



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE PIRÓLISIS DE RESIDUOS
PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO EN UN REACTOR BATCH**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Trabajo Investigativo

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR:

LENIN ANDRÉS MINAYA ROMERO

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE PIRÓLISIS DE RESIDUOS
PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO EN UN REACTOR BATCH**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Investigativo

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: LENIN ANDRÉS MINAYA ROMERO

DIRECTOR: ING. PAUL GUSTAVO PALMAY PAREDES

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, **Lenin Andrés Minaya Romero**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Lenin Andrés Minaya Romero, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

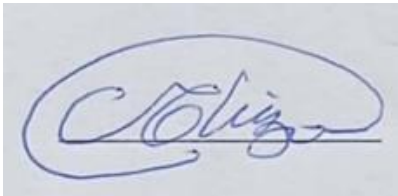
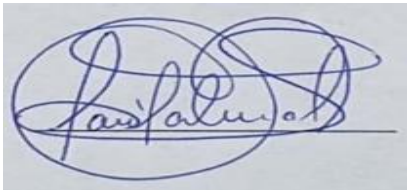
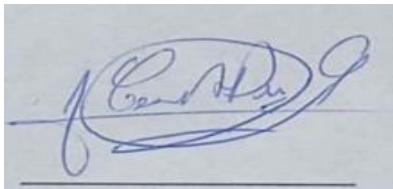
Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24/10/2023

Lenin Andrés Minaya Romero
172411276-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación , **ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO EN UN REACTOR BATCH CON CALENTAMIENTO**, realizado por el señor: **LENIN ANDRÉS MINAYA ROMERO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Raul Chuiza Rojas, Mgs. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-10-24
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-10-24
Ing. César Arturo Puente Guijarro, PhD ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-10-24

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo investigativo a Mí, la persona que parcial o totalmente intervino en la decisión de elegir y terminar esta carrera, la persona que sacrificó noches de sueño, fiestas, viajes y experiencias en general con tal de seguir en la carrera, quien trabajó duro para pagar sus gastos, ropa, vivienda y comida, quien estuvo diciéndote tú puedes cuando nadie más lo dijo, quien a pesar de tener todo en contra la mayoría del tiempo llegó hasta aquí a redactar este trabajo, quien tras sufrir crisis existenciales y problemas mentales aún quiere conseguir ese título universitario, a mí que cuando me dijeron déjalo mis personas cercanas solo secó sus lágrimas y volvió al ruedo; quiero dedicar esta tesis y la culminación de una etapa en la vida que escogí vivir a mí, nadie más me ayudó económica o moralmente, fui yo, redactando ensayos, resolviendo problemas y leyendo docenas de libros quien logró conseguir esto; a mí que a pesar de no estar bien mientras escribo estas palabras quiero terminar mi trabajo y ver que me espera más delante de esta muralla que por poco me rehuso a terminar de escalar, quiero dedicarme este trabajo y una vida mejor a mí, ya que no le debo nada a mi familia, amigos o exparejas, solo es provechoso para mí, quiero decirme que sí puedo, así como llegué hasta acá puedo llegar mucho más lejos, tal vez me desvié un poco o le quité prioridad a mis asuntos, pero nunca más, más que dedicarme este trabajo me quiero dedicar a mí de ahora en adelante.

Lenin

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que ayudaron y formaron parte mi vida en estos años de preparación profesional y las eventualidades que me volvieron quien soy ahora.

Lenin.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 Justificación	3

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Referencias teóricas	5
2.1.1 <i>Polímero</i>	5
2.1.1.1 <i>Tipos de polímeros</i>	5
2.1.2 <i>Pirólisis</i>	7
2.1.3 <i>Análisis Termoquímico</i>	7
2.1.4 <i>Métodos de gestión de residuos Plásticos</i>	7
2.1.5 <i>Entalpía</i>	8
2.1.6 <i>Entropía</i>	9
2.1.7 <i>Exergía</i>	9

2.1.8	<i>Balance de Energía y Exergía</i>	9
2.1.9	<i>Reactor</i>	12
2.1.10	<i>Rendimiento</i>	13

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	14
3.1	Enfoque de investigación	14
3.2	Nivel de Investigación	14
3.3	Diseño de Investigación	14
3.3.1.	<i>Según la manipulación de la variable independiente</i>	14
3.3.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	15
3.4	Tipo de estudio	15
3.5	Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra	15
3.5.1	<i>Unidad de análisis</i>	15
3.5.2	<i>Población de estudio</i>	15
3.5.3	<i>Tamaño de Muestra</i>	15
3.5.4	<i>Selección de Muestra</i>	15
3.6	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	15
3.6.1	<i>Trituración</i>	16
3.6.2	<i>Degradación térmica</i>	16
3.6.3	<i>Análisis exergético</i>	16

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	18
4.1	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados	18
4.1.1	<i>Caracterización del PP</i>	18
4.1.2	<i>Análisis exergético</i>	19
4.1.2.1	<i>Cálculo de energía de entrada y salida</i>	19

4.1.2.2	<i>Cálculo del índice de recuperación de energía</i>	20
4.1.3	<i>Cálculo de ECR y NGR</i>	20
4.1.3.1	<i>Cálculo de la eficiencia energética</i>	21
4.1.3.2	<i>Cálculo de la eficiencia exergética</i>	21
4.1.3.3	<i>Cálculo del intervalo de confianza para la fracción líquida de la pirólisis de PP</i>	23
4.2	Discusión	26

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
5.1	Conclusiones	27
5.2	Recomendaciones	28

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tipos de plásticos.....	5
Tabla 2-2: Métodos de gestión de residuos Plásticos.	8
Tabla 3-1: Coeficientes de capacidad calorífica a presión constante	16
Tabla 3-2 : Valores de LHV para los compuestos que forman la fracción líquida	17
Tabla 4-1: Energías de entrada al proceso.....	20
Tabla 4-2: Energías de salida del proceso de pirólisis del PP	20
Tabla 4-3: Valores de Exergía en cada una de las fracciones.....	22
Tabla 4-4: Valores obtenidos de cálculos y valores de rendimiento de diferentes fuentes estudiadas.....	23

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Aumento de la producción de plásticos por año.....	4
Ilustración 2-1: Sistema usado en el proceso de pirólisis de residuos de PP	7
Ilustración 4-1: Muestra del PP usada en la pirólisis	19
Ilustración 4-2 Porcentajes de los compuesto fracción líquida	22

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A :REACTOR TIPO BATCH DE PIRÓLISIS CON CALENTAMIENTO

ANEXO B: FRACCIÓN SÓLIDA PIRÓLISIS PP

ANEXO C: FRACCIÓN LÍQUIDA PIRÓLISIS PP

ANEXO D: ESPECIFICACIONES DEL CONSUMO ENERGÉTICO (RESISTENCIAS
REACTOR)

ANEXO E: BOMBA DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN

ANEXO F: BOMBA DE SISTEMA DE VACÍO

RESUMEN

El análisis exergético de la pirólisis de residuos de plásticos de polipropileno (PP) en un reactor Batch se presenta de la necesidad de un método más fiable de calcular las eficiencias exergéticas entre consumo de energía usada en la producción del líquido pirólisisado y la cantidad de energía que puede ser utilizada de esta como combustible, por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación es realizar el balance de exergía de las corrientes de entrada y de salida, siendo éstas últimas las fracciones líquida, sólida y gaseosa de la pirólisis de PP; la metodología utilizada tiene un enfoque cuantitativo, el nivel del trabajo es explicativo ya que busca describir lo que sucede durante el proceso de pirólisis de los residuos y cuanta energía pueden aportar las fracciones obtenidas de dichos residuos, en el diseño de la investigación se optó por trabajar con condiciones de -0.5 MPa, 400 °C y una atmósfera de nitrógeno dentro del reactor, un sistema de enfriamiento con agua que circulaba a 10°C, además de los datos de la potencia nominal de los motores de los equipos involucrados en el proceso, datos que ayudarán en los cálculos, el diseño es transversal de tipo experimental, realizandose la experimentación con 1 Kg de residuos de PP de aproximadamente 2 cm de diámetro provenientes de recicladoras de la ciudad de Riobamba. Mediante esta metodología se logró determinar que la energía total de entrada es de 90.05 MJ, la de salida de 36.74 MJ, mientras que para el valor de rendimiento es de 27.41 % con respecto a las energías de entrada y salida, con se obtuvieron los intervalos de confianza para cada una de las fracciones. Con dichos datos obtenidos se concluye que es una posible fuente viable alterna de combustible en la lucha contra el plástico.

