



Evaluación y diseño de tecnologías basadas en la pirólisis a pequeña escala, como alternativa para el aprovechamiento y disposición final de residuos plásticos en zonas rurales del país.

Sergio Adrián Alfonso Monroy

Código: 11231427657

Julián Steven Coronado Ramos

Código: 11231925117

Universidad Antonio Nariño

Programa: Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2022

Evaluación y diseño de tecnologías basadas en la pirólisis a pequeña escala, para el adecuado manejo y disposición final de residuos plásticos en zonas rurales del país.

Sergio Adrián Alfonso Monroy

Julián Steven Coronado Ramos

Proyecto de grado presentado para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director:

Ingeniero Raúl Echeverry

Línea de Investigación:

Disposición Final de Residuos

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2022

NOTAS DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado: Evaluación y diseño de tecnologías basadas en la pirólisis a pequeña escala, como alternativa para el aprovechamiento y disposición final de residuos plásticos en zonas rurales del país,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingeniero Ambiental.

Firma Tutor

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Contenido

Índice de figuras	6
Índice de tablas.....	6
Índice de ecuaciones.....	6
1. Introducción	7
2. Resumen	8
2.1 Abstract.....	9
3. Justificación.....	10
4. Objetivos	12
4.1 Objetivos específicos:.....	12
5. Metodología	13
6. Marco teórico	16
6.1 ¿Qué es la pirólisis?.....	16
6.2. Usos y utilidades de la pirólisis	18
6.2.1 Manejo de residuos en zonas rurales de Colombia	18
6.2.2 Métodos.....	19
6.2.3 Procesos aplicados de la pirólisis.....	21
6.3. Tipos de plásticos y sus transformaciones.....	23
6.4. COMBUSTIÓN EN LA PIRÓLISIS.	24
6.5 Métodos de Control en Sistemas de Combustión.....	25
6.6. Gestión de gases contaminantes	26
6.6.5 Emisión de gases contaminantes como las dioxinas y los furanos.....	26
5.7. Generación de combustibles.....	28
7. Antecedentes	29
8. Diseño de prototipo para el proceso de pirólisis	31
8.1 Materiales y métodos.....	33

8.2 Evaluación del diseño.....	35
8.3 Calculo de eficiencia de medición y producción.....	36
9. Resultados	39
9.1 Métodos de ensayos en el prototipo.	39
9.2 Obtención de combustible.	40
9.3 Recolección de datos.	44
9.4 Costos de Elaboración.	49
10. Análisis de resultados.....	50
11. Conclusiones.	52
12. Recomendaciones.....	54
13. Referencias.....	55

Índice de figuras

Figura 1 Esquema metodológico para la elaboración del proyecto, Fuente: Autores 2022	15
Figura 2 Fenómenos que intervienen en el proceso de la pirólisis Adaptado de: Neissen, W.R., 1978. Combustion and incineration processes. New York, Marcel Dekker consultado en Aracil, I. (2008). Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis	16
Figura 3 Proceso general de pirólisis, descripción por etapas, fuente: Autores 2022 según Información comercial Biotecnológica Colombia S.A.S 2021	22
Figura 4 Ecuación reacción del oxígeno con compuestos dentro de la pirólisis, Fuente: Aracil, I. (2008).....	24
Figura 5 Prototipo inicial realizado; Fuente: Autores 2022	31
Figura 6 Presencia de fugas en el prototipo inicial; Fuente: Autores 2022	32
Figura 7 Caneca de hierro utilizada como reactor; Fuente: Autores 2022	33
Figura 8 Tubos galvanizados; Fuente: Autores 2022.....	33
Figura 9 Contenedor de hierro; Fuente: Autores 2022.....	34
Figura 10 Plano del prototipo; Fuente: Autores 2022.....	35
Figura 11 Modelado del prototipo; Fuente: Autores 2022.....	35
Figura 12 Análisis Modular del sistema. Fuente: Autores 2022	37
Figura 13 Residuo PET Fuente: Autores 2022	40
Figura 14 Carbón resultado de PET Fuente: Autores 2022	41
Figura 15 Llama proveniente del PET Fuente: Autores 2022.....	41
Figura 16 Generación de gas de LDPE. Fuente: Autores 2022	42
Figura 17 Tamaño del carbón Fuente: Autores 2022.....	42
Figura 18 Carbón a base de LDPE Fuente: Autores 2022	43
Figura 19 Cantidad de carbón como resultado. Fuente: Autores 2022	43
Figura 20 Generación de combustible líquido según la práctica (LDPE) Fuente: Autores 2022	44
Figura 21 Generación de combustible de carbón (LDPE) Fuente: Autores 2022.....	45
Figura 22 Fase líquida de la práctica de LDPE Fuentes: Autores 2022.....	45
Figura 23 Generación de fase líquida a base de PET Fuente: Autores 2022	46
Figura 24 Generación de fase sólida a base de PET Fuente: Autores 2022.....	47
Figura 25 Fase líquida obtenida del PET Fuente: Autores 2022.....	47
Figura 26 Comparativa entre las dos fases líquidas Fuente:2022	48
Figura 27 Prueba con tapas plásticas Fuente: Autores 2022.....	48
Figura 28 Facturas accesorios usados Fuente: Autores 2022.....	49

Índice de tablas

Tabla 1 Características de los procesos de pirólisis más relevantes	21
Tabla 2 Características de los gases combustibles como fuente de calor	38
Tabla 3 Ensayos de tiempo para la eficiencia del prototipo (LDPE) Fuente: Autores 2022	44
Tabla 4 Generación de combustible a base de PET Fuente: Autores 2022.....	46

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Cálculo de densidad	14
--------------------------------------	----

1. Introducción

A lo largo de los años se ha evidenciado un crecimiento exponencial de la población, lo cual genera más demanda como también un sin fin de problemas ambientales, en este caso se tratará el tema de los plásticos y la manera que se les da su disposición final, esto permite conocer que la mayoría de estos residuos no se les da su debida disposición, y terminan en el relleno sanitario. El plástico ha sido necesario ya que es muy polivalente para diferentes ámbitos de la vida humana, yendo de un simple vaso pasando por juguetes hasta herramientas de trabajo, el plástico utilizado actualmente son polímeros con largas cadenas flexibles de compuesto químico, proveniente del petróleo y del gas natural el cual es extraído a través de grandes máquinas. La alta demanda de los plásticos y las pocas prácticas de reciclaje han producido la acumulación de los residuos en el ambiente, como también la disminución de la vida útil de los residuos sanitarios y la bioacumulación de los micro plásticos en cuanto a su desintegración.

En zonas rurales de Colombia no se tiene la recolección de residuos, causando prácticas como la quema, la creación de fosas para estos residuos y así enterrarlos, la no utilización de punto de acopio en las diferentes veredas del país, lo cual produce que muchos campesinos hagan quema de todos sus residuos sólidos. Falta de presencia del estado en estos puntos demuestra como estas comunidades están vulnerables y sin apoyo, la falta de recolección de empaques de agroquímicos y puntos de acopio debidamente identificados, y el no contar con programas de reciclaje en las veredas hace que este problema aumente.

El presente documento es diseñado con la finalidad de implementar la pirólisis como proceso que ayude a estas zonas alejadas y que no cuentan con una debida recolección de residuos y mucho menos capacitaciones o conocimientos sobre el aprovechamiento de este tipo de residuos, esto da fundamento para pensar en la evaluación y diseño de tecnologías basadas en la pirólisis a pequeña escala, como alternativa para el aprovechamiento y disposición final de residuos plásticos en zonas rurales del país.

2. Resumen

Los residuos plásticos en los últimos años han generado una problemática a nivel mundial dado a su bajo nivel de descomposición en el ambiente, la consecuencia que generan los plásticos es la misma desintegración de sus partículas y la bioacumulación que estos producen, la quema de estos plásticos en zonas de difícil acceso como lo son zonas rurales hace que la liberación de gases efecto invernadero sean gases tóxicos para el ser humano y especies de animales que habitan cerca de estos lugares, provocando un gran impacto ambiental. Se han planteado procesos para el aprovechamiento de residuos plásticos, entre los cuales está el reciclado químico en los que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis, reciclado mecánico y aprovechamientos energéticos.

En el estudio presentado se desarrollará el proceso de pirólisis plástica, orientado a cualquier residuo plástico generado por campesinos y comunidades en zonas rurales, los residuos plásticos quemados en estas zonas producen gases altamente tóxicos, afectando tanto la zona como a los campesinos, derivado de la inhalación de estos gases emitidos por estas prácticas.

Previo a las experimentaciones anteriores, las temperaturas de trabajo el proceso de la pirólisis debe ser superior a 400°C, ya que temperaturas menores generara productos con consistencia de aceite, y al garantizar esta temperatura, el proceso se desarrollara en su totalidad, formando así combustibles, en los ensayos se determinó que el tiempo en que el proceso está activo la generación de combustible líquido no varía teniendo en cuenta los tiempos de medida los cuales fueron de 0.5 horas, 1 hora y 1.5 horas, por lo que se opta trabajar a menores tiempos para tener una mayor eficiencia en el proceso de pirólizar el plástico.

Las investigaciones cualitativas previas arrojan resultados de análisis físicos y cromatográficos, de las fracciones líquidas del proceso de pirólisis de residuos plásticos, tienen características de combustibles y derivados del petróleo, utilizados para el aprovechamiento de estas comunidades evitando las emisiones atmosféricas y la inhalación del mismo gas, complementado con los cambios físico-químicos del suelo gracias al derretimiento del plástico, esto causa que los suelos se conviertan áridos y de poco aprovechamiento agropecuario (Medina Gaspar, S. A. 2021).

2.1 Abstract

Plastic waste in recent years has generated a worldwide problem due to its low level of decomposition in the environment, the consequence that plastics generate is the same disintegration of their particles and the bioaccumulation that they produce, the burning of these plastics in areas of difficult access as well as in rural areas, it causes the release of greenhouse gases as well as toxic gases for humans and animal species that live near these places is of high risk and environmental impact. Processes have been proposed for the use of plastic waste, among which is chemical recycling, which includes depolymerization, gasification and pyrolysis, mechanical recycling and energy use.

In the study presented, the process of plastic pyrolysis will be developed, oriented to any plastic waste generated by peasants and communities in rural areas, which is the toxic waste burned in these areas with highly toxic indices, derived from the inhalation of these gases emitted by these practices.

Prior to the previous experiments, the temperatures to work the pyrolysis process must be higher than 300 ° C since temperatures lower than this will generate products with the consistency of oil, guaranteeing that temperature the process will be developed in its entirety, thus generating the fuels raised previously, in the tests it was determined that the time in which the process is active the generation of liquid fuel does not vary taking into account the times of half an hour, an hour and an hour and a half, so it is decided to work at shorter times to have greater efficiency in the process of pyrolyzing the plastic.

Previous qualitative research yields result that physical and chromatographic analysis, that the liquid fractions of the pyrolysis process of plastic waste, have characteristics of fuels and petroleum derivatives, used for the use of these communities avoiding atmospheric emissions and inhalation of the same gas., complemented with the physical-chemical changes of the soil thanks to the melting of the plastic, this causes the soils to become arid and of little agricultural use.

3. Justificación

Los residuos plásticos se han convertido en un problema a nivel mundial debido a su inadecuada disposición final, así mismo la difícil degradación del plástico deja grandes desafíos, como impactos ambientales de gran complejidad (Miranda D, 2022). Por esta razón es necesario plantear soluciones que mitiguen estos impactos, que sean más sostenibles económica y socialmente.

