

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS TRANSFORMADOS EN COMBUSTIBLE MEDIANTE PIRÓLISIS Y SU IMPACTO CLIMÁTICO

EXPLOITATION OF PLASTIC WASTE TRANSFORMED INTO FUEL BY PYROLYSIS AND ITS CLIMATIC IMPACT

Arantxa Vergara, Fátima Muñoz, Vin Gámez

IES María Josefa Baraínca. Ronda de la Independencia, 0. 06185, Valdelacalzada Badajoz

Resumen

En este trabajo hemos medido el poder calorífico y el CO₂ emitido durante la combustión tanto del polipropileno como del combustible obtenido de su pirólisis. Hemos observado que ambos emiten cantidades semejantes de CO₂, pero no de energía, superando el combustible en un 40% el calor producido, acercándose al poder calorífico del diésel.

Palabras clave: pirólisis, polipropileno, combustión, ácido poliláctico, tolueno, poliestireno, combustible, economía circular, revalorización.

Abstract

In this work we have measured the calorific value and the emitted CO₂ during the combustion of both polypropylene and fuel obtained by its pyrolysis. We have observed that both emit similar amounts of CO₂, but not of energy, with the fuel exceeding the heat produced by 40%, approaching the calorific value of diesel.

Keywords: pyrolysis, polypropylene, combustion, polylactic acid, toluene, polycarbonate, fuel

1 Introducción

Los plásticos son materiales muy versátiles y baratos de fabricar, es por eso que han reemplazado a materiales más tradicionales como los metales y maderas. La mayoría de los plásticos que usamos en nuestro día a día son derivados del petróleo, materia a partir de la cual se hacen combustibles como el diésel o la gasolina. Se da además que los plásticos más usados no son biodegradables y además muchos de los productos hechos a partir de estos tienen una vida útil extremadamente corta, llegando algunos a ser de

utilidad unos pocos minutos, para convertirse posteriormente en un residuo.

Los residuos plásticos pueden ser reciclados y reutilizados, para fabricar nuevos productos, o bien pueden ser utilizados en la producción de energía. Es aquí donde se centra nuestro trabajo. Viendo el aumento de los precios de los combustibles fósiles y la cada vez menor cantidad de petróleo disponible, queríamos ver qué sería mejor para el medio ambiente y el consumo humano, utilizar directamente el residuo como combustible o someterlo primero a un proceso de pirólisis y usar el combustible resultante.

Para esto hemos utilizado: polipropileno (PP); ácido poliláctico (PLA), polímero biodegradable derivado del trigo, y poliestireno (PS). Centrando el proyecto en el polipropileno.

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para la realización de este proyecto de investigación se utilizó: polipropileno, polietileno y poliestireno provenientes de residuos domésticos, y ácido poliláctico procedente de impresiones fallidas de una impresora 3D. Estos plásticos se utilizaron sin previo lavado.

Como reactor de pirólisis se utilizó un equipo de destilación de borosilicato hermético para evitar que el oxígeno quemase la materia prima. (Figura 5)

Para determinar la emisión de CO₂ tanto del PP como de su combustible resultante de la pirólisis hemos utilizado un medidor de CO₂ encerrado en un espacio lo más hermético posible, donde haciendo uso de un mechero bunsen se calentaron las muestras para facilitar su ignición.

Y por último para medir el poder calorífico se utilizaron un matraz erlenmeyer con 250ml de agua y un termómetro de mercurio.



Figura 1. Caja utilizada para las mediciones de CO₂.

2.2 Métodos

2.2.1 Medición de CO₂

Para la medición en gramos de CO₂ emitidos por la combustión del plástico o combustible fue necesario tener en cuenta factores tales como la cantidad a quemar de compuesto, la cantidad inicial

de CO₂ presente en la atmósfera, la temperatura inicial y final y las pérdidas ocasionadas por imperfecciones en la caja (Figura 1).

Las temperaturas tanto iniciales como finales fueron tomadas con un termómetro de mercurio introducido dentro de la caja. Cabe resaltar que no fueron tomadas en cuenta las pérdidas térmicas, ya que aportan un error muy pequeño a la medición.