Palabras clave: <EXERGÍA>, <BALANCE DE ENERGÍA>, <RENDIMIENTO>, <ANÁLISIS>, <POLIPROPILENO>.

2215-DBRA-UPT-2023

ABSTRACT

The energetic analysis of the pyrolysis of polypropylene (PP) plastic waste in a batch presents the need for a more reliable method of calculating the energetic efficiencies between the energy consumption used in the production of the pyrolyzed liquid and the amount of energy that could use as fuel. Therefore, the present research aims to carry out the exergy balance of the inlet and outflow currents, the latter being the liquid, solid, and gaseous fractions of PP pyrolysis. The methodology used has a quantitative approach, and the level of the work is explanatory since it seeks to describe what happens during the pyrolysis process of the waste and how much energy the fractions obtained from such waste can contribute to the research design. It works with conditions of -0.5 MPa, 400 °C, and a nitrogen atmosphere inside the reactor. A cooling system with water that circulated at 10 C. In addition to the data on the nominal power of the motors of the equipment involved in the process, data will help in the calculations; the design is transversal of experimental type, experimenting with 1 kg of PP waste of approximately 2 cm in diameter from recyclers in Riobamba city. Through this methodology, it was possible to determine that the total input energy is 90.05 MJ, the output energy is 36.74 MJ, and the performance value is 27.41% concerning the input and output energies, with confidence intervals obtained for each fraction. With the data accepted, it concluded that it is a viable alternative fuel source in the fight against plastic.

Keywords: <EXERGY>, <ENERGY BALANCE>, <PERFORMANCE>, <ANALYSIS>, <POLYPROPYLENE>.



Lic. Edison Renato Ruiz López

CI. 0603957044

INTRODUCCIÓN

El principal problema en la época actual que afecta a toda forma de vida existente en el mundo es la masiva producción de plásticos que se genera a diario, con un consumo promedio de 24 kg por persona al año, dato que puede variar dependiendo del país o región en que se considere este aspecto, de modo que la zona urbana es la más contaminante por su mayor densidad poblacional, centros comerciales y tiendas de barrio que generan plásticos de un solo uso, sumándole a ello las características que poseen estos polímeros son utilizados en prácticamente todo lo que nos rodea en nuestro día a día; desde dispositivos móviles, cepillos de dientes, prendas de vestir, equipos médicos y un sinnúmero de artículos de uso cotidiano, todo lo antes mencionado combinado con la ineficiente gestión de residuos sólidos reutilizables y las pocas tecnologías relacionadas a estos, hacen que sea necesario buscar alternativas viables con respecto al destino post consumo de estos materiales los cuales al poseer un alto poder calorífico son incinerados juntos con otros residuos sólidos lo que genera gases nocivos para el medio ambiente, la incineración no es amigable con el planeta por lo antes dicho, existen diferentes tipos de reciclaje uno de ellos es el reciclaje químico, método que consiste en someter a dichos materiales a altas temperaturas en presencia o no de algún tipo de catalizador y en ausencia de oxígeno logrando romper las largas cadenas de carbono que forman a los polímeros, lo que generan combustibles aprovechables en fracciones de líquido, gas y ceras, similares a los actualmente comercializados derivados del petróleo por lo cual es un método actualmente investigado a profundidad por un gran número de profesionales especializados en el tema.(Por et al., 2010)

Lo anterior mencionado y considerando que una degradación térmica requiere de un aporte externo de energía surge la pregunta, ¿el proceso aplicado a los residuos sólidos es termodinámicamente factible respecto a costos?, en otras palabras ¿es económicamente viable producir combustibles a partir de desechos de plásticos?, por lo tanto este trabajo está enfocado en el análisis exergético del producto resultante de la pirólisis térmica del Polipropileno, se quiere lograr identificar con datos tomados de la realidad y con el uso de las dos primeras leyes de la termodinámica, cuantificar la magnitud de las fuentes de ineficiencia termodinámicas, con el fin de posteriormente solucionar o mejorar la eficiencia global del proceso, la metodología usada para dichos cálculos se desarrollan en el capítulo dos con el sustento de las fórmulas a usar más adelante, obteniéndose los datos necesarios para dicho análisis, mediante las pruebas realizadas en el laboratorio y tomando en cuenta los datos de consumo energético de las partes del proceso global de pirólisis, con lo cual se llegará a un intervalo de confianza respecto a los valores exergéticos y energéticos obtenidos del estudio.

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La producción de nuevos materiales creció con el desarrollo de la industria en el mundo, y la necesidad de usar envases y envoltorios más livianos; siendo en 1907 la invención de la Baquelita por Leo Baekeland (Geyer, Jambeck y Law 2017), cuando se dio el desarrollo e investigación de los plásticos; al ver las propiedades con las que contaba este nuevo material producido por el hombre, algunas de sus características como resistencia, peso ligero, bajo costo de producción y otras ventajas fueron razones suficientes para empezar a experimentar con diversas variaciones del plástico (Schmid 2008), sin embargo este polímero es un material que supera en volumen la masa que en realidad lo conforma, debido a este gran inconveniente y la falta de estrategias orientadas a la reutilización y/o reciclaje de estos residuos sólidos (RS), se presenta una problemática medio ambiental severa al ser contaminados ríos, mares y océanos; estos últimos cuentan incluso con islas de plástico flotantes resultado del choque de corrientes marinas que acumulan los RS y sin duda un grave peligro tanto para la vida en el océano como para la salud humana (Rojo y Montoto 2017).

Se presenta diferentes formas de reciclaje según el Acuerdo Ministerial 19 “Políticas para Gestión Integral de Plásticos en el Ecuador”, en donde define al plástico como “una gran variedad de sustancias, las cuales se distinguen entre sí por su estructura, propiedades y composición; también al reciclaje de plástico como “proceso por el cual los residuos plásticos provenientes de la post industria o el post consumo son separados en la fuente, recolectados selectivamente, acondicionados y/o transformados en nuevas materias y productos plásticos”. Y al reciclaje químico así: “el tratamiento de residuos plásticos mediante procesos bioquímicos o fisicoquímicos para convertirlos nuevamente en sustancias químicas básicas aprovechables o en combustibles. Los tipos de reciclaje químico son: Pirolisis, Hidrogenación, Gasificación y otros”. (Tapia, 2014)

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo General*

Realizar el balance de exergía de la pirólisis de polipropileno en un reactor tipo batch.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Determinar la composición de la parte líquida de la pirólisis del Polipropileno (PP) mediante bibliografía.
- Calcular el balance de energía y exergía del reactor tipo batch con calentamiento de la pirólisis de Polipropileno (PP)
- Establecer la eficiencia energética y exergética de la pirolisis de residuos de Polipropileno (PP)

1.3 Justificación

En los últimos 70 años de historia el ser humano ha incrementado su consumo de materiales poliméricos de forma alarmante, de modo que hoy en día es un problema de carácter serio y preocupante, tanto para la vida marítima como para la terrestre, por el gran impacto y la muy lenta degradación de estos, además de su baja densidad lo cual suma el problema adicional del gran volumen que dichos materiales ocupa en el espacio, lo cual genera problemas en su disposición final, causando que las técnicas de vertederos e incineración de residuos sea ineficiente y contraproducente, debido a la generación de NO_x, CO, CO₂, SO_x como es en el caso de la incineración.

