyrene_Waste



5. Ramos W, Pretell V, Lujan C. Catalytic pyrolysis of polypropylene residues for the obtaining of liquid fuels. *Proc LACCEI Int Multi-conference Eng Educ Technol.* 2019;2019-July(January).
6. Gosgot Angeles W, Rivera López RY, Rascón J, Barrena Gurbillón MÁ, Ordinola Ramirez CM, Oliva M, et al. Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis. *Rev Investig Agroproducción Sustentable [Internet].* 2021;5(2):26. Available from: https://www.researchgate.net/publication/356897897_valorizacion_energetica_de_residuos_organicos_mediante_pirolisis
7. Afanasjeva, Natalia et. al. Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation. *J Sci with Technol Appl.* 2017;3(2017):27–43.
8. Rodríguez-Machín L, López-Díaz I, Ocaña-Guevara VS, Pérez-Bermúdez RA. Termo-conversión de biomasa por pirólisis. *Tendencias de investigación y desarrollo.* (Spanish). Biomass thermo-conversion by pyrolysis *Trends Res Dev [Internet].* 2012;39(1):27–32. Available from: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=77050346&lang=es&site=ehost-live>
9. Rocha MV, Renzini MS, Pierella LB. Co-pirólisis de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos para producir biocombustibles sustentables. *Ajea.* 2020;(5).
10. Spanevello RA, Suárez AG, Sarotti AM. Alternative sources of starting materials. *Educ Quim [Internet].* 2013;24(SPL.ISSUE1):124–31. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72505-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72505-9)
11. Mancheno M, Astudillo S, Arévalo P, Malo I, Naranjo T, Espinoza J. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja.* 2016;23(1):53–9.
12. Zulia U, Urdaneta G, Joheni A, Zulia U. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Choice Rev Online.* 2006;44(03):44-1347-44–1347.
13. Schwarz AE, Ligthart TN, Godoi Bizarro D, De Wild P, Vreugdenhil B, van Harmelen T. Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Manag [Internet].* 2021;121:331–42. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>
14. Baray-Guerrero M del R, Porras-Flores DA, Hoffmann-Estevés HE, Manjarrez-Dominguez CB. Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirolisis lenta y a baja temperatura para la producción de biocombustibles. *Rev Energías Renov.* 2019;3(9):1–9.
15. Medina MP, Sánchez A, Hernández JF. Pirólisis de bagazo de caña a escala de laboratorio. *Tecnol Química [Internet].* 2008;XXVIII(2):61–70. Available from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543756008>
16. Wang Z, Burra KG, Lei T, Gupta AK. Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Prog Energy Combust Sci [Internet].* 2021;84:51. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100899>
17. Chen L, Yang K, Huang J, Liu P, Yang J, Pan Y, et al. Experimental and kinetic study on flash pyrolysis of biomass via on-line photoionization mass spectrometry. *Appl Energy Combust Sci [Internet].* 2022;9(November 2021):100057. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100057>
18. Uzoejinwa BB, He X, Wang S, El-Fatah Abomohra A, Hu Y, Wang Q. Co- pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Convers Manag [Internet].* 2018;163(December 2017):468–92. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
19. Gómez JM. Analysis of the variation in the efficiency in the production of biofuels in Latin America. *Estud Gerenciales [Internet].* 2016;32(139):120–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.estger.2016.01.001>

20. Wang H, Peng X, Zhang H, Yang S, Li H. Microorganisms-promoted biodiesel production from biomass: A review. *Energy Convers Manag*. 2021;12.
21. Bonelli, P.R et al. Caracterización cinética de la pirólisis y copirólisis de combustibles alternativos P.R. *Av en Energías Renov y Medio Ambient*. 2019;1:105–12.
22. Campos-Sofía M, León-Cañet M, Silveira-Font Y, Moro Martínez A, Falcón- Hernández J. Tratamiento magnético sobre parámetros físicos-químicos de muestras de petróleo. *Tecnol Química* [Internet]. 2015;35(3):271–81. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852015000300002&lang=pt%0Ahttp://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v35n3/rtq02315.pdf
23. García A. Parámetros para determinar las normas de almacenamiento y consumo del combustible diesel. *Rev Av científica* [Internet]. 2009;12(1):1–6. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5074414>
24. Castillo-Hernández P, Mendoza-Domínguez A, Caballero-Mata P. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol Analysis of Physicochemical Properties of Mexican Gasoline and Diesel Reformulated with Ethanol. *Ing Investig y Tecnol*. 2012;13(número 3):293–306.
25. Arteaga J et al. Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq .). *Biotechnol en el Sect Agropecu y Agroindustrial* [Internet]. 2012;10(2):144–51. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612012000200017&script=sci_abstract&tIng=es
26. Singh RK et al. Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*. 2020;262(October):1– 10.