La pirólisis permite transformar y degradar los residuos plásticos generando un combustible sustentable debido a su forma de obtención; dentro del proceso encontramos principalmente tres tipos de productos:

1. **El Combustible:** el cual puede ser usado para máquinas de trabajo agrícola como motosierras, guadañadoras, cortadoras etc.; las cuales son de gran utilidad en las zonas rurales del país, donde el acceso al combustible puede representar problemas económicos y sociales (Gil, A. S. 2019).
2. **El gas:** generado dentro del proceso puede ser utilizado para usos doméstico o industrial, dentro de este prototipo este gas será usado para autoalimentar el sistema de combustión por calor del reactor de pirólisis.
3. **El residuo:** El que encontramos es el “carbón” generado dentro de reactor, este con un proceso de selección puede ser dispuesto como residuo ordinario de igual manera reduce en una cantidad bastante considerable el volumen del residuo haciendo el proceso de disposición mucho más eficiente. Estos residuos que en su mayoría son altamente aprovechables plantean una solución práctica, para las familias rurales de Colombia, adicional aborda el problema de los residuos plásticos en el campo que no cuenta con un sistema eficiente de recolección de residuos, esta es la razón fundamental de este proyecto de investigación que busca dar solución a los problemas de los residuos plásticos y de manera transversal atender un problema social económico y ambiental, por la manera incorrecta que se realiza el manejo de estos residuos, de la misma forma se genera una

alternativa que produce gas, disminuyendo la carga económica para la vivienda rural al hacer la compra del cilindro de gas o la quema de madera para la preparación de alimentos, atendiendo los ODS (objetivos de desarrollo sostenible), son algunas de las ventajas y beneficios que el proceso de pirólisis puede representar para las comunidades campesinas de las zonas rurales.

4. Objetivos

Evaluar el proceso de la pirólisis como mecanismo de aprovechamiento de los residuos plásticos generados en zonas rurales del país, por medio del diseño y construcción de un prototipo de pirólisis a pequeña escala y de bajo costo.

4.1 Objetivos específicos:

1. Diseñar un prototipo de pirólisis a pequeña escala y de bajo costo.
2. Construir el prototipo de pirólisis diseñado para comunidades de bajos recursos, con características simples.
3. Evaluar la eficiencia del prototipo en el tratamiento de residuos, de igual forma determinar los posibles combustibles que puedan ser generados durante el proceso.

5. Metodología

El Proyecto se llevará a cabo en 4 fases en donde se identificarán los procesos actuales, se evaluarán las eficiencias y se desarrollarán los procesos de mejora que sean necesarios o que puedan ayudar a mejorar dicha eficiencia, las etapas serán las siguientes:

- Fase Preliminar: En esta etapa se evaluarán la factibilidad del proceso, así como el acceso a la información de recolección de residuos, Así mismo se presentará un informe de la importancia y necesidad de la implementación de este proceso para la reducción de emisiones atmosféricas provenientes de la quema de residuos plásticos.
- Fase Diagnóstico: Dentro de esta se estudiarán los procesos actuales, así mismo se verificará la información documental como procedimientos, caracterización y formatos de control, a partir de las visitas técnicas, se realizará un diagnóstico inicial para la identificación de problemáticas presentadas en cuanto al sistema de recolección de residuos, lo cual se realizará evaluando las fortalezas y debilidades de la operación y de esta manera obtener un diagnóstico claro.
- Fase de Evaluación o Estudio: En esta etapa se procederá a realizar diferentes pruebas con la implementación del prototipo, así mismo se realizarán mediciones del proceso con el fin de tener las cantidades producidas a partir de cierto peso del plástico y realizar observaciones que mejoren el sistema desde su operación.

La metodología a utilizar consiste en la evaluación de tres variables con el fin de desarrollar un prototipo efectivo para el tratamiento o disposición final de residuos de las zonas rurales campesinas más puntualmente los residuos plásticos y sus variaciones, esto partiendo de un método pre experimental, en el cual se evaluaran 3 variables concretas y que serán significativas dentro del proceso, se realizara la evaluación de las mismas al aplicar 5 repeticiones del experimento dentro del reactor del prototipo de pirólisis, en cada repetición se tendrá en cuenta el cambio de estas variables y se tomaran los datos para la eficiencia del prototipo. Las tres variables a analizar serán:

Densidad: esta puede definirse como la relación que existe entre la masa de un cuerpo o material frente al espacio o volumen que el mismo ocupa en el espacio (ICFES, 1999), se

estableció a la densidad como una variable independiente ya que no fue objeto de la investigación el cambiar las densidades del material a pirolizar, por el contrario la finalidad del prototipo es que pueda procesar el material o los residuos tal cual sean generados en las zonas rurales, de igual manera es importante tenerla en cuenta debido a que los residuos tienden a variar mucho en su densidad dependiendo del manejo que le dé el generador o puntualmente dependiendo de la capacidad de su compactación, lo cual si interferirá en la cantidad que pueda pirolizar el prototipo. Para determinar la densidad de los materiales se utiliza la siguiente formula:

$$\begin{aligned} \text{masa} &= \text{Kg de materia inservible depositada en el taque} \\ \text{volumen} &= \text{ancho} * \text{largo} * \text{altura de la masa de residuo en el tanque} \end{aligned}$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa Kg}}{\text{Volumen m}^3}$$

Ecuación 1 Calculo de densidad

Ecuación 1. Cálculo de densidad Fuente: (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias Ambientales (CEPIS, 1999).

Tiempo: Dentro de esta magnitud física se busca medir la cantidad de tiempo necesario para procesar los materiales o residuos, estas variables es dependiente asociada a la masa (Kg) del material a pirolizar, de igual manera dependiente de la temperatura del proceso °C dentro del tanque reactor.

Residuo final: El residuo generado dentro del proceso de la pirólisis será considerado como un subproducto que se extraerá posterior a la finalización del ciclo de pirólisis, se identifica como una variable dependiente ya que depende directamente de la temperatura proporciona al sistema, es decir a menor temperatura menor residuo final se obtendrá (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2012), de igual manera se menciona como un subproducto debido a que no se caracteriza con el fin de conocer su composición puntual aunque según la teoría se influye que son compuestos carbonados complejos, lo cual no determina el uso del mismo dentro de otros procesos, de igual manera el residuo no fue analizado dentro del proyecto.

Para realizar el proyecto se tendrá en cuenta la metodología PHVA (Planear, hacer, verificar y actuar) la cual se aplicará mediante el siguiente proceso descrito en la figura 4:

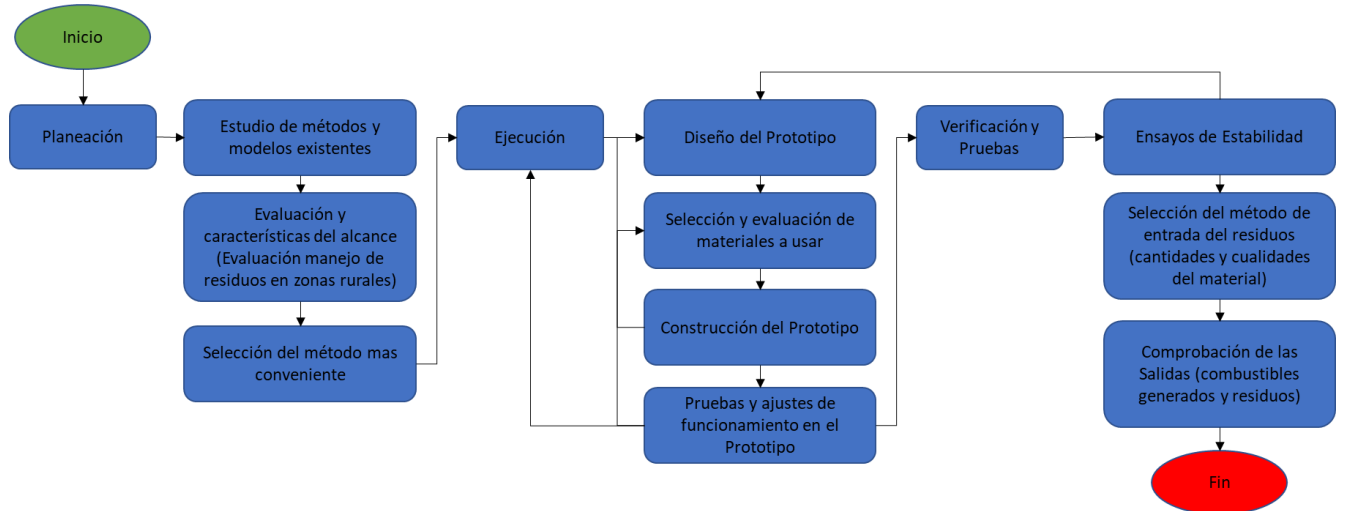


Figura 1 Esquema metodológico para la elaboración del proyecto, Fuente: Autores 2022

Por Consiguiente, dentro de la etapa de planeación se evaluará el marco teórico y conceptual descrito dentro del siguiente capítulo.

6. Marco teórico

6.1 ¿Qué es la pirólisis?

La pirólisis corresponde a un proceso por medio de altas temperaturas en ausencia de oxígeno como un medio oxidante, en cual busca la descomposición físico-química de los materiales. Los productos que se generan de este proceso pueden ser gases, líquidos y un residuo carbonoso en donde las cantidades de generación de cada uno pueden variar dependiendo del material a transformar y de los parámetros o características de operación del sistema, uno de los parámetros más relevantes para que se lleve a cabo la pirólisis es la ausencia de oxígeno, aunque también se puede utilizar en sentidos más amplio para describir los cambios que provoca el calor incluso con presencia de oxígeno en los materiales, este proceso se puede conocer como pirólisis oxidativa. Aracil, I. (2008).

La pirólisis es una opción a parte de la combustión o incineración de materiales para la disposición final de los mismos, dentro de las que de una forma u otra se puede aprovechar el potencial energético de los materiales principalmente de los plásticos dentro de los desechos urbanos. Castells, X. E., & García, E. V. (2012).

En la figura 1 se puede evidenciar los diferentes fenómenos que intervienen en el proceso de la pirólisis. Este proceso puede llegar a ser complejo y ser simplificado de cierta manera y puntualmente consiste en la descomposición de un sólido a través de reacciones por medio de la temperatura, las primeras reacciones producen componentes los cuales son utilizados posteriormente para las siguientes fases de la pirólisis, las reacciones secundarias y las proporciones de los procesos primarios, dependerán de las condiciones del sistema.

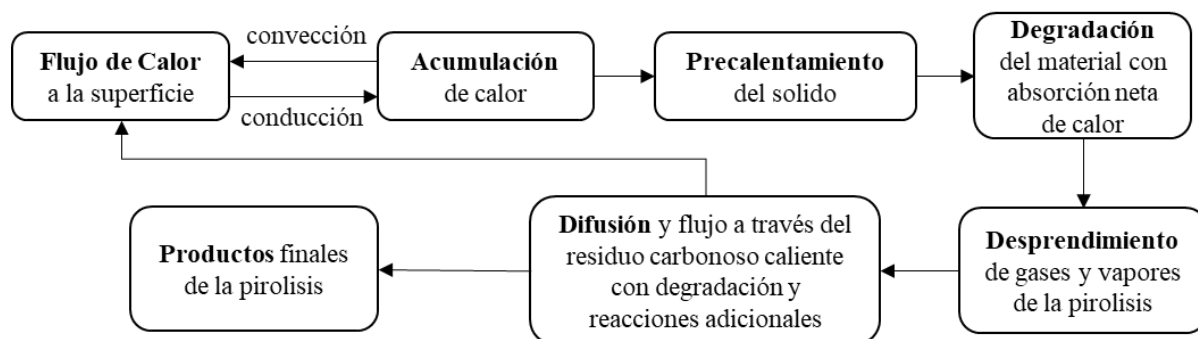


Figura 2 Fenómenos que intervienen en el proceso de la pirólisis Adaptado de: Neissen, W.R., 1978. *Combustion and incineration processes*. New York, Marcel Dekker consultado en Aracil, I. (2008). *Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis*

Ignacio Aracil Sáez en su tesis doctoral de la universidad de Alicante menciona: Los

parámetros que influyen en la composición y rendimiento de los productos químicos resultantes de un proceso de pirólisis son muy diversos. Entre ellos cabe destacar:

- La estructura y composición del material que se va llevar la pirólisis: esto debido a la contribución de cada uno de los elementos, como por la composición de la materia misma, puntualmente se refiere a los enlaces y cadenas químicas de los mismos.
- La temperatura: esta es una de las variables fundamentales para el proceso, debido a que favorece el desenlace de las moléculas complejas lo cual da a lugar a otras moléculas más sencillas lo que se conoce como craqueo térmico, esto implica un aumento en el gas producido en comparación con el rendimiento de líquidos y sólidos. También promueve las reacciones cíclicas de algunas moléculas como las de compuestos aromáticos que dan lugar a moléculas estructurales más grandes, lo que se conoce como piro síntesis.
- La Humedad: se encuentra indirectamente relacionada con el factor de la temperatura, debido a que el calor que es usado para la evaporación del agua contenida dentro del material a pirolizar provoca que el proceso disminuya su temperatura según a la considerada para el proceso.
- La velocidad de calentamiento: esta junto con la temperatura son variables importantes del proceso de la pirólisis, ya que marcan la diferencia entre la pirólisis lenta y la rápida, en la pirólisis lenta, la descomposición es generada y controlada por la reacción química y el tipo de residuo en su contenido de carbono es mayor, mientras que en la pirólisis rápida donde las velocidades de calentamiento van de 200 a 300 °C/S , la descomposición está controlada por la transmisión de calor y de esta manera los gases generados y los residuos líquidos son mayores.
- Tiempo de Residencia: Un tiempo suficientemente alto de proceso de los volátiles, permite que las reacciones de craqueo de los materiales como alquitranes primarios de lugar a gases de mayor extensión.
- El tamaño de las partículas y el caudal o la cantidad de muestra son otros factores importantes que interfieren en la transmisión de calor al material solido así mismo el empleo de catalizadores, esto puede producir una variación en el sistema que afecte el rendimiento y la selectividad de los productos a tratar.