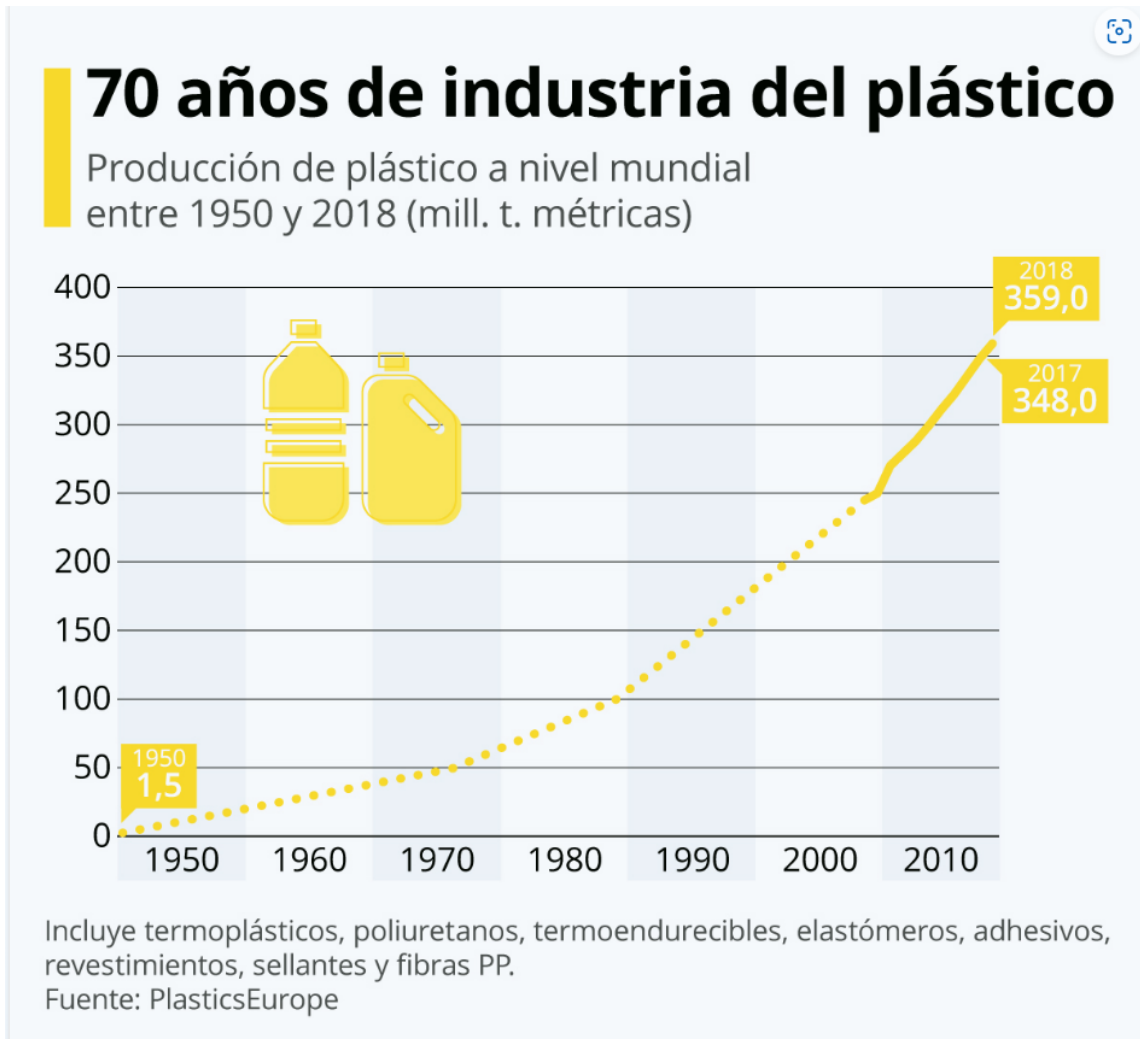


Ilustración 1-1: Aumento de la producción de plásticos por año

Fuente: Moreno, G., 2020

Lo antes mencionado ocasiona serios problemas en nuestro planeta dejando de lado a los rellenos sanitarios y a la incineración, actualmente existe una vía alterna para la deposición final de ciertos residuos sólidos conocida como reciclaje terciario que a diferencia del primario y secundario esta forma de reciclaje consiste en degradar de forma térmica o química las macromoléculas que conforman estos polímeros logrando obtener así fracciones líquidas, sólidas y gas, la problemática que se plantea y busca analizar en este trabajo es el consumo energético para la generación de la parte líquida de la pirólisis del polipropileno (PP), es decir si es energéticamente viable su producción con la aplicación de un análisis exergético a la fracción del combustible líquido, la poca investigación respecto al tema nos plantea la necesidad de realizar dicho análisis.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO


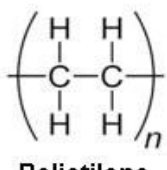
2.1 Referencias teóricas

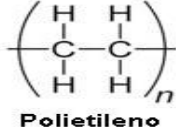
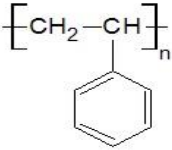
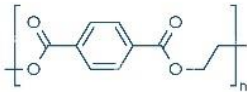
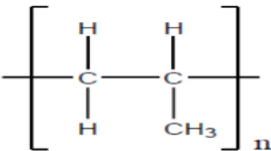
2.1.1 Polímero.

Los polímeros son moléculas de gran tamaño formadas por unidades repetidas conocidas con el nombre de monómeros las cuales están entre 500 y 20000 repeticiones, estos compuestos también son materiales orgánicos con propiedades livianas, higiénicas y duraderas que se pueden moldear en varios objetos finales.(Díaz, 2020)

2.1.1.1 Tipos de polímeros

Tabla 2-1: Tipos de plásticos

Tipos de polímero	Fórmula química	Descripción
Cloruro de polivinilo (PVC).	 <p>Cloruro de Vinilo (Monómero)</p>	El PVC es un producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo, es el polímero más versátil, puede ser producido por cuatro procesos diferentes: suspensión, emulsión, masa y solución tiene un color blanco tiene muy buena resistencia a la electricidad y al fuego.
Polietileno de baja densidad	 <p>Polietileno</p>	Es un polímero comercialmente usado en bolsas de basura obtenido por la polimerización del etileno, este polímero tiene una cadena muy ramificada razón por la cual posee una baja densidad.

<p>Polietileno de alta densidad(PE).</p>	 <p style="text-align: center;">Polietileno</p>	<p>Es un polímero que se obtiene por adición, formado por repetitivas unidades de etileno, dicho proceso utiliza catalizadores, este proceso ocurre a bajas temperaturas</p>
<p>Poliestireno (PS).</p>		<p>Mediante radicales libres y la utilización de peróxidos es como se obtiene el poliestireno (PS), existen tres tipos de PS comercial, de alto impacto, poliestireno cristal y poliestireno expandible o anime, con diferentes usos que van desde la producción de vasos y recipientes desechables y embalaje.</p>
<p>Tereftalato de polietileno (PET o PETE)</p>	 <p style="text-align: center;">PET</p>	<p>Es uno de los polímeros más utilizados globalmente debido a su amplio uso para envases de refresco, agua y demás bebidas actualmente comerciables, además de tener otros usos textiles.</p>
<p>Polipropileno (PP)</p>	 <p style="text-align: center;">Polipropileno</p>	<p>Este tipo de polímero se lo puede obtener mediante la polimerización del polietileno el cual es un subproducto de la industria de refinación del petróleo, con el uso de un catalizador y mediante el control de la temperatura y presión el PP puede ser de tipo homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto, usado para llenado de fluidos a alta temperatura, muebles de jardín, mesas, asientos, fibras y otros. (López-Carrasquero 2004)</p>