Para calcular la cantidad en gramos de CO₂ presente en el aire a partir de su concentración en volumen podemos utilizar la siguiente fórmula, si bien es cierto que se podría haber hecho con una regla de tres sin haber fallado demasiado. Pero no éramos conscientes de esto antes de las primeras mediciones:

$$m = \frac{CvM(CO_2)PV(\text{aire})}{RT[(1-Cv)M(\text{aire})+CvM(CO_2)]}$$

donde:

m = masa en gramos

Cv = concentración en volumen (ppm * 10⁶)

P = presión

V = volumen

R = constante universal de los gases ideales

T = temperatura

M = masa molar del aire o CO₂

Esta fórmula deriva de las siguientes:

$$Cm = \frac{CvM(CO_2)}{(1-Cv)M(\text{aire}) + CvM(CO_2)}$$

$$d = \frac{n \cdot M(\text{aire})}{V} = \frac{PV}{RTV} M(\text{aire}) = \frac{P}{RT} M(\text{aire})$$

$$m = Cm * d * V = Cm * \frac{PV}{RT} M(\text{aire})$$

donde:

Cm = concentración en masa de CO₂

d = densidad

n = moles de gas

El problema de esta fórmula es que no tiene en cuenta las pérdidas causadas por la caja. Para solucionar este problema se utilizó acetona como muestra de control, a partir de la cual, sabiendo la cantidad de CO₂ que debería emitir, se calcularon unas pérdidas medias del 96%.

En el proceso de medición primero se dejó al medidor de CO₂ estabilizarse a la concentración atmosférica. Luego, se introdujo una cantidad previamente pesada del compuesto en una cápsula de porcelana colocada sobre un mechero bunsen, encargado de precalentar la muestra y mantenerla caliente durante la medición. Los gases emitidos por la llama del mechero fueron despreciados ya que no se observó un aumento relevante en pruebas previas a las primeras combustiones.

Una vez la muestra estaba suficientemente caliente esta empezó a emitir un humo blanquecino, que hubo que encender manualmente con una cerilla, para posteriormente colocar la caja encima de la muestra con su respectivo termómetro.

Terminada la combustión de la muestra se esperó a que el termómetro alcanzase su temperatura máxima, para luego levantar la caja y tomar la concentración de CO₂.



Figura 2. PP listo para quemarse en el centro. Medidor de CO₂ a la derecha.



Figura 3. Medición del CO₂ emitido por el polipropileno.

2.2.2 Medición del poder calorífico

En la medición del poder calorífico hubo que tener en cuenta la cantidad de agua, la temperatura inicial y final de esta y la cantidad de compuesto a quemar.

En la medición del poder calorífico, se colocó la muestra en otra cápsula de porcelana con un mechero bunsen debajo y un matraz de 250ml con agua encima, con un termómetro sumergido en el agua. El procedimiento fue similar al del CO₂. Primero se precalentó la muestra hasta que emitiese humo, para luego encenderlo y observar el aumento de la temperatura del agua (Figura 4).



Figura 4. Si bien se usaron los mismos instrumentos, en esta foto el matraz se encuentra muy alejado. En las mediciones realizadas el matraz se encontró justo por encima de la cápsula de porcelana.

2.2.3 Proceso de pirólisis de los distintos polímeros

Para la pirólisis se utilizó un equipo de destilación simple, donde el matraz de destilación, con el polímero, fue calentado a una temperatura de 450°C con una manta calefactora. Los gases emitidos de los polímeros fueron refrigerados con un condensador enfriado con agua, y aquellos que se mantuvieron gaseosos fueron quemados directamente en la salida de la cola de destilación. Los productos de cada pirólisis fueron recogidos en un matraz colector y almacenados posteriormente en tubos de ensayo para su posterior estudio.