De esta manera la pirólisis puede optimizar la producción de carbón cuando se lleva a cabo lentamente por tiempos prolongados de horas o hasta días, y la formación de líquidos se ve favorecida con pirólisis rápida con tiempos de unos pocos segundos y temperaturas de máximo 650 °C, mientras que, si el proceso se realiza a temperaturas y reacciones más elevadas, se prioriza la producción de gas. (Aracil I, 2008)

6.2. Usos y utilidades de la pirólisis

La pirólisis principalmente se puede utilizar para la transformación final de plásticos con la opción de utilizar los subproductos como combustibles u otras finalidades productivas, aprovechando la conversión de materiales por medio del calor en ausencia de medios oxidantes, debido a esto, es utilizada para el tratamiento y disposición final de residuos, dependiendo de las características de cada residuo se pueden obtener diferentes productos los cuales pueden ser beneficiosos para determinados procesos productivos como la parafina, utilizado en la fabricación de velas o combustibles líquidos y así mismo aditivos para la combustión en automóviles.

También puede ser usada para la fabricación de biocombustibles partiendo de la biomasa, la transformación de la materia orgánica por medio de calor para obtener los productos como carbón coque, aceite y gas. Un ejemplo de las diferentes aplicaciones de la pirólisis es la planta piloto de la pontifica universidad católica de Perú, que puede producir un biocombustible de segunda generación a partir de desechos orgánicos (Klug, M, 2012).

Una utilidad importante del proceso de la pirólisis es su capacidad para controlar la contaminación del aire frente a la incineración a la hora de disponer residuos, de igual manera ayuda a disminuir el volumen de los materiales transformándolos en materiales estériles lo cual aumenta la vida y mejora la calidad de los rellenos sanitarios en relación de los materiales que no sean tratados antes de su disposición, además de tener la ventaja que durante el proceso se pueden producir diversos subproductos como los combustibles. Briceño V., Gabriela. (2018).’

6.2.1 Manejo de residuos en zonas rurales de Colombia.

“En el campo colombiano, el tratamiento de los residuos hogareños es un problema serio, porque según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (Dane), solo el 23,9% de la población rural del país cuenta con servicio de recolección de basura, dejando a un 76,1% sin la posibilidad de deshacerse correctamente de los desechos.”

(Gutiérrez, 2020)

Según un artículo publicado por la cadena radial de RCN de Colombia el 25 de febrero del año 2020 por la periodista Herlency Gutiérrez “*el 76% de la población del campo no tiene donde dejar la basura*”, arroja datos importantes sobre la disposición de residuos en zonas rurales del país, dentro del mismo se menciona que la mayoría de los residuos en estas zonas son enterrados o incinerados, situación que se utilizan hoy en día y no conlleva una buena práctica de gestión y se convierte en un importante fuente de contaminación, del aire y el suelo. Además, y según entrevistas hechas por la cadena radial a diferentes habitantes de zonas rurales, se evidencio que la capacitación y controles en cuanto al manejo de residuos en estas zonas son nulos, en el decreto 2981 de 2013 y la resolución 754 de 2014 de Colombia, se dicta que los alcaldes son los responsables de garantizar a los habitantes los servicios públicos, pero este servicio se encuentra vulnerado debido a que generalmente solo se maneja para las cabezas urbanas como los pueblos y algunas veredas cercanas, por otro lado cabe resaltar que muchos de los municipios y veredas del país no cuentan con rellenos sanitarios ni plantas adecuadas para el tratamiento de residuos lo cual conlleva en muchos casos en la disposición por “botadero a cielo abierto” sistema que crea impactos ambientales negativos e importantes para el medio ambiente.

Según la normativa vigente del manejo y disposición final de residuos en Colombia la responsabilidad debe ser de los municipios correspondientes, sin embargo, según el DANE, solo el 23.9% de los colombianos que viven en zonas rurales cuentan con el servicio de recolección de distintos residuos, produciendo que en estas zonas no haya aprovechamiento de los mismos. Lo cual produce dicha problemática es que, aunque los propietarios de estas tierras quieran reutilizar y hacer su propia gestión a los residuos no logren ese objetivo, ya que en muchas ocasiones por falta de conocimiento no se realicen las practicas adecuadas, lo que genera un mal manejo de los mismos, causando más impactos ambientales que la disposición que se lleva a cabo (Gutiérrez, 2020).

6.2.2 Métodos

Según la energía térmica para que esta se lleve a cabo el proceso, se puede dividir a la pirólisis en dos grupos (Ceupe, 2019):

Sistemas alotérmicos o indirectos: La fuente de la energía es el gas que es producido como

residuo dentro del proceso, y que se transmite por conducción y por radiación desde las paredes del reactor.

Sistemas directos o autotérmicos: En este la energía que se necesita para la generación de temperatura es proporcionada por la combustión de parte de la materia cargada.

Desde su operación técnica, la pirólisis se puede clasificar en (Ceupe, 2019):

- **Pirólisis convencional:** Donde se utilizan equipos de lecho móvil, giratorios o también con horno de parrilla. Estos sistemas pueden llegar a ser directos o indirectos.
- **Pirólisis rápida:** este método se caracteriza por realizarse en condiciones que favorecen la transferencia de calor, y tasas de calentamiento a los materiales en un reactor con una temperatura aproximada de 500°C. la pirólisis es seguida por una acción rápida de enfriamiento, separación y la condensación de un líquido el cual puede ser el combustible, al evitar la fragmentación química se obtiene un gas primario el cual al ser enfriado genera combustible líquido, parte de ese gas no condensable queda en esa forma inicial sin embargo el plástico que no entra al proceso queda en forma de carbón, esto dado al impedir la recombinación de los productos primarios de la pirólisis (Klug, M, 2012).
- **Pirólisis instantánea:** En este proceso el lecho fluidizado se encuentra en dos etapas, en el que se produce la combustión de un sólido y esto es lo que transfiere en forma de calor al sistema. También es conocida como Flash pirólisis.

Al tener en cuenta la temperatura a partir de la cual se llevará a cabo el proceso, la pirólisis se clasifica del siguiente modo (Ceupe, 2019):

- Pirólisis a velocidad y temperatura de calentamiento bajas.
- Pirólisis a velocidad y temperatura de calentamiento altas.
- Pirólisis especiales: La pirólisis rápida la pirólisis a vacío e instantánea.

A continuación, se exponen los tipos de pirólisis con las características óptimas para su operación.

Tabla 1 Características de los procesos de pirólisis más relevantes

Proceso de Pirólisis	Tiempo de Residencia	Velocidad de Calentamiento	Temperatura Final (°C)	Producto Final	Poder Calorífico (Mj/Kg)
Carbonización	Días	Muy baja	400	Carbón	30
Convencional	5-30 Min	Baja	600	Char, Bio-oil, gas	20
Rápida	< 2 seg	Muy Alta	Aprox. 500	Bio-oil	20
Flash	< 1 seg	Alta	< 650	Bio-oil, químicos, gas	15
Ultra-Rápida	< 0.5 seg	Muy Alta	Aprox. 1000	Químicos, gas	30
Vació	2-30 seg	Medio	400	Bio-oil	15-20
Hidro-pirólisis	< 10 seg	Alta	< 500	Bio-oil	15-20
Metano-pirólisis	< 10 seg	Alta	700	Químicos	15-20

Fuente: Figueroa Moreno, J. D., & Chela Hinojosa, S. W. (2021).

6.2.3 Procesos aplicados de la pirólisis

Actualmente el proceso de pirólisis es utilizado principalmente para el tratamiento de residuos los cuales tienden a tener dificultades a la hora de dar una disposición final como es el caso de las llantas usadas en Colombia, y que de acuerdo con la resolución 1326 del 6 de Julio de 2017, las llantas desechadas de vehículos particulares y las llantas desechadas de camiones mineros, no podrán ser acopiadas y deberán recibir un tratamiento diferente teniendo en cuenta que su tiempo de degradación es lenta, esto dio espacio a nuevos proyectos que buscan aprovechar este material (llantas usadas) por medio de la pirólisis. (Pimienta Correa, G, 2020).

Así mismo encontramos empresas dedicadas a la fabricación y venta de plantas de pirólisis como es la empresa BESTON de España la cual dice que las plantas de pirólisis es el producto más vendido de la compañía debido a que es un equipo que puede ser usado para procesar desechos, como llantas de vehículos obsoletas, plásticos, productos de diferentes cauchos, lodos entre otros, esto mediante altas temperaturas para obtener aceites, carbón y gas

combustible, el proceso es amigable con el medio ambiente y libre de gases contaminantes convirtiendo los desechos en productos comercializables. (BESTON® GROUP CO., LTD., 2022).

En Colombia se conoce que la empresa Bioecologica Colombia S.A.S cuenta con una planta procesadora de residuos por medio de la pirólisis lenta generada por medio de un reactor de pirólisis como los mencionados anteriormente que se comercializan a nivel mundial, este proceso es de los pocos en el país, donde a través de nueva tecnología podemos darle una vida útil a residuos, además de esto en el proceso de transformación, la planta de pirólisis no genera emisiones atmosféricas, ya que el proceso es en ausencia de oxígeno, por lo cual hace que sea una alternativa ambientalmente eficiente. La planta se ubica en el municipio de Sogamoso en el departamento de Boyacá, su funcionamiento se puede observar en la figura 3.

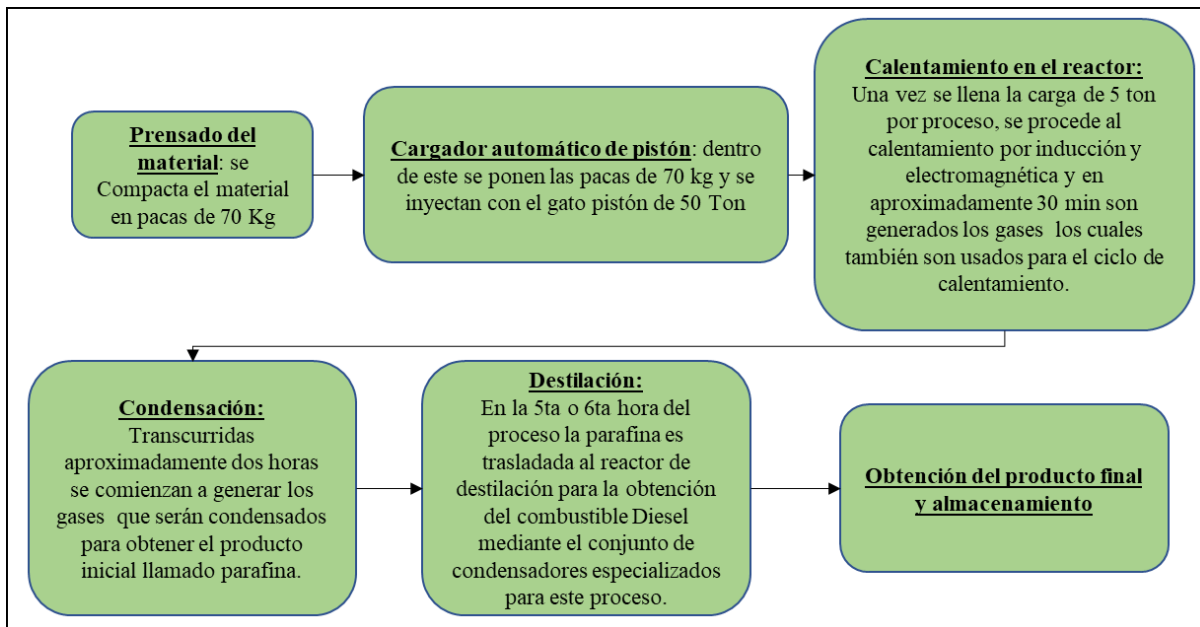


Figura 3 Proceso general de pirólisis, descripción por etapas, fuente: Autores 2022 según Información comercial Biotecnológica Colombia S.A.S 2021

Los procesos de la pirólisis son entonces usados principalmente para el tratamiento de residuos y obtención de combustibles comercializables, alrededor del mundo ya se comercializan maquinas, para que el proceso de disposición final de residuos, lo que trae diversos beneficios si se compara con otros métodos tradicionales de disposición final.