Realizado por: Minaya, L., 2023

2.1.2 Pirólisis.

Es un proceso térmico con temperaturas que van alrededor de los 300 a 900 °C dependiendo del tipo de pirólisis que se quiera realizar, el objetivo de este proceso es romper mediante temperatura las macromoléculas o polímeros en compuestos de cadena más corta con fracciones de combustible líquida, gaseosa y ceniza.(Palmay et al., 2022)



Ilustración 2-1: Sistema usado en el proceso de pirólisis de residuos de PP

Fuente: Palmay et al., 2022

2.1.3 Análisis Termoquímico.

Este tipo de análisis está orientado a estudiar los cambios de las características físicas o mecánicas de una sustancia, los cuales se relacionan con una determinada temperatura la cuál será constante en función del tiempo, está encaminado en no solo supervisar y controlar, también se enfoca en detallar los cambios en la propiedad.(Díaz, 2020)

2.1.4 Métodos de gestión de residuos Plásticos.

Los residuos de plásticos se pueden clasificar en industriales y de origen doméstico los cuales van desde espuma de embalaje, envases de comida y bebida, platos y vasos desechables, aislamiento térmico, entre otros usos que se les da, en la industria por otro lado se usa en construcción y

demolición como tuberías y productos de PVC, en la industria automotriz también tienen aplicación este tipo de materiales.(Figueroa, 2020)

Tabla 2-2: Métodos de gestión de residuos Plásticos.

Reciclaje primario.	Reciclaje secundario o mecánico.	Reciclaje terciario o químico.
Este tipo de reciclaje consiste en separar los diferentes tipos de RS post-industriales con el fin de obtener muestras sin ningún otro tipo de contaminante a fin de generar productos de buena calidad y de forma rentable.(Maldonado 2012)	Este tipo de reciclaje transforma los RS del plástico en otros artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original. Generalmente este tipo de reciclaje se le da a los RS post consumo, que vienen mezclados y contaminados, de la misma forma que en el reciclaje primario los termoplásticos son la materia prima. Este proceso requiere clasificar, moler, lavar y convertir en materia prima usando procesos como la extrusión, inyección, compresión y otros.(Maldonado 2012)	El reciclaje terciario o químico es una transformación química en la estructura carbonada del polímero, que lo convierte nuevamente en hidrocarburo, se usan como materias primas, para producir nuevamente plásticos o en la industria petroquímica, los métodos pueden ser químicos o térmicos.(Maldonado 2012)

Fuente: Figueroa, J, 2020

Realizado por: Minaya, L., 2023

2.1.5 *Entalpía.*

La entalpía puede ser definida como la cantidad de calor que un sistema termodinámico en estudio libera o absorbe del entorno que lo rodea estando a una presión constante, cuya unidad de medida es el joule (J) y se representa con la letra H.(Vera, 2007)

$$H = E + PV$$

Donde:

- H es entalpía
- E es la energía del sistema termodinámico
- P es la presión del sistema termodinámico
- V es el volumen

2.1.6 Entropía.

Es una magnitud física que se encarga de medir la cantidad de energía que no se encuentra disponible en un sistema, la relación entre entalpía y entropía se da en que cuando menor entalpía se tenga, el sistema tiende al equilibrio; mientras que aumenta la entropía al mismo tiempo. (Álvarez Carlos 2013)

2.1.7 Exergía.

La exergía es un potencial termodinámico, es una medida general de trabajo, una “diferencia” o un contraste, es la parte de la energía que es posible convertir en trabajo. (Álvarez, 2013)

2.1.8 Balance de Energía y Exergía

El balance de energía del proceso de pirólisis en el reactor tipo batch con calentamiento se puede escribir como:

$$E_{in} = E_{out} + E_{loss} \quad (1)$$

Donde

E_{in} =energía total de entrada

E_{out} = energía de salida

E_{loss} =Representa la pérdida el calor perdido en el proceso de pirólisis

Las corrientes de entrada y salida se pueden dividir como:

$$E_{in} = Q_{pw} + Q_s \quad (2)$$

$$E_{out} = Q_{liquid\ oil} + Q_{gas} + Q_{char} \quad (3)$$

Donde

Q_{pw} = contenido energético de los residuos de plástico

Q_s = energía eléctrica requerida para que el reactor tipo batch con calentamiento funcione y se den las condiciones óptimas para la pirólisis

$Q_{liquid\ oil}$; Q_{gas} ; Q_{char} = Los subíndices, es decir: liquid oil (aceite líquido), char (carbón y ceras) y gas (gas), significa que la energía de salida estaba en estos tres productos

Para calcular el valor energético de la pirólisis de residuos plásticos, todos los contenidos energéticos se muestran en las ecuaciones (4) y (5), que se basan en los mayores valores de calentamiento.

$$Q_{pw} = HHV_{pw} \quad (4)$$

$$Q_i = X_i * HHV_i \quad (5)$$

Donde

Q_{pw} = contenido energético de los residuos de plástico

HHV_{pw} = Es el mayor valor de calentamiento de los residuos plásticos

Q_i = Es el contenido energético de aceite líquido.

X_i = Es rendimiento másico de los productos de pirólisis por kg de residuos plásticos.

El potencial de recuperación de energía se calcula por la energía potencial máxima recuperado de productos de pirólisis

$$Q_{recovery} = Q_{liquid\ oil} + Q_{gas} + Q_{char} \quad (6)$$

Por lo tanto, el índice de recuperación de energía (ERR) se calcula como:

$$ERR = \frac{Q_{recovery}}{Q_{pw}} * 100 \quad (7)$$

En este trabajo los productos de carbón tienen un porcentaje de 87% como lo describe (Zhang et al. 2020) en el análisis cromatográfico realizado en su estudio, también nos menciona que la eficiencia de combustión del carbón y el gas en una caldera es de 0.6 dato con el que se realizarán los cálculos del porcentaje de consumo de energía ECR (por sus siglas en inglés) y la recuperación neta de energía NGR (por sus siglas en inglés) mediante:

$$ECR = \frac{Q_h + Q_{char} * 0.6}{Q_{gas} * 0.6} * 100 \quad (8)$$

$$NGR = 100\% - ECR \quad (9)$$

La eficiencia energética total (η) del proceso de pirólisis fue definida por:

$$\eta = \frac{Q_{recovery}}{Q_{pw} + Q_s} * 100\% \quad (10)$$

La exergía es calculada usando las ecuaciones con base en conocimientos de la termodinámica, la cual nos dice básicamente que no todo el calor se transforma en trabajo, sino que siempre tendremos pérdidas debido al entorno en el cual se encuentra dicho sistema en estudio. La exergía total se expresa por la suma de diferentes tipos de exergía y se escribe como:

$$e_x = e_x^{ph} + e_x^{ch} + e_x^{ki} + e_x^{po} \quad (11)$$

donde

e_x^{ph} = es la exergía física (MJ kg⁻¹),

e_x^{ch} = es la exergía química (MJ kg⁻¹),

e_x^{ki} = es la exergía cinética (MJ kg⁻¹), y

e_x^{po} = es la exergía potencial (MJ kg⁻¹).