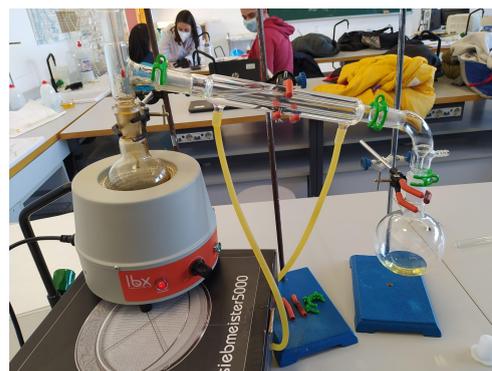


Figura 5. Equipo de destilación.

2.2.4 Análisis de la fracción líquida obtenida

De la fracción líquida resultante del proceso de pirólisis se midieron la densidad, poder calorífico, emisiones de CO₂ y peso, para poder calcular el rendimiento de la reacción.

Para calcular la densidad de los diferentes líquidos, se midieron sus volúmenes con una pipeta, y fueron pesados posteriormente en una báscula, para así computar su cociente y obtener la densidad.

3 Resultados y Discusión

3.1 Resultados de la pirólisis con diferentes tipos de plásticos

Todas las pirólisis se realizaron en las mismas condiciones de 450°C y una masa de entre 10 y 20 gramos. De las tres pirólisis que se llevaron a cabo con el polipropileno PP, se obtuvo un rendimiento promedio del 64%, mientras que con el ácido poliláctico PLA y el poliestireno PS se obtuvieron rendimientos del 23% y un 77% respectivamente. No se repitieron los experimentos con estos plásticos por falta de tiempo.

De los tres polímeros utilizados el poliestireno PS fue el único en dejar residuo sólido, aunque este no fue pesado ni analizado.

3.2 Análisis de la fracción líquida

Las dos primeras pirólisis del polipropileno dieron como resultado un líquido transparente ligeramente amarillento con un fuerte olor a diesel (Figura 6), con densidades de 0.64 y 0.74 g/ml respectivamente. La tercera muestra dio como resultado un líquido amarillento parecido, con el mismo olor y una densidad de 0.74. En este caso, al dejar enfriar el combustible a temperatura ambiente, este gelificó (Figura 7). Cabe resaltar que durante la pirólisis de esta tercera prueba, el proceso fue mucho más rápido en comparación con las dos pruebas anteriores, que tardaron 30 minutos en comparación con los 5 minutos de ésta última.

Creemos que esto puede deberse a restos que quedaron de agua y acetona en el frasco de destilación después de su limpieza, ya que al empezar a calentar la muestra ésta reaccionó violentamente,

aumentando repentinamente la presión dentro del sistema. Los vapores que luego condensaron fueron además de un color blanquecino (parecido al observado al calentar el PP en presencia de oxígeno), inflamables y con un olor a cera parecido al observado en las mediciones de CO₂ del polipropileno.

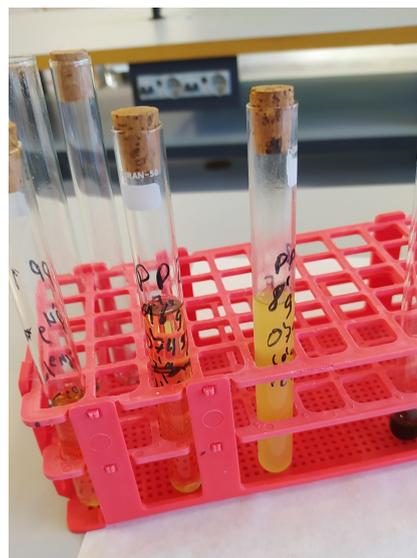


Figura 6. Combustibles resultantes del PP.



Figura 7. Fracción líquida gelificada.

En el caso del ácido poliláctico, su fracción líquida dio como resultado una mezcla con dos fases, de colores distintos, la más abundante y densa tuvo un color verdoso oscuro, mientras que la otra presentó un color azul oscuro (Figura 8). Se produjeron 0.4g de la fracción superior, con una

densidad de 0.44 g/ml, y 3,6g de la fracción inferior, con una densidad de 0.92. Los colores de estas fracciones son los mismo de los plásticos empleados, siendo estos azules, verdes y negros. Debido al poco rendimiento del PLA, su mal olor y falta de tiempo, no continuamos con las mediciones del poder calorífico y emisiones de CO₂.