6.3. Tipos de plásticos y sus transformaciones

Los plásticos pueden catalogarse de diferentes maneras, la clasificación propuesta por Crawford en su trabajo *Plastics Engineering*, 3rd ed., R. J. Crawford, Butterworth Heinemann, Oxford, de 1999, se basa en las características más destacadas en el diseño de cada pieza de plástico y de la selección del material adecuado para el fin que se quiera en la industria según corresponda, según esta clasificación se definen brevemente sus estructura y propiedades como las siguientes:

- **Los termoplásticos:** Estos son polímeros lineales los cuales pueden estar o no ramificados, esto debido a que no se encuentran entrecruzados, estos polímeros son solubles en algunos disolventes, Al compararse con los demás plásticos, estos termoplásticos se fabrican y se utilizan en grandes proporciones en la industria y son los plásticos más comunes dentro de ellos se encuentran el PE, PP, PS y PVC. Los cuales son los plásticos más usados a nivel mundial. (Beltrán, M. 2011).
- **Los Elastómeros o Cauchos:** Estos están compuestos principalmente de polibutadienos que tienen dobles enlaces en la cadena primordial, esto causa que las cadenas del polímero se hallen enrolladas sobre sí mismas, lo que le da la propiedad de una gran flexibilidad. Estos plásticos son capaces de resistir deformaciones y volver posteriormente a su forma inicial, dentro de estos se puede producir un entrecruzamiento parcial de cadenas lo que elude que cada vez que estos plásticos sean sometidos a una deformación por fuerzas externas las moléculas se desplacen unas sobre otras, lo que de no ser así provocaría una deformación irreversible. Son materiales muy resistentes a aceites grasas y también al ozono, demuestran gran capacidad de flexibilidad a temperaturas bajas, los elastómeros poseen temperaturas de transición vítrea menores a la temperatura ambiente, de igual manera tienen grandes desventajas de los termoestables y es que necesitan un proceso lento que consume grandes cantidades de energía y tiempo para su fabricación y no son reciclables (Beltrán, M. 2011).
- **Plásticos Compuestos o composites:** Estos son materiales con propiedades mecánicas bastantes buenas, tienen una alta dureza y resistencia a la tracción, Son formados por dos componentes inmiscibles los cuales forman crean dos fases separadas, debido a esto se les confiere propiedades atrayentes, constan de un polímero termoplástico o

termoestable y de una carga de fibra con muy buena resistencia a la tracción, generalmente es fibra de vidrio o de carbón. (Beltrán, M. 2011).

- **Plásticos Espumados:** Estos son termoplásticos con una estructura celular, contienen proporciones grandes de celdas finas de gas, estas celdas o celdillas pueden ser abiertas o cerradas. (Beltrán, M. 2011).
- **Cristales líquidos (LCP):** También son termoplásticos que se basan en poliésteres aromáticos, los cuales presentan estructuras ordenadas en una sola dirección espacial, aun cuando se encuentran en estado líquido o fundido. Si a estos materiales se les aplica una fuerza de deformación, las moléculas se pueden deslizar unas sobre otras, pero no pierden en ningún momento la estructura de orden. Este orden especial de su estructura les da a estos materiales propiedades mecánicas, ópticas y térmicas interesantes. En la actualidad son de gran interés pues se encontró un uso adecuado en los dispositivos gráficos de visualización. (Beltrán, M. 2011).

6.4. COMBUSTIÓN EN LA PIRÓLISIS.

La combustión y la pirólisis son procesos complejos con varias etapas y reacciones químicas. La presencia de oxígeno es la principal diferencia dentro de estos dos procesos, por lo que además de las variables de la pirólisis el valor de la cantidad o concentración de oxígeno es fundamental en la combustión, el oxígeno tiene dos formas de reaccionar, si se generan grandes cantidades de volátiles puede producir la combustión de los gases que se obtienen en la pirólisis lo que al quemarse forma el hollín o llama; y por otra parte si el oxígeno se une con el sólido ya sea por pocos volátiles o por exceso de oxígeno se produce combustión del sólido como brasas.

Según la teoría la reacción en general de la combustión con un residuo que contenga C, H, O, S y Cl y el oxígeno se puede presentar según la siguiente ecuación:

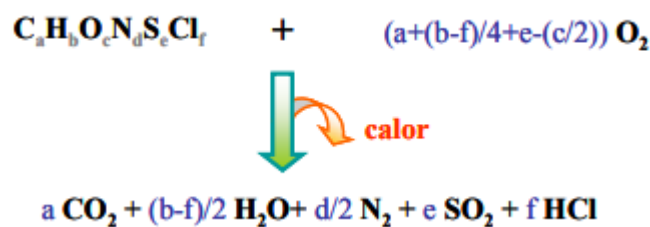


Figura 4 Ecuación reacción del oxígeno con compuestos dentro de la pirólisis, Fuente: Aracil, I. (2008).

Dentro del proceso de pirólisis la combustión nunca se dará por completo, y puede generar compuestos diferentes como el monóxido de carbono resultado de la combustión incompleta, cabe destacar que, dentro de la combustión, el cloro del residuo forma cloruro de hidrogeno, aunque si se está en presencia de un exceso de oxígeno se establecerá un equilibrio entre el compuesto y el gas de cloruro. Con el nitrógeno generado en el residuo el compuesto mayoritario que se formará será Nitrógeno gaseoso N_2 , pero también existe la posibilidad de formación de óxidos de nitrógeno bajo algunas condiciones específicas, la composición típica de gas en un proceso de incineración puede ser la siguiente: O_2 (6-15%), H_2O (8-20%), CO_2 (5-10%), CO (100-200 ppm), HCl (10-1500 ppm), Cl_2 (5-50 ppm) (Font y col., 2007).

6.5 Métodos de Control en Sistemas de Combustión.

El comportamiento del combustible es primordial para el diseño y la operación de los equipos de pirólisis de una forma eficiente y segura, y principalmente en el contenido que tenga el combustible de minerales, ya que la ceniza o residuos gaseosos generados en el proceso dependerán directamente de las reacciones químicas que se den a lugar debido a estos minerales dentro del combustible, por medio de la composición química y propiedades físicas de las cenizas se puede predecir la formación de depósitos por componentes dentro de la caldera del proceso y de esta manera calcular su potencial de corrosión, erosión y abrasión.

El cómo se comporten las cenizas dentro del sistema de pirólisis dependiente en gran porcentaje al combustible, principalmente cuando se tratan residuos.

Las cenizas dentro del sistema se comportan dependiendo plenamente del combustible, principalmente cuando se trata de residuos de la industria o cultivos energéticos. Los combustibles de estos residuos tienen un mayor contenido de materiales minerales, principalmente sodio, cloro, fósforo y potasio, también tienen un alto contenido de cenizas con punto de fusión bajo y un alto potencial de corrosión. Dentro del proyecto se analizará las características de la ceniza que se deriva de la combustión de los residuos, adicionalmente se incurrirá en los problemas generados en la quema de maderas para la disposición final de residuos en zonas rurales como generalmente se tiende a actuar frente a los residuos en estas zonas.

6.6. Gestión de gases contaminantes

El reactor de pirólisis se alimenta por su parte inferior de gas licuado del petróleo (GLP), oxígeno proporcionado por el mismo entorno, para ello se utilizara un bidón de gas propano permitiendo la entrada del gas mediante su apertura manual, y proporciona la energía calorífica requerida para alcanzar la temperatura de reacción en el reactor, una vez el proceso esté generando combustible sus gases residuales serán introducidos nuevamente al proceso productivo del prototipo, regulado con un registro manual para garantizar la salida eficiente según la quema que se requiera.

6.6.5 Emisión de gases contaminantes como las dioxinas y los furanos.

Al estar la pirólisis definida como la descomposición por temperaturas altas de una sustancia en ausencia de oxígeno o más bien con una porción muy baja del mismo. En cuanto a los residuos plásticos y materiales semejantes, una ausencia completa de una sustancia oxidante es imposible. Debido a esto, se puede producir durante el proceso de pirólisis una oxidación baja de algunos componentes y por esto se formarán dioxinas y otros productos provenientes de una combustión incompleta.

La pirólisis se desarrolla usualmente en temperaturas ente los 400 °C y 800 °C, a estas temperaturas los residuos se descomponen en líquidos, gases y cenizas que se conocen como un tipo de carbón “coque” de pirólisis. Las composiciones de estos productos dependerán principalmente de los residuos a tratar en el proceso también del tiempo y la temperatura que ésta se aplique. Una corta exposición a altas temperaturas obtiene el nombre de pirólisis inmediata, y maximiza el producto líquido. Si se utilizan temperaturas más bajas a lo largo del proceso junto con períodos de tiempo más largos, se obtendrán los carbones o las cenizas sólidas.

Aunque la mayoría de los procesos y guías identifican a la pirólisis como un proceso innovador y una técnica limpia PNUD (1999), en realidad no lo es. La pirólisis se ha usado a lo largo de siglos en la producción del tipo de carbón coque, FAO (1994), y además de manera común y a gran escala en la industria del petróleo y la química. Es de interés el hecho de que varios de los diseños recientes de incineradoras de residuos hospitalarios funcionan por medio de un proceso de 2 etapas: un reactor de pirólisis seguido de una cámara de postcombustión.

Ejemplos son las incineradoras de Compact Power (2002) y de Statewide Medical Services (2002).

El calor requerido para la pirólisis es creado por combustibles clásicos (gas natural, petróleo, etcétera.), o por medio de la utilización de electricidad para producir ondas de altas temperaturas. En los sistemas de plasma la fuente primordial de calor es una llama de plasma que puede alcanzar temperaturas entre los 3.000 °C y 20.000 °C. Los plasmas se crean comúnmente por medio de un arco o descarga eléctrica de enorme energía y, por consiguiente, necesitan considerables porciones del recurso energético para funcionar.

Aunque los sistemas pirolíticos difieren en ciertos puntos de la incineración común, son suficientemente semejantes a las incineradoras como para ser legalmente clasificados como tales por la Alianza Europea. El régimen federal de los EE.UU. además define los sistemas que utilizan plasma, consistentes en un arco o descarga eléctrica de alta magnitud seguida de una postcombustión, como incineración (40 CFR 260.10).

Se conoce que normalmente los procesos de pirólisis no incineran y que por ende no producen subproductos peligrosos como las dioxinas o los furanos. No obstante, no han proporcionado información descriptiva o concreta que lo demuestre en sistemas a escala real en donde se lleven procesos en reactores de residuos peligrosos o de otro tipo como los plásticos. Por cierto, los datos limitados de sistemas a escala real han demostrado que en ellos están presentes dioxinas, furanos y otros productos de combustión inconclusa.