La ec. (11) se puede aproximar por:

$$e_x = e_x^{ph} + e_x^{ch} \quad (12)$$

Para el cálculo de la exergía física de la fracción gaseosa se aplica la siguiente ecuación

$$e_{x,gas}^{ph} = \sum n_i [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (13)$$

$$h - h_0 = \int_{T_0}^T c_p dT \quad (14)$$

$$s - s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{P}{P_0} \quad (15)$$

Donde:

n_i es el rendimiento molar del componente

h y s son las entalpía específica y entropía específica respectivamente

C_p Capacidad calorífica a presión constante es calculada mediante la siguiente correlación

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (16)$$

Donde:

A – E son los coeficientes de C_p a presión constante expuestas en el trabajo investigativo de (Zhang et al. 2020)

La ecuación que se empleó para obtener la magnitud de la exergía química de la fracción gaseosa es:

$$e_{x,gas}^{ch} = \sum y_i e_{ch,i}^0 + T_0 R \sum y_i \ln y_i \quad (17)$$

Donde:

y_i = fracción molar del componente de gas i

$e_{ch,i}^0$ energía química estándar

La evaluación de la exergía química del aceite líquido y los desechos plásticos se tomaron respecto a los valores caloríficos más bajos:

$$e_{pw} = \beta_o LHV_{pw} \quad (18)$$

$$e_{liquid\ oil} = \beta_i LHV_{liquid\ oil} \quad (19)$$

Donde

$LHV_{liquid\ oil}$ = es el poder calorífico inferior del aceite líquido.

β_o y β_i = son los factores de correlación de residuos plásticos y aceite líquido basados en el análisis final. estos son estimados por:

$$\beta_o = \frac{1.044 + 0.0160 \frac{H}{C} - 0.3493 \frac{O}{C} (1 + 0.0531 \frac{H}{C}) + 0.0493 \frac{N}{C}}{1 - 0.4124 \frac{O}{C}} \quad (20)$$

$$\beta_i = 1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} \quad (21)$$

Donde:

H, C, O, N = son la porción másica de hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno en una base seca. Además, la exergía química del carbón se estima mediante un modelo compuesto de grafito (Guanchun, 1984; citado en Tang et al., 2016).

La eficiencia exergética de los residuos plásticos de pirólisis se define por:

$$\Psi = \frac{e_{liquid\ oil} + e_{gas} + e_{char}}{e_{pw} + e_s} * 100\% \quad (22)$$

Donde

Ψ = es la eficiencia exergética total,

e_{pw} y e_s es el calor requerido para pirolizar los residuos plásticos y la energía necesaria para que el reactor con calentamiento llegue a las condiciones de reacción, respectivamente. (Zhang et al., 2020)

2.1.9 Reactor

Un reactor es un recipiente o tanque en cuyo interior ocurren reacciones químicas bajo determinadas condiciones de operación, cumplen con un diseño que les permite mejorar la

conversión y selectividad, con el menor coste posible y regido a diseños con base en conocimientos de diferentes áreas involucradas, como termodinámica, cinética química, conceptos de balance de energía y materia.(Lopez y Borzacconi, 2009)

2.1.10 Rendimiento

Es la relación entre el trabajo útil que una máquina realiza en un determinado tiempo y el trabajo que se le aporta a dicha máquina.(Álvarez et al., 2022)

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de investigación

Este trabajo es cuantitativo, ya a que vamos a obtener información numérica del balance de energía y exergía del proceso de pirólisis del PP, con la manipulación de algunas variables tomando como independiente a la temperatura en el rendimiento final respecto a la fracción líquida.

3.2 Nivel de Investigación

El trabajo es explicativo, de modo que busca explicar el consumo de energía para la obtención del combustible y la exergía del combustible en cuestión.

3.3 Diseño de Investigación

El trabajo de tipo experimental realizada en este trabajo consta de algunas variables las cuales están colocadas bajo determinadas condiciones como la presión a -0.5 MP, un sistema de refrigeración que trabaja a 10 °C y la temperatura en el proceso de pirólisis es 400°C ya que (Palmay et al. 2022) nos menciona que es la temperatura óptima para obtener un mayor rendimiento masa/masa y que a temperaturas relativamente superiores el valor de rendimiento en la fracción líquida no varía significativamente, además de una atmósfera libre de oxígeno, el valor en de consumo de energía eléctrica que las resistencias encontradas en el reactor necesitan para alcanzar la temperatura de reacción, la cantidad de energía eléctrica usada para enfriar el agua, que fluye por el sistema de refrigeración condensando la parte líquida en forma de vapor que se desprende de los residuos plásticos, con esos datos podremos calcular el consumo de energía para la obtención de los productos y la exergía de la fracción líquida con la aplicación de las ecuaciones propuestas en el capítulo anterior.

3.3.1 *Según la manipulación de la variable independiente*

La variable independiente usada en este proceso es la temperatura la cual influye directamente en el rendimiento del producto pirolizado.

3.3.2 *Según las intervenciones en el trabajo de campo*

El trabajo es transversal, por el tipo de recopilación de datos se dan en un periodo de tiempo determinado, analizando los cambios en el rendimiento debido a la manipulación de la variable

3.4 *Tipo de estudio*

El trabajo se realizó por medio de la investigación de campo, ya que los datos fueron tomados en lugar del proceso de pirólisis del polipropileno (PP) proceso que se realizó en el reactor tipo bath con calentamiento, equipo que forma parte del inventario del laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH sede Riobamba.

3.5 *Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra*

3.5.1 *Unidad de análisis*

Para el trabajo de investigación fue una muestra de 100 % de residuos del PP triturados,

3.5.2 *Población de estudio*

Para este punto se usaron residuos triturados de polipropileno de algunas recicladoras de la ciudad de Riobamba.

3.5.3 *Tamaño de Muestra*

La muestra usada en la experimentación fue de 1000 g de residuos de polipropileno triturados con un tamaño de partícula de 2 cm aproximadamente

3.5.4 *Selección de Muestra*

La muestra utilizada se compró de las recicladoras ubicadas en la ciudad de Riobamba, la cual se encontraba ya triturada, colocando dentro del reactor la cantidad pesada de 1 kg

3.6 *Métodos, técnicas e instrumentos de investigación*

3.6.1 Trituración

La trituración es una operación unitaria que nos permite reducir el tamaño de partícula de una sustancia o elemento acelerando así la velocidad de reacción debido a la superficie específica entre mayor área posea, más rápido se dará la reacción química en este caso la degradación térmica.

3.6.2 Degradación térmica

El reactor usado para la pirólisis es un reactor tipo batch con calentamiento por resistencias eléctricas, que adicionalmente cuenta con otras partes que complementan el proceso al momento de obtener la fracción líquida producto de la degradación térmica que genera un ruptura en las largas cadenas macromoleculares, debido a esto se dan compuestos gaseosos, líquidos y sólidos o también llamados ceras de los cuales analizaremos todo mediante las ecuaciones propuestas anteriormente

3.6.3 Análisis exergético

El análisis exergético es una técnica que combina las leyes de la termodinámica para así obtener resultados lo más cercanos a la realidad tomando en cuenta por supuesto las condiciones del entorno en el cual el sistema se encuentra, la presión, la temperatura del sistema y el entorno y los aportes adicionales por consumo de energía eléctrica, nos permitirán conocer si la generación de este combustible a partir de RS de PP es una alternativa rentable o no, los datos usados para dichos análisis se exponen a continuación.

Para el cálculo de la exergía de la fracción gaseosa se usó los datos de (Zhang et al., 2020) en donde nos menciona los compuestos de los cuales está conformada la mezcla de gases que se va a analizar, usando los componentes que más resaltan en su investigación en cuanto al porcentaje de contenido

Tabla 3-1: Coeficientes de capacidad calorífica a presión constante

GAS	A	B(*10 ⁻²)	C (*10 ⁻⁵)	D(*10 ⁻⁹)	E(*10 ⁻¹¹)
H2	29,11	-0,1916	0,4003	-0,8704	
CH4	19,89	5,024	1,269	-11,01	
CO	28,126	0,1675	0,5372	-2,222	
CO2	22,26	5,981	-3,501	7,469	
C2H4	3,95	15,64	-8,344	17,67	
C2H6	6,9	17,27	-6,406	7,285	

C3H6	3,15	23,83	-12,18	24,62	
C3H8	-4,04	30,48	-15,72	31,74	
1-C4H10	3,96	37,15	-18,34	35	
TR-2-C4H8	40,312	13,472	16,877	-211,4	6,3263
1-C4H8	24,915	20,648	5,9828	-141,7	4,7053
Iso-C4H8	32,918	18,546	7,7876	146,4	4,6867
Cis-C4H8	29,137	14,008	19,109	237,2	7,0962

Fuente: Zhang et al., 2020

Realizado por: Minaya, L., 2023

Para el cálculo de la exergía de la fracción líquida se usó los datos de (Areprasert et al., 2017) en donde nos menciona el valor de LHV del PP y para los valores de LHV de los componentes de la fracción líquida se usó los datos recopilados por (Gregorio , 2012), usando los componentes que más resaltan en su investigación en cuanto al porcentaje de contenido.