Suponemos que el motivo de que las fracciones líquidas presentan colores distintos puede deberse a que no todos los pigmentos utilizados en la coloración del PLA son capaces de mezclarse con ambas fracciones. Para comprobar esto se llevó a cabo el siguiente experimento. Nos dispusimos a mezclar cada una de las fracciones con agua y tolueno para así ver la polaridad de cada una de las fracciones. Se observó lo siguiente (Figura 9):

La fracción más densa y oscura al mezclarse con agua forma un líquido amarillento neblinoso, en la parte inferior se observó un líquido oscuro de un color verde oscuro.

Al mezclar la fracción oscura con tolueno da lugar a otras tres fracciones distintas. De abajo hacia arriba son: una porción oscura de un color marrón rojizo, inmisible con el tolueno; otra fracción verdosa, en la que se encuentra el tolueno; y por último otra pequeña fracción superior de color negro.

La fracción azul es miscible con el tolueno pero no con el agua.

Teniendo todo esto en cuenta podemos decir que la pequeña fracción azul es apolar. La fracción oscura estaría formada por un hidrocarburo y dos sustancias, posiblemente los tintes del plástico, de color negro y verde. La sustancia verde sería apolar y la negra polar.



Figura 8. Resultado de la pirólisis del PLA.

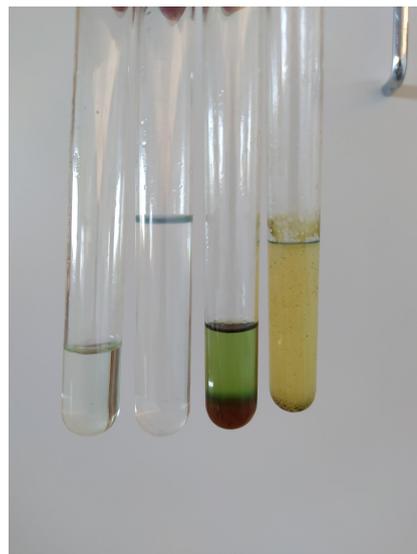


Figura 9: De izquierda a derecha: Tolueno + fracción superior, Agua + fracción superior, Tolueno + fracción inferior, Agua + fracción inferior.

El poliestireno PS dio como resultado un líquido con un color amarillo intenso con un fuerte olor a disolvente para pintura. Se midió una densidad de 0.86 g/ml. Según el estudio realizado por Jia Wang en 2022 el resultado de la pirólisis del poliestireno contiene benceno y tolueno, siendo este último el que le daría el olor característico a disolvente. Ya que estos dos compuestos tienen un punto de ebullición menor al del resto de moléculas encontradas por Jia, se intentó aislarlas mediante destilación simple.

La primera destilación del hidrocarburo se llevó a cabo a una temperatura cercana a los 100°C, para así intentar extraer el benceno. A esta temperatura el resultado obtenido fue mínimo, habiéndose condensado tan solo una gota con un fuerte olor parecido al pegamento. Podemos concluir entonces que en caso de que haya benceno en la mezcla, su cantidad es mínima.

Al subir la temperatura a 160°C se obtuvo como resultado un líquido transparente con fuerte olor a pegamento. Es altamente inflamable y liberó hollín en su combustión.

3.3 Mediciones CO₂

Durante las mediciones del CO₂ nos dimos cuenta de las grandes pérdidas que añadía la caja que se utilizó. Fue para intentar mitigar este error que se

nos ocurrió hacer controles de acetona, para medir las pérdidas presentes, y así estimar la cantidad real de CO₂ emitido. Aunque estos controles nos ayudaron a tener valores utilizables, estos siguen teniendo grandes errores, ya que las pérdidas variaron demasiado, dificultando enormemente aproximarse al valor real.

El CO₂ retenido medio fue del 4% sin tener en cuenta los valores más dispares. (Figura 10)

Para el cómputo del valor real se utilizó la media de las pérdidas. Esto hizo que incluso una diferencia del 1% entre las pérdidas medidas y las reales introdujesen un error de hasta el 25%. Por eso, fueron necesarias numerosas mediciones.