Una revisión vigente de los sistemas de la pirólisis elaborado por el conjunto de averiguación del Reino Unido (CADDET, 1998) muestra datos importantes sobre los residuos de los procesos de pirólisis:

Los procesos de gasificación y pirólisis pueden llegar a generar residuos sólidos o líquidos en gran parte de sus etapas, muchas opiniones indican que estos residuos pueden reutilizarse y que no son mayormente peligrosos, No Obstante, algunos casos y estudios que no cuentan con demostración suficiente, dicen que pueden llegar a ser peligrosos por medio de las emisiones generadas al aire y al suelo si no se les da un adecuado manejo.

CADDET (1998) además prestaba una particular atención a los residuos líquidos:

Los residuos líquidos de las plantas de combustión masiva son provenientes de las purgas realizadas al horno y a los sistemas de filtros húmedos que se usan para limpiar el gas generado, estas fuentes aunque suelen ser propias dentro de los sistemas de pirólisis y de gasificación que usan ciclos de vapor o depuradores, estas técnicas cuentan con la posibilidad

de generar residuos líquidos que se dan en consecuencia de la reducción o degradación del material orgánico, Estos residuos pueden llegar a ser altamente tóxicos, y deben ser manejados como tales por lo cual se necesita de un procedimiento posterior para eliminar dicha toxicidad cuidadosamente. (CADDET, 1998).

Por consiguiente, los sistemas de pirólisis, aunque se clasifiquen en la mayoría de los casos como alternativas limpias no incineradoras, pueden llegar a producir dioxinas, furanos y otros contaminantes dependiendo la materia que procesen y la operación del sistema de ausencia del proceso de oxidación.

5.7. Generación de combustibles

La técnica denominada pirólisis es empleada para dar disposición final al plástico, de manera que no va a tener problema con la disposición final, lo cual reducirá los problemas relacionados con el plástico. Según el ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico en España habla de las siguientes características:

- Compuestos gaseosos los cuales pueden contener CO.CO₂.CH₄.H₂ y compuestos volátiles que provienen del cracking de las moleculares de la materia orgánica, igualmente con los residuos ya existentes. Este gas es similar al gas generado en síntesis en la gasificación, pero hay mayor presencia de alquitranes, ceras entre otros, esto es debido a que la pirólisis opera a temperaturas las cuales son más bajas que las de la gasificación.
- Residuo líquido el cual se encuentra compuesto en su mayoría por hidrocarburos de largas cadenas como los alquitranes, fenoles, aceites y ceras que se forman al condensarse a temperatura ambiente.
- Residuos Sólidos que se encuentran compuestos por materiales no combustibles, los cuales no han sido transformados o que pueden proceder de una condensación de moléculas con un contenido alto de carbón, metales pesados u otros compuestos de residuos inertes.
- Los residuos mixto de gas y liquido pueden ser aprovechados por medio de la combustión esto por medio de un ciclo de vapor que se usa para la producción de energía eléctrica, el material solidos puede usarse como combustible en procesos industriales como por ejemplo en las plantas cementeras. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021)

7. Antecedentes

Dentro de los estudios realizados anteriormente en cuanto al uso de la pirólisis para el aprovechamiento de plásticos se encuentran diferentes adelantos y estudios de investigación, como es el caso de Ciencia Latina Revista Multidisciplinar en su artículo “*pirólisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación*” donde se analizaron las condiciones que deberían existir en la pirólisis usando el tipo de plástico polietileno de baja densidad (LDPE), estos ensayos se hicieron por medio de la adición de 100 gr de plástico a una reactor tipo Bach con sistema para la recolección de condensados, se realizaron cinco pruebas para evaluar el rendimiento de la temperatura, dentro de estos ensayos se encontró que la pirólisis en lo que respecta a plásticos LDPE genera una sustancia con gran contenido de hidrocarburos alifáticos (93.52%) a temperaturas cercanas a los 400°C con un tiempo de producción de 6 minutos; a temperaturas más altas se generan problemas con gases o ceras pesadas. (Palmay, P., Medina, C., & Vargas, K. 2021).

Por otro lado, dentro de una tesis doctoral del año 1996 de la universidad alicante en su facultad de ciencias la cual tiene como título “Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados” se puede encontrar que: el proceso conocido como pirólisis primaria se puede dar en una temperatura menos que en una de un equipo continuo y es menor la temperatura entre mayor sea el caudal de alimentación del plástico o neumáticos según sea el caso (Conesa, J. A. 1996), con esto se demuestra que el proceso de pirólisis puede ser llevado a cabo sin necesidad de alcanzar temperaturas tan altas como las cercanas a los 500°C. también dentro de esta misma investigación se concluyó que puede ser degradado el 100% de los materiales plásticos puestos en los reactores bajo ciertas características de operación.

El libro “Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)” del autor Ignacio Aracil Sáez provee información importante acerca de los procesos contaminantes que pueden surgir dentro del proceso de pirólisis y así mismo varias indicaciones técnicas que se deberían tener en cuenta dentro de este proceso especial de transformación de materiales, en el libro se estudiaron los compuestos generados durante el proceso de descomposición térmica de la pirólisis donde se identificaron más de 200 productos de reacción los cuales se agruparon en compuestos volátiles, gases y compuestos semivolátiles, los cuales se clasificaron según su comportamiento en relación con el oxígeno

a cierta temperatura dada y a su comportamiento dentro del proceso de la pirólisis, (Aracil, I. 2008).

En España, usando el proceso de la pirólisis se comprobó que en cuanto la temperatura es mayor la formación de compuestos es más estable térmicamente (Aracil, 2008), Igualmente en Colombia, la pirólisis de residuos sólidos municipales se utiliza para generar productos con alto poder calorífico (Gamarr, 2006), En Ecuador, los experimentos realizados por Crespo y Proaño en 2009, usando polietileno de alta densidad, se logró obtener Diesel, gasolina y kerosene en fracciones líquidas. (Mancheno, 2016)

Así mismo actualmente se encuentran diferentes trabajos de investigación acerca del uso de la pirólisis con el fin de dar la valorización a los residuos Solís Herrera, J. I., Miranda Morales, B. C., Davis Barquero, A., & Jiménez Rivera, G. (2020)., y su viabilidad económica del proceso. Orozco Hernández, S. (2018)., generación de combustibles líquidos y biocombustibles Rejas, I., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, I., & Copa, M. (2015)., entre otros temas relevantes, con lo anterior podemos concluir que los procesos de investigación actualmente si están avanzados frente al tema de la pirólisis y que es un proceso el cual consigue llegar a ser viable bajo algunas condiciones dadas y según parámetros de operación pueden conseguir a ser útiles para diferentes aspectos de la vida cotidiana mitigando en gran parte los impactos ambientales causados por los residuos plásticos a nivel global.

8. Diseño de prototipo para el proceso de pirólisis

Para este prototipo se utilizó el método de pirólisis mixto de entre la pirólisis rápida y auto térmica esto en parte al ser alimentado por gas producido dentro de la propia combustión para la generación de calor en el sistema.

El prototipo es diseñado con objetivos específicos:

- i) Ser un prototipo compacto, lo cual favorece para estar en espacios reducidos.
- ii) Fácil transporte, el prototipo tiene la capacidad de ser movable y muy liviano para ser transportado sin ningún inconveniente.
- iii) Fácil entendimiento, cualquier persona sin tener conocimiento alguno es capaz de entender el proceso que se lleva a cabo en él.
- iv) Fácil ensamble, El prototipo se destaca por ser muy sencillo y de factible de realizar.
- v) Materiales reciclados o de fácil adquisición.

Al inicio de la construcción del prototipo se emplea un diseño sencillo y básico, empleando así una olla exprés como reactor, conectada con mangueras de uso doméstico, las cuales presentaban serios problemas a la hora de mantener hermético el prototipo y al entrar en contacto con zonas de alto calor estas empezaban a derretirse causando interferencia en el proceso de la pirólisis, junto con contenedores plásticos, estos eran el diseño inicial del prototipo.



Figura 5 Prototipo inicial realizo; Fuente: Autores 2022

Todas estas conexiones de la olla exprés a las mangueras y de las mangueras a los contenedores presentaban fugas de gas, este prototipo inicial no garantizaba el proceso de la pirólisis ya que permitía fugaz del gas generado del plástico además que permitía el ingreso de oxígeno al reactor lo cual inhibe el proceso en su totalidad.



Figura 6 Presencia de fugaz en el prototipo inicial; Fuente: Autores 2022

Debido a estos problemas se llevó un rediseño del prototipo usando nuevos materiales, esto siguiendo la metodología propuesta, de aquí se construyó el segundo prototipo en el cual según la primera experiencia realizada se diseñó nuevamente con el fin de que se corrigieran las fallas, así mismo se realizó una construcción eficiente junto con los programas AutoCAD y sketchup.

Posteriormente se inició con las pruebas las cuales fueron arrojando la necesidad de realizar pequeños cambios del prototipo los cuales fueron de orden de piezas y correcciones de fugas y hermeticidad dentro del reactor, lo cual se logró corregir con soldaduras y materiales metálicos que soportaran el calor hasta, estas correcciones se realizaron hasta llegar al prototipo final, con este último se recolectaron los datos anexados en el documento. Cabe aclarar que dentro de estas correcciones no se realizaron rediseños del prototipo como en el caso del primer prototipo.

El prototipo definido fue diseñado y construido según los siguientes parámetros:

8.1 Materiales y métodos

- Como primer componente se requiere un componente capaz de resistir altas temperaturas y presiones, para esto se empleó una caneca de hierro capaz de resistir estas condiciones.



Figura 7 Caneca de hierro utilizada como reactor; Fuente: Autores 2022

- Tubos galvanizados capaces de transportar el gas liberado para las siguientes operaciones que va a tener el gas.



Figura 8 Tubos galvanizados; Fuente: Autores 2022

- Contenedor de hierro, capaz de almacenar liquido caliente así mismo cumple la función de ser conductor de gases, adecuado de manera artesanal (soldadura) para evacuar el combustible producido y orientar los gases generados.



Figura 9 Contenedor de hierro; Fuente: Autores 2022

- Tubos de fierros adecuados para funcionar como condensador en el proceso que lleva el prototipo.

Para iniciar con la construcción se necesitó evaluar las condiciones a las cuales estaría sometido el prototipo, partiendo de la creación de un plano realizado en AutoCAD como se puede ver en la figura 10, la representación del plano da los lineamientos de como comenzar la construcción del prototipo y el dimensionamiento del mismo.

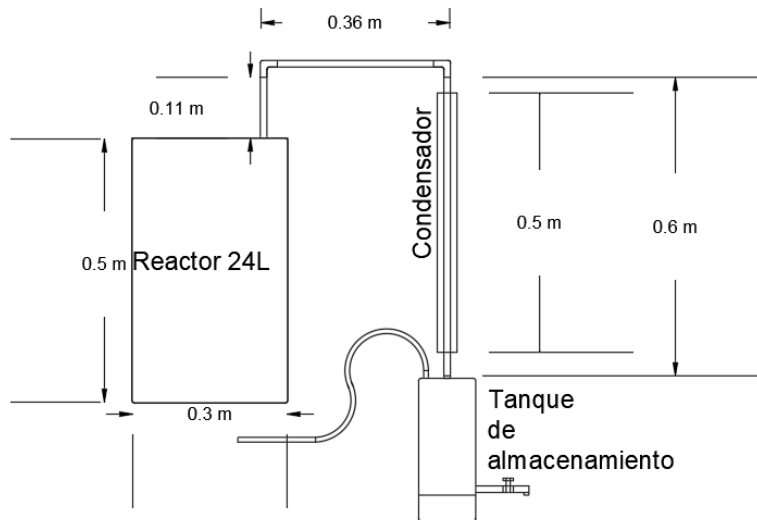


Figura 10 Plano del prototipo; Fuente: Autores 2022.

En la figura 11 se puede observar el modelado del prototipo en el cual se busca su formación compacta, para que pueda ser dispuesto en diferentes zonas de una vivienda rural, donde se puede observar su facilidad en la instalación y ubicación del mismo, esto teniendo en cuenta que debe estar en un lugar preferiblemente abierto o ventilado por la combustión, situación similar a las condiciones en las cuales se pueda ubicar una cocina de gran o mediano calibre para zonas rurales.