Tabla 3-2 :Valores de LHV para los compuestos que forman la fracción líquida

COMPUESTO	LHV MJ	Fraccion Liq	%
GASOLINA C4-C12	45,2	C6-C12	24,57
KEROSENE C10-C17	46,5	C12-C20	41,14
DIESEL C12-C23	42,6	C20-C28	22,88

Fuente: Gregorio, F., 2012

Realizado por: Minaya, L., 2023

CAPÍTULO IV

4 MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento, análisis e interpretación de resultados

Al considerar los inconvenientes del destino final de los residuos de plásticos y las problemáticas en cuanto a la clasificación de estos cuando nos referimos al reciclaje secundario, hacen que el reciclaje químico tenga su atractivo y sea una alternativa potencialmente viable en la lucha contra el plástico y el consumo de combustibles no renovables, en este trabajo nos enfocaremos en analizar dicha viabilidad con el uso de las ecuaciones planteadas en capítulos anteriores y la aplicación de un análisis exergético al proceso de pirólisis de PP, el cual cuenta con varias partes que funcionan con energía eléctrica por ello se debe tener en cuenta el consumo de dichas partes con ello se busca confirmar o descartar dicho potencial en cuanto a su consumo energético en la obtención de líquido pirolítico, de manera que se podrá saber si implica un menor o mayor aporte energético en comparación con la exergía del combustible producto de la pirólisis de estos RS de PP argumentar que la aplicación de un reciclaje terciario a dichos residuos es sustentable o si genera mayor consumo durante su obtención.

4.1.1 *Caracterización del PP*

Para caracterizar el PP se realizó lo mencionado en el capítulo anterior, usándose así una muestra triturada compuesta en su totalidad por PP con una masa de 1Kg por lote, la ilustración 4 nos permite conocer el estado de la muestra que ingresa en el reactor tipo batch de 5 L de capacidad con calentamiento, dicho calentamiento se da mediante resistencias eléctricas que trabajan a un voltaje de 220 V, el cual también consta de un sistema de refrigeración y uno de agitación, además de una bomba de vacío que permite regular la presión a la cual se realiza el proceso.



Ilustración 4-1:Muestra del PP usada en la pirólisis

Realizado por: Minaya, L., 2023

4.1.2 Análisis exergético

El análisis exergético se realizó con ayuda de la aplicación de distintas fórmulas las cuales nos permitieron obtener valores bastantes cercanos a la realidad como en el caso del contenido energético del aceite pirolizado de PP, el porcentaje de masa obtenido del proceso fue de 62% en la primera prueba, 64 % en la segunda y 66% en la tercera repetición con un promedio de 64% en el rendimiento con respecto a la fracción líquida pesando los restos de carbón del fondo se puede realizar un balance de masas y así encontrar la fracción gaseosa faltante, partiendo de ello los resultados de los cálculos energéticos y exergéticos variarán ligeramente y por tanto los resultados de los cálculos efectuados nos permitirán obtener un intervalo de confianza con respecto al resultado de las eficiencias energéticas y exergéticas, para la obtención de los datos empezamos resolviendo las siguientes ecuaciones.

4.1.2.1 Cálculo de energía de entrada y salida

$$E_{in} = Q_{pw} + Q_s$$

$$E_{out} = Q_{liquid\ oil} + Q_{gas} + Q_{char}$$

Reemplazando

$$E_{in} = Q_{pw} + Q_s$$

Aplicando las fórmulas para el cálculo de potencia.

$$Q_s = Q_{resistencias} + Q_{motor\ agitador} + Q_{bomba\ de\ vacio} + Q_{bomba\ sist.rec} + Q_{motor\ sist.ref}$$

$$Q_s = 54\ MJ + 0.99\ MJ + 0.33\ MJ + 15.76\ MJ + 18.73\ MJ = 90.05\ M$$

Tabla 4-1:Energías de entrada al proceso

Equipos	Motor de agitación	Resistencias del reactor	Bomba de vacío	Bomba Sist. Recirculación	Motor sistema de refrigeración
Entrada MJ	0.99	54	0.33	15.76	18.73

Realizado por: Minaya, L., 2023

$$E_{out} = Q_{liquid\ oil} + Q_{gas} + Q_{char}$$

$$E_{out} = 27.28 + 9.49 + 7.26 = 36.74$$

Tabla 4-2:Energías de salida del proceso de pirólisis del PP

Fracciones	Fracción Líquida	Fracción gaseosa	Fracción Sólida
Salida MJ	27.28	9.49	7.26

Realizado por: Minaya, L., 2023

4.1.2.2 Cálculo del índice de recuperación de energía

$$ERR = \frac{36.74}{44} * 100 = 83.5\%$$

4.1.3 Cálculo de ECR y NGR

$$ECR = \frac{Q_h + Q_{char} * 0.6}{Q_{gas} * 0.6} * 100$$

Reemplazando

$$ECR = \frac{0.017 + (2.38 * 0.6)}{(7.26 * 0.6)} * 100 = 33.17\%$$

$$NGR = 100\% - ECR$$

$$NGR = 100\% - 32.82 = 67.18\%$$

4.1.3.1 Cálculo de la eficiencia energética

$$\eta = \frac{36.74}{44 + 90.05} * 100 = 27,41\%$$

4.1.3.2 Cálculo de la eficiencia exergética

Con el uso de la ecuación (12)

$$e_x = e_x^{ph} + e_x^{ch}$$

Al separar la ecuación tenemos:

$$e_{x.gas}^{ph} = \sum n_i [(h - h_0) - T_0(s - s_0)]$$

$$e_{x.gas}^{ph} = 5.61 \text{ MJ}$$

$$h - h_0 = \int_{T_0}^T c_p dT \quad (14)$$

$$s - s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{P}{P_0} \quad (15)$$