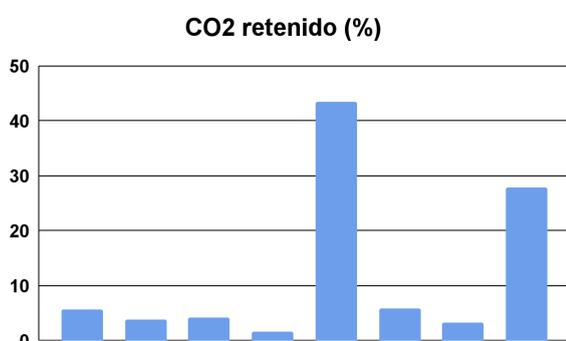


Figura 10. Pérdidas durante los controles de acetona.

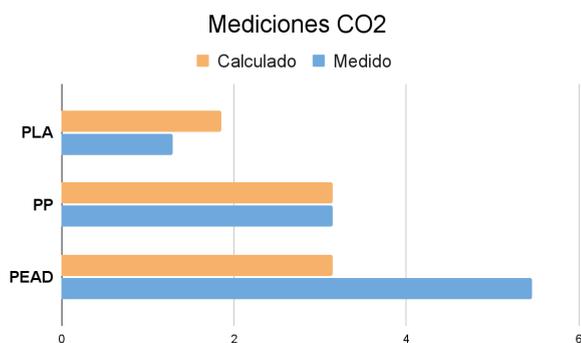


Figura 11. Gramos de CO₂ emitidos por cada gramo de plástico quemado. Valor calculado contra el medido.

Cabe destacar que de estas mediciones sólo las del PP están bien tomadas una cantidad de veces suficientes. El polietileno expandido de alta densidad, PEAD, fue el primer plástico que se utilizó para hacer las mediciones, y es por eso, que hubo muchas cosas que no se tuvieron en cuenta en sus mediciones, como la temperatura del interior de la caja o las pérdidas. Es probable que en estas

mediciones las pérdidas fueran algo menores, ya que la caja estaba en buen estado.

El polipropileno fue el segundo plástico que se utilizó, y en él se tuvieron en cuenta las pérdidas y las temperaturas tanto iniciales como finales. Además se realizaron 7 quemas distintas. Este es con diferencia el valor más preciso que hemos obtenido, coincidiendo en dos decimales con el valor calculado, 3,14 gramos de CO₂ emitidos por cada gramo de plástico quemado.

Con el PLA sólo tuvimos tiempo de hacer una medición, por lo que este valor es prácticamente inútil.

Con el combustible producido a partir del polipropileno estamos en una situación parecida a la del PLA, ya que solo se pudieron hacer dos mediciones. Además, debido a la pequeña cantidad de combustible producido, fue más difícil hacer bien las mediciones.

Se utilizaron 700 mg de combustible en cada una de las mediciones y se asumieron unas pérdidas del 4%, obteniendo unas emisiones de 2.07 y 2.36 gramos de CO₂ emitidos por cada gramo de combustible quemado. Este valor debería ser muy próximo al del polipropileno, ya que la cantidad de carbono no debería verse alterada durante la pirólisis.

3.4 Mediciones poder calorífico

Al medir el poder calorífico de los diferentes compuestos fue necesario también tener en cuenta las pérdidas introducidas por los instrumentos de medición. Para medir dichas pérdidas, se utilizó acetona como muestra de control.

Se realizaron cuatro quemas de control, obteniendo una energía retenida media del 6,03%. (Figura 12). Teniendo en cuenta este valor, se midió el poder calorífico del polietileno de alta densidad PEAD, el ácido poliláctico PLA y el combustible resultante de la pirólisis del polipropileno PP.

De los valores obtenidos, los más fiables serían los medidos del PEAD, ya que se realizaron 7 combustiones distintas, mientras que con el PLA y el combustible del PP tan solo 2 (Figura 13). Además hay que tener en cuenta que solo se hicieron 4 quemas de control con la acetona, todas ellas el mismo día.