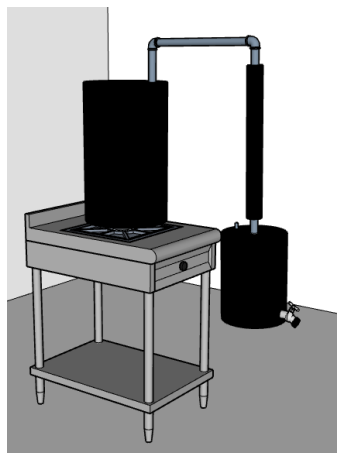


Figura 11 Modelado del prototipo; Fuente: Autores 2022

8.2 Evaluación del diseño

Lo planteado durante el diseño deja ver que el sistema si puede realizarse de manera

compacta, adicionalmente su construcción puede realizarse con materiales los cuales no son complejos de conseguir, ni transportar para las zonas en donde está planteado, de igual manera el prototipo si permite su movilidad para la ubicación en diferentes puntos de una vivienda al estar fabricado con materiales ligeros.

El diseño logra que el prototipo sea sencillo y junto con los planos y modelaciones del mismo se evidencia su facilidad a la hora del funcionamiento y así mismo el entendimiento del proceso, lo cual también conlleva a que su ensamble sea sencillo y adecuado, en términos de que el ensamble sea sencillo se refiere a que sus componentes son móviles lo que produce que puedan ser transportados sin mayor esfuerzo, la mayoría de piezas son ensambladas gracias a la rosca que tienen los mismos elementos. Por último, al contemplar materiales asequibles hace que este prototipo cumpla con los objetivos planteados de diseño definidos dentro de la ejecución de este proyecto.

En cuanto al funcionamiento y teniendo en cuenta la literatura consultada el prototipo teóricamente debe estar apto para soportar las temperaturas adecuadas dentro del proceso de pirólisis y así mismo para el cargue y hermeticidad de los procesos que se requieren dentro del sistema, esto se logra debido a los materiales que se consideraron para su diseño por lo tanto el prototipo cuenta teóricamente con lo necesario para ser funcional.

8.3 Calculo de eficiencia de medición y producción

El estudio de los diferentes tipos de reactores usados en la pirólisis para la degradación de residuos, principalmente plásticos permite establecer parámetros de diseño que cumpla con los requerimientos técnicos para el uso del prototipo en zonas rurales, buscando presentar una alternativa de bajo costo, teniendo un valor aproximado de cien mil pesos colombianos, fácil de usar y que cumpla fundamentalmente con la degradación óptima posible de residuos y su aprovechamiento en combustible.

Teniendo en cuenta que la principal función del reactor de pirólisis térmica es la descomposición química de residuos plásticos como Polipropileno, Poliestireno y Polietileno.

Dentro del proceso se requiere de temperaturas altas con la combustión como fuente de calor

y un sistema sin oxígeno dentro del reactor; en donde los principales productos generados son: el aceite, el gas y el carbón; se debe monitorear los parámetros que intervienen en el proceso para obtener la mayor eficiencia posible, es indispensable la elaboración de los diagramas funcionales, los mismos que serán desarrollados y detallado por niveles las subfunciones del proceso (Figuroa, Chela, S. W. 2021).

En la figura 12 se describe la función global que realizará el prototipo de reactor de pirólisis térmica, en un diagrama de flujo que se detalla a continuación:

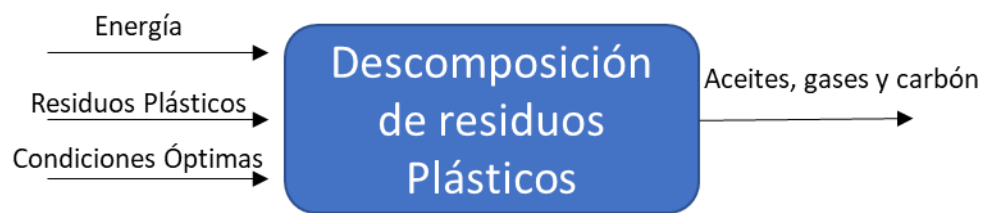


Figura 12 Análisis Modular del sistema. Fuente: Autores 2022

Los módulos establecidos en el para el prototipo de reactor de pirólisis térmica, se mencionan a continuación:

Modulo 1: Calentamiento y sistema de aislamiento térmico del reactor.

Modulo 2: Transporte de gases producidos por la degradación de plásticos y reutilización.

Modulo 3: Condensador y salida de gases no condensables.

Modulo 4: Salida de combustible líquido.

Para calentar el reactor a una temperatura elevada, se necesita una fuente de calor. A su vez, se requiere de un sistema de aislamiento para el cual se utilizará la caneca metálica como reactor es necesario tener precaución y mantener distancia entre el reactor para evitar posibles quemaduras a quien lo opere. Como propuesta se tiene en cuenta que el sistema pueda ser usado tanto con gas natural en dado caso de que se cuente con red del servicio en el lugar o con gas licuado del petróleo o GLP al tener en cuenta que en muchas de las zonas rurales no se cuenta con un sistema de red de gas natural por tal motivo las alternativas de solución a la fuente de calor se presentan a continuación:

Tabla 2 Características de los gases combustibles como fuente de calor

GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP)	GAS NATURAL
Compuesto de una mezcla de butano y propano	Compuesto esencialmente de metano
Es más pesado que el aire	Es más liviano que el aire
Se transporta por medio de recipientes a presión.	Se transporta por medio de tuberías hacia los puntos de recepción.
Es más ecológico y no contiene azufre.	No emite residuos contaminantes como plomo o zufre.
Tiene un poder calorífico de 26.2 Kwh/ Nm ³ que es mayor que el del gas natural.	Tiene un poder calorífico de 10.83 Kwh/Nm ³ .

Fuente: Autores 2020.

Se contempla el gas propano como la mejor opción en cuanto al uso del prototipo puesto que, aunque pueda estar diseñado para funcionar con cualquiera de los dos gases, el gas licuado del petróleo es más susceptible a usar en zonas rurales debido a su transporte y almacenamiento así mismo este gas tiene un mayor poder calorífico lo cual representa una mejor eficiencia del sistema si se usa este tipo de combustible.

9. Resultados

En el interior del reactor se producen las distintas reacciones mencionadas en el documento, donde se empieza el proceso de descomposición molecular de la materia prima en este caso el plástico, las variables que se tienen en cuenta son: la presión, tipo de residuo plástico, temperatura y el tiempo en el cual se va a someter el proceso, los cuales se van variando a medida que se van realizando las pruebas correspondientes del prototipo.

La presión del prototipo se establece como 0 psi, siendo un dato constante, dado que al aumentar la presión en el reactor indica que algo no está funcionando correctamente, considerando que es una caneca de hierro, pero su tapa es menos densa lo cual es propensa a cualquier cambio de presión y que su estructura cambie, causando grandes riesgos para el operario y resultados negativos para la calificación del prototipo. La presión es regulada a través de una válvula de alivio ubicada en el reactor de manera que la evacuación de gases sea directa y de forma controlada a un recipiente a temperatura baja para evitar cualquier riesgo de quema o inhalación de gases directos.

Una vez los plásticos sean transformados por el reactor de fase sólida a fase gaseosa y/o líquida, recorrerá la tubería hasta llegar a un condensador para minimizar la temperatura y condensar el gas, evitando así la generación de componentes como los furanos y bencenos, dado que según (Envir. Sci. Technol, 1995) sin O₂, el carbono presente en la superficie de la ceniza no actúa como fuente de PCDD/Fs. En este mismo recorrido pasará por un serpentín de cobre lo cual su función principal es condensar la fase gaseosa en fase líquida la cual es depositada en un tanque de hierro donde se almacenarán los gases condensables mientras que los no condensables serán dirigidos a su quema inmediata. La utilización de los gases no condensables tiene varias oportunidades, una de ellas es volver autosustentable el reactor siendo así que la quema del gas sea aprovechada para la alimentación energética del prototipo.

9.1 Métodos de ensayos en el prototipo.

Para la realización de las pruebas se empleó como variable de residuos plásticos dos tipos: polietileno tereftalato (PET), y polietileno de baja densidad (LDPE). A un tiempo promedio de entre 0.5 y 1 hora, temperatura mayor de 300 °C, y presión de 0 psi y en constante

observación teniendo precaución de que esta se eleve por posibles riesgos físico-químicos que puede causar.

9.2 Obtención de combustible.

Las fracciones arrojadas a través de la primera prueba fue realizada con el PET, se procede a realizar una caracterización física, la cual tiene como orientación designar el color, olor, viscosidad y la cantidad de contenido que genera cada residuo, en el caso del PET la generación de la fase líquida es mínima.

Se procede la prueba con 1 kg de PET como se evidencia en la figura 13, compuesto de botellas de todo tipo, junto a sus respectivos anuncios de bebida, cabe mencionar que la preparación para empezar el proceso es solo de cortar la cabeza de las botellas, esto para que ingresen mayor cantidad al reactor.



Figura 13 Residuo PET Fuente: Autores 2022

El residuo plástico PET presenta una mayor producción de fase sólida conocida como carbón, pasando de tener 1000 gr de residuo a 100 gr aproximadamente como se ve en la figura 14, esto representa a una reducción del 90% y transformación a combustible sólido con capacidad energética baja.



Figura 14 Carbón resultado de PET Fuente: Autores 2022

Los resultados obtenidos en cuanto al gas generado por el PET, fueron satisfactorios dado que en este caso la llama es constante y de buen volumen, siendo quemada aproximadamente por una hora completa y siendo totalmente autosustentable el prototipo dado que el poder calórico era alto como se puede observar en la figura 13



Figura 15 Llama proveniente del PET Fuente: Autores 2022

La generación de la fracción es mínima, sin embargo, hay gran producción de combustibles en fase líquida como sólida.

El segundo residuo en ser evaluado es el LDPE o polietileno de baja densidad, utilizando bolsas, vasos plásticos, algunos tubos, vinipel, film alveolar, cubiertos, y botellas poco densas.

Como primer resultado a la hora de emitir la fase gaseosa esta tiene poca llama y poco poder calorífico, apagándose en varias ocasiones lo cual sugiere que la generación de gas es mínima cómo se puede ver en la figura 16.



Figura 16 Generación de gas de LDPE. Fuente: Autores 2022

La obtención del carbón a través del residuo LDPE, es mucho más delgado con un poder calorífico alto de pequeño espesor como se evidencia en las figuras 15 y 16



Figura 17 Tamaño del carbón Fuente: Autores 2022



Figura 18 Carbón a base de LDPE Fuente: Autores 2022

Para 1 kg de residuos LDPE la disminución del mismo es aproximadamente del 95% del residuo



Figura 19 Cantidad de carbón como resultado. Fuente: Autores 2022

9.3 Recolección de datos.

Tabla 3 Ensayos de tiempo para la eficiencia del prototipo (LDPE) Fuente: Autores 2022

Practicass	Tiempo (min)	Fase Liquida (g)	Carbón (g)	% rendimiento
Practica 1	20	130	60	13
Practica 2	30	91,3	100	9,13
Practica 3	40	199,2	50	19,92
Practica 4	50	256,6	40	25,66
Practica 5	60	106,6	70	10,66