$$e_{xgas}^{ch} = \sum y_i e_{ch,i}^0 + T_0 R \sum y_i \ln y_i$$

$$e_{xgas}^{ch} = 24.81 \text{ MJ}$$

$$e_{xgas}^{total} = 30.42 \text{ MJ}$$

$$e_{pw} = \beta_o LHV_{pw}$$

$$e_{pw} = 1.0466 * 2.5 = 44.48$$

$$e_{liquid\ oil} = 1.065 * 45.2 = 11.82$$

$$e_{liquid\ oil} = 1.065 * 46.5 = 20.37$$

$$e_{liquid\ oil} = 1.065 * 42.6 = 10.38$$

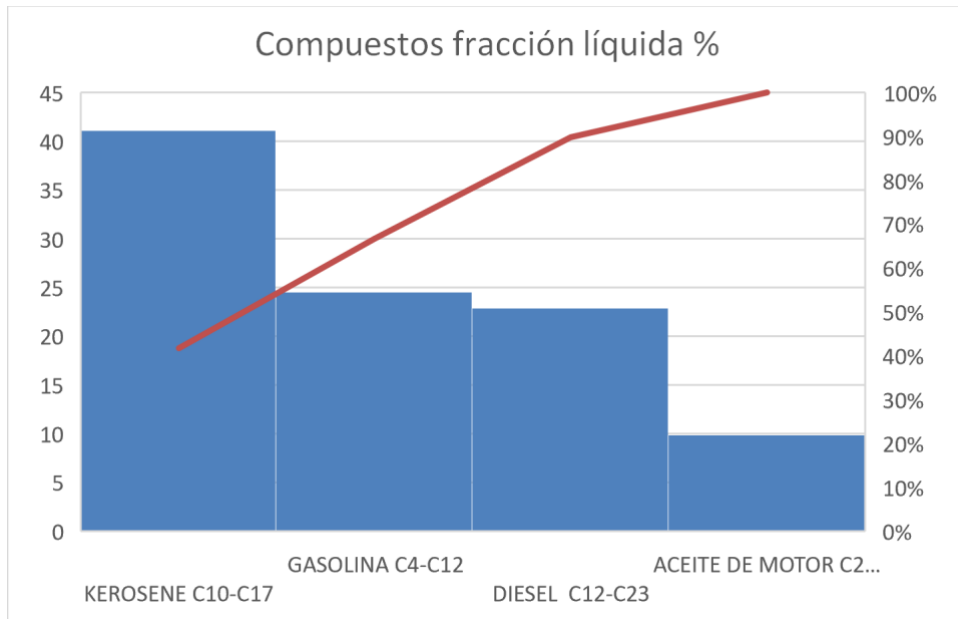


Ilustración 4-2: Porcentajes de los compuesto fracción líquida

Realizado por: Minaya, L., 2023

Tabla 4-3: Valores de Exergía en cada una de las fracciones

Fracciones	Fracción Líquida	Fracción gaseosa	Fracción Sólida
Valores de exergía MJ kg ⁻¹	42.57	30.42	30.68

Realizado por: Minaya, L., 2023

$$\beta_o = 1.0466$$

$$\beta_i = 1.065$$

Para el cálculo de la exergía de la fracción sólida se usó la siguiente ecuación

$$e_{char} = LHV * (1.0347 + 0.0140 \frac{H}{C} + 0.0968 \frac{O}{C} + 0.5904 \frac{N}{C} + 0.0493 \frac{N}{C})$$

$$e_{char} = 29.5 \text{ MJ} * \left(1.0347 + 0.0140 \frac{12.5}{87} + 0.0968 \frac{0.1}{87} + 0.5904 \frac{0.4}{87} + 0.0493 \frac{0.4}{87} \right) = 30.68$$

$$\Psi = \frac{42.57 + 30.42 + 30.68}{44.48 + 90.05} * 100\% = 77\%$$

4.1.3.3 Cálculo del intervalo de confianza para la fracción líquida de la pirólisis de PP

Tabla 4-4: Valores obtenidos de cálculos y valores de rendimiento de diferentes fuentes estudiadas

Valores obtenidos	Rendimiento %	Fracción liq MJ	Fracción sol MJ	Fracción gas MJ
Prueba 1	66.32	45.07	30.05	28.86
Prueba 2	62.47	41.80	34.23	39.33
Prueba 3	64.03	42.57	32.68	30.42
Promedio	64.27	42.48	32.32	32.87

Realizado por: Minaya, L., 2023

Dando un nivel de confianza del 95 % para el cálculo del intervalo de confianza y tomando en cuenta los datos de la tabla de distribución normal estandarizada (tabla z), tenemos:

a) Intervalo de confianza para la fracción líquida

$$\mu = 42.48$$

$$x = 45.07$$

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(45.07 - 43.15)^2 + (41.8 - 43.15)^2 + (42.57 - 43.15)^2}{3}} = 1.28$$

El valor crítico sería:

$$z = \frac{45.07 - 43.15}{1.28} = 2.02$$

El error estándar es:

$$\text{error estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

$$\text{error estándar} = \frac{1.28}{\sqrt{3}} = 0.74$$

Margen de error:

$$\text{margen de error} = \text{valor crítico} * \text{error estándar}$$

$$\text{margen de error} = 2.02 * 0.74 = 1.49$$

$$\text{intervalo de confianza} = 90\% \text{ de confianza } (41.66; 44.64)$$

b) Intervalo de confianza para la fracción sólida

$$\mu = 32.32$$

$$x = 34.23$$

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(30.05 - 32.32)^2 + (34.23 - 32.32)^2 + (32.68 - 32.32)^2}{3}} = 1.34$$

El valor crítico sería:

$$z = \frac{34.23 - 32.32}{1.34} = 1.44$$

El error estándar es:

$$\text{error estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

$$\text{error estándar} = \frac{1.34}{\sqrt{3}} = 0.83$$

Margen de error:

$$\text{margen de error} = \text{valor crítico} * \text{error estándar}$$

$$\text{margen de error} = 1.44 * 0.83 = 1.2$$

$$\text{intervalo de confianza} = 90\% \text{ de confianza } (31.12; 33.52)$$

c) Intervalo de confianza para la fracción gaseosa

$$\mu = 32.87$$

$$x = 39.33$$

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(28.86 - 32.87)^2 + (39.33 - 32.87)^2 + (30.87 - 32.87)^2}{3}} = 4.61$$

El valor crítico sería:

$$z = \frac{39.33 - 32.87}{4.61} = 1.40$$

El error estándar es:

$$\text{error estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

$$\text{error estándar} = \frac{4.61}{\sqrt{3}} = 2.66$$

Margen de error:

$$\text{margen de error} = \text{valor crítico} * \text{error estándar}$$

$$\text{margen de error} = 1.40 * 2.66 = 3.72$$

intervalo de confianza = 90% de confianza (29.15; 35.53)

4.2 Discusión

La muestra pirolizada de PP fue analizada tomando en cuenta cada una de las fracciones en las cuales se derivó (líquida, sólida y gaseosa), usando diferentes ecuaciones y fuentes bibliográficas para dicho cálculo con lo cual se obtuvo valores similares a los ya obtenidos por otros autores de modo que su puede tener un alto porcentaje de confianza sobre los valores calculados en el trabajo de (Zhang et al., 2020) tenemos valores para las fracciones líquida, gaseosa y sólida de 42.8, 46.8 y 34.2, respectivamente que a comparación con los datos obtenidos y usando la misma metodología varían relativamente debido a que ciertos valores de los rendimientos molares de las componente gaseosas fueron tomados de (Figueroa, 2020) en donde mediante un análisis cromatográfico puede identificar dicho rendimiento molar de las componente presentes en la fracción gaseosa, quedando pendiente de calcular un 10% de dicha composición debido a diferentes compuestos o impurezas presentes en las muestras usadas en los dos trabajos citados y obteniéndose un rendimiento exergético del 77% en el presente trabajo y dando con ello un intervalo de confianza de 90% de confianza (41.66; 44.64) para la fracción líquida la cual fue el enfoque principal en el presente trabajo investigativo

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se realizó el balance de exergía de la pirólisis de polipropileno en un reactor tipo batch.
- Se determinó la composición de la fase líquida, sólida y gaseosa de la pirólisis del Polipropileno (PP), usando datos bibliográficos de diferentes fuentes enfocadas al estudio.
- Se calculó el balance de energía y exergía del reactor tipo batch con calentamiento de la pirólisis de Polipropileno (PP)
- Se estableció la eficiencia energética y exergética de la pirolisis de residuos de Polipropileno (PP), obteniéndose valores de 42.57 MJ, 30.42 MJ y 30.68 MJ para las fracciones líquida, gaseosa y sólida, respectivamente.