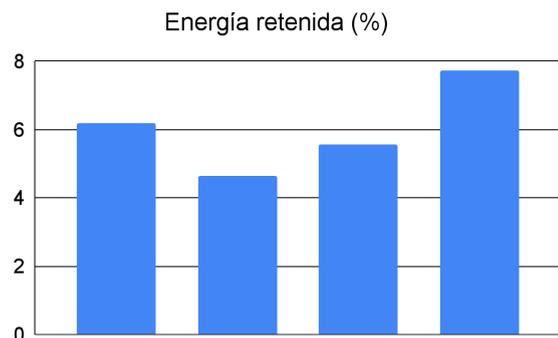


Figura 12. Energía retenida durante los controles de acetona.

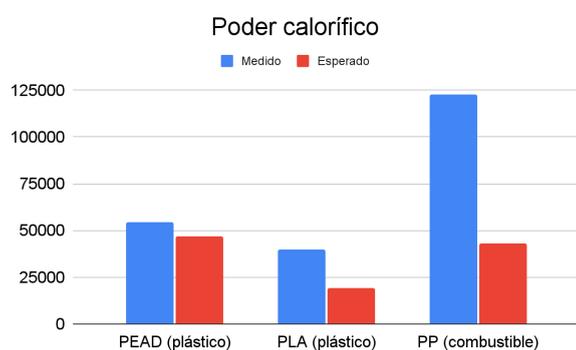


Figura 13. Poder calorífico de los distintos polímeros.

4 Conclusiones

Podemos concluir que es posible producir combustibles a partir de desechos plásticos con instrumentos de bajo coste y con relativa facilidad.

Además, en el caso del polipropileno, esta mezcla de hidrocarburos podría servir como base para la producción de un combustible apropiado para motores de combustión.

También hemos observado que es posible producir, a partir del poliestireno, tolueno. Sustancia química usada en la producción de plásticos y disolventes.

Desde el punto de vista medioambiental, se ha observado que el combustible emite menos CO₂ que el plástico del que proviene. Esto no tiene demasiado sentido, ya que la cantidad de carbono en el combustible no debería haber cambiado demasiado. Teniendo en cuenta que tan solo se han realizado dos mediciones del combustible, y que en estas se han supuesto las pérdidas, podemos suponer que los datos obtenidos son productos de errores en las mediciones.

En el caso de la energía emitida por el PP estamos ante el mismo caso: faltan datos. Aunque cabe esperar que el poder calorífico del combustible tampoco variaría mucho.

Si nos fijamos en la cantidad de energía almacenada por cada compuesto en comparación con su volumen, el polipropileno sale victorioso, al tener una densidad mayor. Suponiendo que tanto combustible como plástico tengan el mismo poder calorífico.

La única ventaja que podemos concluir de pirolizar los distintos polímeros utilizados es la versatilidad que otorgan los hidrocarburos líquidos. Además, en el caso del polipropileno, éste no emite humo u hollín. Aunque el hecho a partir de poliestireno sí que produce hollín, este puede utilizarse para la producción de compuestos como el benceno, tolueno o xileno, que podrían ser utilizados como aditivos para la gasolina.

5 Bibliografía

Mancheno, M., (2015). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis.

Patricia, M., (2012). Pirólisis de residuos de bioplásticos: Productos obtenidos del ácido poliláctico (PLA)

Roberto, N. (2019). Obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado.

Rodríguez, M. (2015). Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS.

Tenazoa, F. y Campos, A. (2018). Combustibles fuel-oil obtenidos de residuos plásticos mediante pirólisis.

Crespo, S. y Proaño. O. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos.

Yi-Chi Chien. (2010). Combustion Kinetics and Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Polylactic Acid Combustion.

Jia Wang., (2020). Converting polycarbonate and polystyrene plastic wastes into aromatic hydrocarbons via catalytic fast co-pyrolysis.

Barrio, J. (2017). Análisis comparativo de diferentes procesos de reciclado mecánico de poli(ácido láctico).