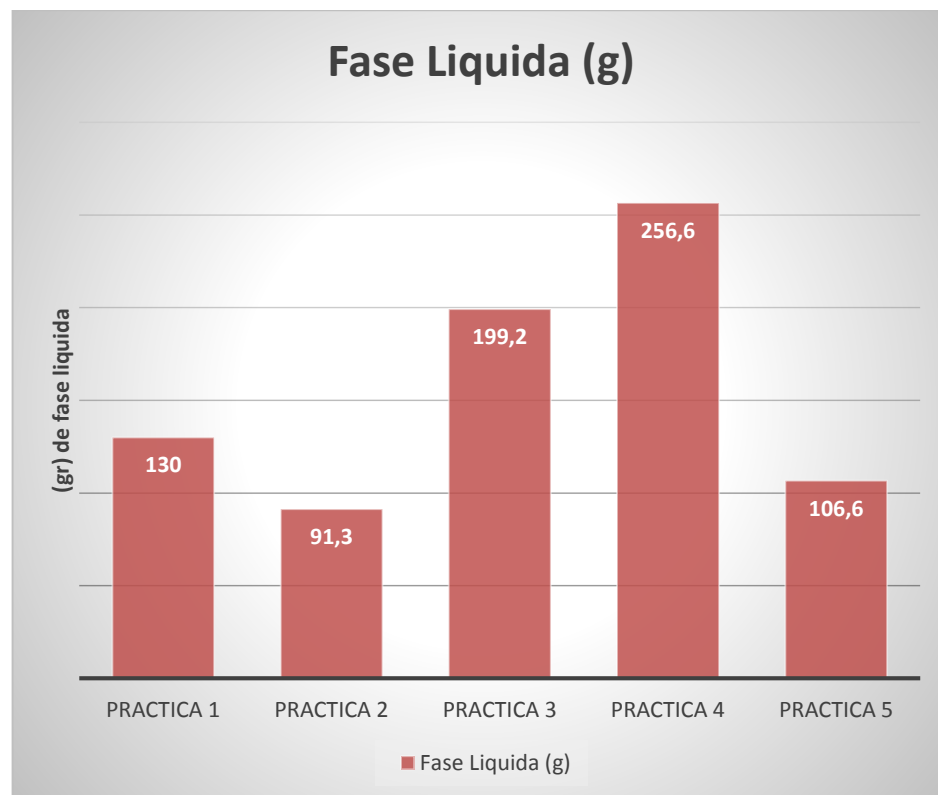


Figura 20 Generación de combustible líquido según la practica (LDPE) Fuente: Autores 2022

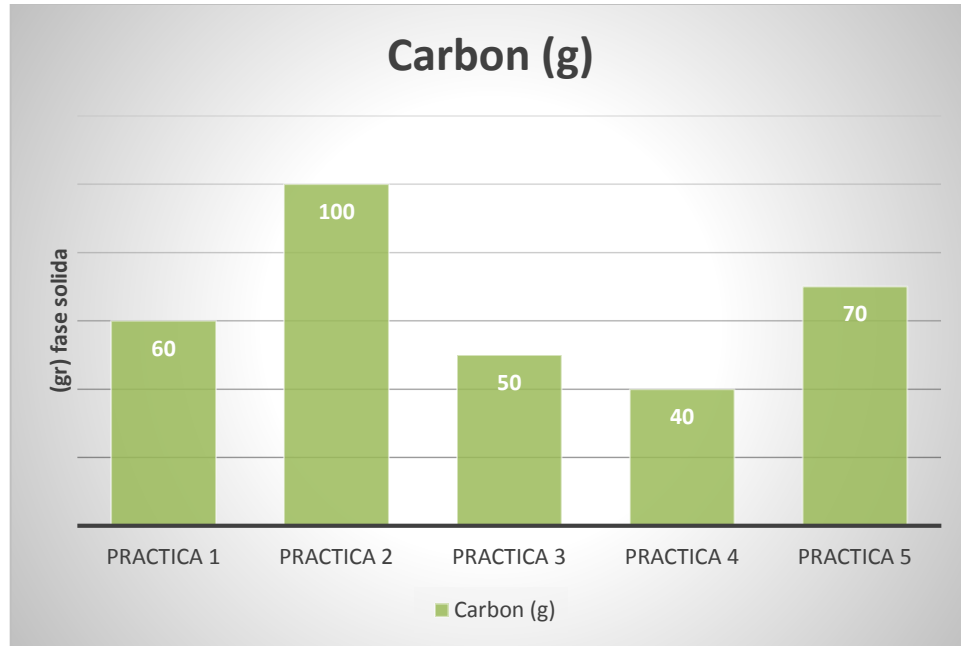


Figura 21 Generación de combustible de carbón (LDPE) Fuente: Autores 2022



Figura 22 Fase liquida de la práctica de LDPE Fuentes: Autores 2022

La producción de la fase liquida representa 200 gr de combustible líquido gracias al proceso realizado de la pirólisis en los cincuenta min como se evidencia en la tabla 3, con una eficiencia del prototipo del 25% en generación de la fase liquida a través del residuo de los LDPE, la báscula empleada está en unidades de kg al realizar la conversión de $1\text{kg} = 1000\text{gr}$, da como resultado los 200gr previstos

Tabla 4 Generación de combustible a base de PET Fuente: Autores 2022

Practicar	Tiempo (min)	Fase Liquida (gr)	Carbón (gr)	% rendimiento
Practica 1	20	65	172	6,5
Practica 2	30	52	128	5,2
Practica 3	40	72	192	7,2
Practica 4	50	100	200	10
Practica 5	60	46	148	4,6

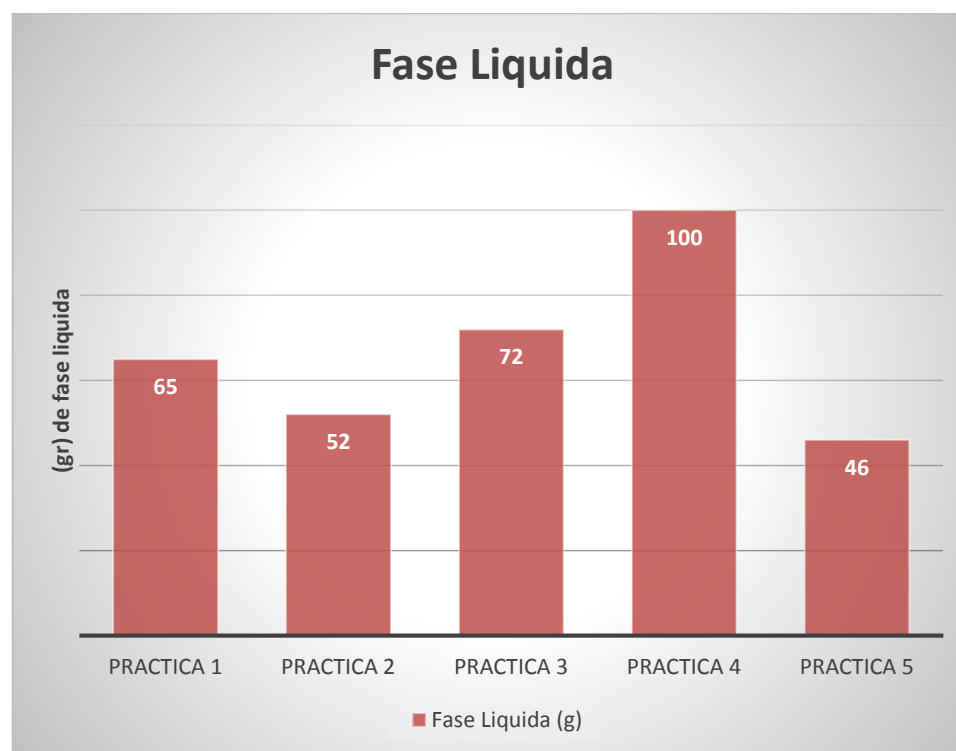


Figura 23 Generación de fase liquida a base de PET Fuente: Autores 2022

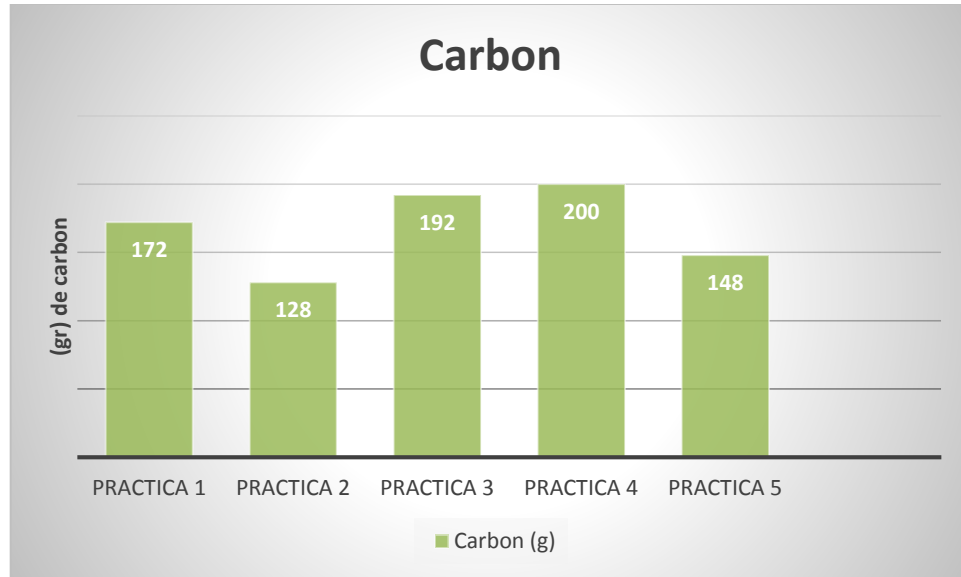


Figura 24 Generación de fase solida a base de PET Fuente: Autores 2022



Figura 25 Fase liquida obtenida del PET Fuente: Autores 2022

La generación de la fase liquida del PET, tiene un rendimiento del 10% siendo inferior al del LDPE, siendo 150 gr menor, sin embargo, es una buena reducción y aprovechamiento del residuo plástico para una duración de cincuenta min teniendo en cuenta la generación de carbón y la emisión de gas no condensable aprovechado es mucho mayor al del LDPE.



Figura 26 Comparativa entre las dos fases liquidas Fuente: Autores 2022

En la figura 24 se evidencia la diferencia en color de las dos practicas al lado izquierdo (LDPE), y el color más oscuro hace referencia al de (PET), el cambio de color y generación de la fase liquida está determinada según su composición química y la cantidad de enlaces que tenga el residuo plástico.



Figura 27 Prueba con tapas plásticas Fuente: Autores 2022

Una tercera prueba se realizó con 1000 gr de tapas de botella lo cual corresponde a polipropileno, en este caso la prueba duro aproximadamente una hora y media a una temperatura cercana a los 300°C, en esta práctica hubo poca generación de fases tanto liquida, sólida y gaseosa, al momento de abrir el reactor se evidencia la poca reacción que ocurrió en el proceso, esto determina que a mayor densidad del residuo plástico menor reacción tiene según los parámetros planteados desde el inicio de las practicas.

9.4 Costos de Elaboración.

Con la finalidad de tener un prototipo de bajo costo se pensó en la utilización de materiales reciclables según lo mencionado en el capítulo 8. Debido a esto se obtuvieron materiales de procesos residuales como canecas de la industria para disposición final como chatarra.

Dentro de los costos de accesorios se obtiene un valor total de \$ 95.500 COP.



Figura 28 Facturas accesorios usados Fuente: Autores 2022

En cuanto a los servicios de soldadura y gas propano para la combustión se obtiene un costo promedio de 100.000 \$COP adicionales.

Siendo de esta manera un prototipo el cual tuvo un costo promedio de \$ 200.000 COP, este valor tiende a ser relativo ya que depende en gran parte de que en algunos casos ya contábamos con algunos de los materiales para la realización del mismo y por otro lado algunos fueron reciclados por lo tanto para determinar el costo real de reproducción del prototipo se tendrían que tener en cuenta algunos datos como mano de obra y materiales adicionales.

10. Análisis de resultados

Teniendo en cuenta los rendimientos del prototipo se puede deducir que es un sistema dentro del actual la eficiencia de remoción de volumen del material es óptima para el tratamiento de residuos plásticos de las zonas rurales del país, donde la proporción de residuos como los probados en el prototipo son grandes debido a que los insumos utilizados en las actividades productivas de estas áreas incluyen principalmente envolturas plásticas, al analizar los principales tipos de plásticos como el PET (polietileno tereftalato), PHLD (polietileno de baja densidad) y PP (polipropileno) se puede obtener que el prototipo funciona para los plásticos que se encuentran principalmente en el comercio actual.

Uno de los principales beneficios del prototipo dejando de lado los recursos obtenidos es la capacidad de disminuir en un gran porcentaje de aproximadamente 90 a 95 % los residuos lo cual es beneficio para el tratamiento de los mismo de igual manera al tener en cuenta que además de reducir su volumen también se generan productos útiles como combustibles.

En cuanto a la cantidad de combustibles líquidos obtenidos dentro del proceso se tiene que de un kg de material a pirolizar de plásticos se obtiene un aproximado de 40 a 50 gr de combustible líquido, lo cual es un cantidad útil al tener en cuenta que es solo un g de tal manera que si se tratase de 10 kg de material se obtendría aproximadamente 500 gr y evaluando densidades y además del combustible, aproximadamente 20 Kg de material se podría llegar a obtener hasta un litro de combustible sólido, claro está que este dato puede variar dependiendo de las variables principales analizadas, con el tiempo de reacción y el material a tratar.

En referencia al combustible gaseoso se obtuvo que tiene una gran capacidad de combustión lo cual es bastante útil para ser usado con dos propósitos; el primero es que este gas sea autoalimentado al sistema para generar calor y que se pueda dar el proceso de la pirólisis ahorrando en gran parte del combustible principal para el funcionamiento del prototipo y en segunda instancia en dado caso de querer utilizarlo en otros aspectos se puede usar como fuente de energía. Aunque si se evidencio la presencia y generación de gas combustible dentro del proceso, no fue posible realizar una cuantificación con el prototipo actual, debido a que no se cuentan con los implementos necesarios para dicho proceso y obtener resultados exactos.

Otro de los productos obtenidos es el carbón el cual tiene características similares al carbón conocido como carbón coque, este combustible al no poder alimentar directamente el equipo de forma eficiente como es el caso del combustible gaseoso, se puede utilizar en actividades básicas en las zonas rurales se tiende a usar mucho al carbón como combustible para la calefacción de cultivos donde podría llegar a ser de gran utilidad, de igual manera al tener en cuenta que este es el residuo sólidos que da el punto de disminución de volumen del residuo que se habló anteriormente y que es uno de los beneficios de la pirólisis que indica que aun cuando el residuo fue disminuido en gran cantidad aún puede seguir siendo subutilizado para otros procesos convirtiendo un residuo en diferentes combustibles como se evidencio dentro de las pruebas realizadas dentro del prototipo propuesto.

También es de importancia anotar que la operación del sistema se puede realizar de una manera segura y los espacios ocupados por el prototipo no requieren de grandes áreas para su funcionamiento, llevando esta operación de un modo sencillo útil y eficiente. Al tener en cuenta también que los materiales para la construcción del mismo son asequibles y de bajo valor.

Los resultados arrojaron datos esperados, se obtuvo generación de combustible y adicionalmente disminución de los residuos con alto porcentaje de capacidad para usar estos en subprocesos. Incluso se obtuvieron eficiencias altas para las esperadas al ser un prototipo para el uso del método de pirólisis en zonas rurales del país.

No fue posible realizar las mediciones de contaminantes dentro del proceso, aunque en ciertas pruebas se detectaron olores extraños no es posible determinar las diferentes emisiones que se lleguen a dar con el prototipo.

En cuanto al costo del prototipo no es posible determinarlo completamente debido a que se contaba anteriormente con algunos materiales y otros fueron adquiridos en ferreterías o materiales de chatarra lo cual vuelve demasiado susceptible el valor para replicación del mismo por lo tanto no se contemplara un valor total y se tomara como valor promedio de construcción un rango de \$ 180.000 COP a \$ 220.000 COP, que sigue siendo un costo bajo para un dispositivo que pueda solventar algunas necesidades de la población en zonas rurales del país.

11. Conclusiones.

Se diseñó un prototipo gracias a diferentes programas como lo son AutoCAD y Sketchup, que permiten el dimensionamiento del mismo, logrando obtener así un proceso del mecanismo de manera sencilla.

Se construyó un prototipo compacto y accesible, con materiales de fácil acceso y totalmente funcional para el proceso de la pirólisis.

Se logra cuantificar la cantidad de combustible que produce el proceso de la pirólisis, gracias al prototipo construido.

Este tipo de tecnologías es una excelente opción para dar disposición final a un residuo, el cual es muy utilizado tanto en la industria como uso doméstico, gracias a las pruebas realizadas se determinó el funcionamiento del prototipo de la pirólisis orientada a las zonas rurales o de difícil acceso.

Se determina que la temperatura apropiada para el proceso de la pirólisis es mayor a 400 °C, dado que a temperaturas menores el proceso no se completa arrojando resultados no óptimos.

Los tiempos en el proceso son muy importantes, gracias a los ensayos realizados se logró determinar que para 1 kg de plástico es necesario contar con tiempos de entre 30 min a 1 hora para obtener el máximo porcentaje de combustibles.

El prototipo es adecuado para el uso en zonas rurales del país, esto al tener en cuenta que puede ser de fácil operación y construcción con materiales asequibles y económicos, y aunque puede llegar a tener riesgos en la operación debido a las temperaturas generadas y el uso de fuego, estos pueden llegar a ser mitigados y usar el equipo como los existentes al día de hoy como por ejemplo las estufas.

El prototipo demostró ser funcional al generar compuestos combustibles dentro del proceso de disposición de residuos plásticos, dichos compuestos también demostraron su poder de combustión lo cual permite que tengan un aprovechamiento energético dentro de los diferentes procesos domésticos rurales.

Para analizar los productos arrojados por el prototipo debemos observar si es factible la utilización del prototipo, por lo cual los combustibles arrojados llegan a ser utilizados en diferentes aspectos dando un aporte para que los mismos campesinos de zonas rurales se beneficien de la tecnología.

Se da una disposición final al plástico de manera que se reduce el residuo y se está ingresando a un nuevo sistema capaz de generar energía, esto da un paso positivo para el aprovechamiento de estos componentes que actualmente han sido desechados de manera indiscriminada.

12. Recomendaciones.

Para obtener mayor información de la calidad de los combustibles se recomienda usar equipos específicos, para el análisis de las fracciones de los tres combustibles mencionados a lo largo del documento.

Sugerimos realizar diferentes estudios a fondo para encontrar alternativas de aprovechamiento de los combustibles, en las diferentes fases.

Incitamos a las investigaciones de trabajos, sobre esta línea de investigación, variando los parámetros utilizados, como lo son las presiones, temperaturas, residuos, materiales de construcción del prototipo.

Invitamos a tener precaución con cualquier tipo de riesgo en la creación, en el proceso del prototipo para la obtención de los combustibles tales como: la presión manejada, las temperaturas empleadas en el proceso como también los gases liberados por el mismo.

Se sugiere el mejoramiento del prototipo en cuanto a diseño y eficiencias con el fin de llegar a obtener un equipo que sea de bastante utilidad y con eficiencias de tratamiento altas, que según lo demostrado con el prototipo actual se puede alcanzar grandes niveles de aprovechamiento en cuanto a la mejora de diseños y estandarización del equipo.

Se recomienda realizar mediciones de contaminantes que puedan llegar a ser generados durante el proceso de pirólisis a escala doméstica y así como evaluar las desventajas actuales del prototipo con el fin de hacer la mejora del mismo.

Se recomienda examinar más a fondo los costos de fabricación y replicación de un prototipo de estas características con el fin de evaluar posteriormente su viabilidad la cual hasta el momento ha dado resultados alentadores en cuanto a un bajo costo.

13. Referencias.

- Miranda, D. (2022b, mayo 13). National Geographic - 20 datos sobre el problema del plástico en el mundo. www.nationalgeographic.com.es. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282
- Gil, A. S. (2019, diciembre). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. <http://www.scielo.org.co/>. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200306
- Aracil, I.. julio de 2008. Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Tesis Doctoral. Alicante: Universidad de Alicante.
- Medina Gaspar, S. A. (2021). Evaluación de la pirólisis en atmósfera CO₂ para la obtención de combustible líquido por medio de CD's residuales.
- Castells, X. E., & García, E. V. (2012). La pirólisis: Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos.
- Arandes, J. M., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. Revista Iberoamericana de polímeros, 5(1), 28-45.
- Mancheno, M., et. al. 2016. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 23(1): 53–59. ISSN impreso: 1390-3799. ISSN electrónico: 1390-8596
- Palmay, P., Medina, C., & Vargas, K. (2021). Pirólisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(3), 2463-2476. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.464
- Conesa, J. A. (1996). Estudio de la Pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados.

- Aracil, I. (2008). Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Universidad de Alicante.
- Solís Herrera, J. I., Miranda Morales, B. C., Davis Barquero, A., & Jiménez Rivera, G. (2020). Valorización de residuos de parafinas provenientes de la pirólisis de plásticos por craqueo catalítico. *Ciencia en Desarrollo*, 11(1), 81-99.
- REJAS, L., CARREÓN, B., ORTIZ, M., LLANES, L., & COPA, M. (2015). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(11), 635-642.
- Castells, X. E., & García, E. V. (2012). *La pirólisis: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Aracil, I. (2008). Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Universidad de Alicante.
- Miranda, D. (2022b, mayo 13). National Geographic - 20 datos sobre el problema del plástico en el mundo. www.nationalgeographic.com.es.
https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282
- Gil, A. S. (2019, diciembre). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. <http://www.scielo.org.co/>.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200306
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.
- Briceño V., Gabriela. (2018). Pirólisis. Recuperado el 29 agosto, 2022, de Euston96: <https://www.euston96.com/pirólisis/>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.
- Gutiérrez, H. (2020, 25 febrero). El 76% de la población del campo no tiene donde dejar la basura. RCN Radio. Recuperado 12 de septiembre de 2022, de

[https://www.rcnradio.com/recomendado-del-editor/el-76-de-la-poblacion-del-campo-no-tiene-donde-dejar-](https://www.rcnradio.com/recomendado-del-editor/el-76-de-la-poblacion-del-campo-no-tiene-donde-dejar-labasura#:~:text=En%20el%20campo%20colombiano%2C%20el,sin%20la%20posibilidad%20de%20deshacerse)

[labasura#:~:text=En%20el%20campo%20colombiano%2C%20el,sin%20la%20posibilidad%20de%20deshacerse](https://www.rcnradio.com/recomendado-del-editor/el-76-de-la-poblacion-del-campo-no-tiene-donde-dejar-labasura#:~:text=En%20el%20campo%20colombiano%2C%20el,sin%20la%20posibilidad%20de%20deshacerse)

- Ceupe, B. de. (2019, 3 octubre). ¿Qué es la pirólisis? Ceupe. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirólisis.html?dt=1663002142270>
- Pimienta Correa, G. (2020). Montaje de una planta de pirólisis para el aprovechamiento de llantas usadas en minería en el departamento del Cesar. Universidad Externado de Colombia.
- BESTON® GROUP CO., LTD. (2022, 11 julio). Planta de Pirólisis. <https://www.bestongrupo.es/planta-de-pirólisis/>
- Beltrán, M. (2011). Tema 2. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. Tecnología de los Polímeros.
- Aracil, I. julio de 2008. Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Tesis Doctoral. Alicante: Universidad de Alicante.
- Mancheno, M., et. al. 2016. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 23(1): 53–59. ISSN impreso: 1390-3799. ISSN electrónico: 1390-8596.
- Ocampo, S. M. G. (2019). Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño-Colombia. Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño, 5(1), 64-75.
- Figueroa Moreno, J. D., & Chela Hinojosa, S. W. (2021). Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, Y PS.
- De Novo synthesis mechanism of polychlorinated dibenzofurans from polycyclic aromatic hydrocarbons and the characteristic isomers of polychlorinated naphthalenes. Environ. Sci. Technol, 33, 1038, 1993.
- - FAO, 1994. Integrated energy systems in China – The cold Northeastern region

experience. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 1994. <http://www.fao.org/docrep/T444470E/t4470e00.htm>

- Advanced Thermal Conversion Technologies for Energy from Solid Waste, IEA CADDET Centre for Renewable Energy, Oxfordshire, Reino Unido. Agosto 1998. Un informe conjunto del Programa de bioenergía de la IEA y del Programa de energías renovables de CADDET. <http://www.caddetre.org>
- Statewide Medical Services, Indianapolis, EE UU. <http://www.med-dispose.com/pyrolysis.html>, 14 de enero de 2002
- Compact Power, Avonmouth, Bristol, Reino Unido. <http://www.compactpower.co.uk>, 14 de enero de 2002