5.2 Recomendaciones

Para futuros trabajos de análisis exergético de combustibles fósiles, combustibles en general o pirólisis de plásticos se recomienda realizar un análisis cromatográfico de las fracciones generadas del proceso, dicho análisis previo al cálculo permitirá obtener resultados mucho más cercanos a la realidad, esto debido a la posible existencia de impurezas presentes en la estructura de la materia prima, además de la posible presencia de agua u oxígeno, factores que influyen en el rendimiento exergético.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AGHBASHLO, M; et al.** Exergy analysis of a lignocellulosic-based biorefinery annexed to a sugarcane mill for simultaneous lactic acid and electricity production. *Energy* [en línea], 2018, vol. 149. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2018.02.063. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.063>
2. **AGHBASHLO, M., TABATABAEI, M. & HOSSEINPOUR, S.** On the exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation and optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil (WCO) using a low power, high frequency ultrasonic reactor. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2018, vol. 164, no. February, ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2018.02.086. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.086>
3. **ÁLVAREZ CARLOS, V.H.** Exergía en sistemas biológicos: Aproximación holística para el estudio de ecosistemas y el manejo ambiental. *Producción + Limpia*, 2013, vol. 8, no. 106.127.
4. **ÁLVAREZ, J; et al.** Máquinas térmicas motoras-1. [en línea], 2022, (Barcelona). [consulta: 26 febrero 2023]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36712/9788498802047.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
5. **ANUAR SHARUDDIN, S.D; et al.** A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2016, vol. 115, ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.037. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>.
6. **AREEPRASERT, C; et al.** Municipal Plastic Waste Composition Study at Transfer Station of Bangkok and Possibility of its Energy Recovery by Pyrolysis. *Energy Procedia* [en línea], 2016, vol. 107, págs. 222-226. DOI 10.1016/j.egypro.2016.12.132.
7. **BILGEN, S. & KAYGUSUZ, K.** The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. *Applied Energy* [en línea], 2008, vol. 85, no. 8. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2008.02.001.
8. **BILGEN, S., KELEŞ, S. & KAYGUSUZ, K.** Calculation of higher and lower heating values and chemical exergy values of liquid products obtained from pyrolysis of hazelnut

cupulae. *Energy* [en línea], 2012, vol. 41, no. 1. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2012.03.001.

9. **DÍAZ CALEÑO, Fardy, et al.** Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali- Colombia. 2020. págs. 1-101. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf?sequence=5>
10. **FIGUEROA, G.** *Obtención de líquido combustible a partir de la pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno.* Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga.2020.
11. **FIGUEROA, Juan.** *Obtención de líquido combustible a partir de la pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno.* [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas. Sangolquí- Pichincha. 2020.
12. **GEYER, R., JAMBECK, J.R. & LAW, K.L.** Production, use, and fate of all plastics ever made [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. *Science Advances* [en línea], 2017, vol. 3, no. 7. ISSN 2375-2548. Disponible en: <https://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.1700782>.
13. **GHARAGHEIZI, Farhad; et al.** A group contribution method for determination of the standard molar chemical exergy of organic compounds. *Energy* [en línea], 2014, vol. 70, ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2014.03.124. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.124>.
14. **GHARAGHEIZI, F. & MEHRPOOYA, M.** Prediction of standard chemical exergy by a three descriptors QSPR model. *Energy conversion and management* [en línea], 2007, vol. 48, no 9, p. 2453-2460. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890407001112>
15. **DI GREGORIO, F.** Fuel Gas Technology for Biomass and Waste–Environmental and Techno-Economic Assessments. *Second University of Naples*, 2013.

16. **HUANG, Y. W., et al.** Modeling of chemical exergy of agricultural biomass using improved general regression neural network. *Energy*, 2016, vol. 114, p. 1164-1175. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544216312038>
17. **LOPEZ, I. & BORZACCONI, L.** Introducción al Diseño de Reactores. [en línea], 2009, Uruguay: [consulta: 26 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.fing.edu.uy/>.
18. **LÓPEZ CARRASQUERO, Francisco.** Fundamentos de polímeros. *Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química. Mérida*, 2004, p. 49-51. DOI 10.13140/RG.2.1.2573.0000. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/262639386>.
19. **MALDONADO, A.T.** La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Magister). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá- Colombia. 2012. págs.2-110. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10015/905077.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
20. **PALMAY, Paul, et al.** Production and analysis of the physicochemical properties of the pyrolytic oil obtained from pyrolysis of different thermoplastics and plastic mixtures. *Molecules*[en línea], 2022, vol. 27, no 10, p. 3287. DOI 10.3390/molecules27103287.
21. **PANDA, A.K., SINGH, R.K. & MISHRA, D.K.** Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea],2010. vol. 14, no. 1, ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2009.07.005.
22. **POR, R., EDUARDO; et al.** Diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo. *Sangolquí-Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército*, 2010.
23. **RAGAERT, K., DELVA, L & VAN GEEM, K.** Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* [en línea], 2017, vol. 69, ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2017.07.044. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.

- 24. ROJO-NIETO, Elisa & MONTOTO MARTÍNEZ, Tania.** *Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global.* Ecologistas en acción [en línea], 2017. ISBN 9788494615191. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/basuras-marinas-plasticos-microplasticos.aspx>.
- 25. SCHMID, S.K.S.R.** *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* 5ta. Mexico: s.n, 2008. ISBN 9789702610267.
- 26. SONG, G; et al.** 2012. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. *Energy [en línea]*, vol. 40, no. 1. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2012.02.016.
- 27. TAPIA, Lorena.** Políticas para gestión integral de plásticos en el Ecuador. *Políticas Para Gestión Integral de Plásticos En El Ecuador*, 2014, p. 1-9.
- 28. VERA, M.** Química General. [en línea]. S.I, 2007. Disponible en: www.novaPDF.com
- 29. ZHANG, Y; et al.** Exergy and energy analysis of pyrolysis of plastic wastes in rotary kiln with heat carrier. *Process Safety and Environmental Protection [en línea]*, 2020, vol. 142. ISSN 09575820. DOI 10.1016/j.psep.2020.06.021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.021>.

ANEXOS

ANEXO A :REACTOR TIPO BATCH DE PIRÓLISIS CON CALENTAMIENTO



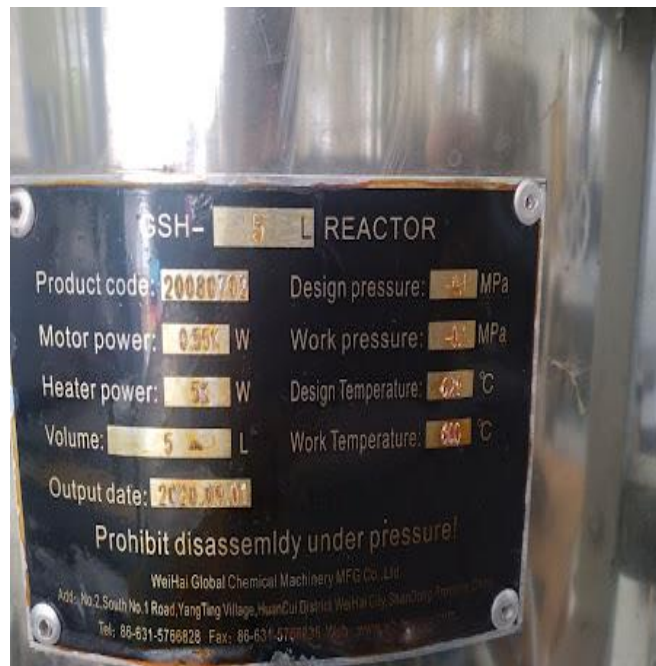
ANEXO B: FRACCIÓN SÓLIDA PIRÓLISIS PP



ANEXO C: FRACCIÓN LÍQUIDA PIRÓLISIS PP



ANEXO D: ESPECIFICACIONES DEL CONSUMO ENERGÉTICO (RESISTENCIAS REACTOR)



SSH- 5 L REACTOR

Product code: 20080703 Design pressure: 0.1 MPa

Motor power: 0.55 kW Work pressure: 0.1 MPa

Heater power: 53 W Design Temperature: 60 °C

Volume: 5 L Work Temperature: 60 °C

Output date: 2008.07.03

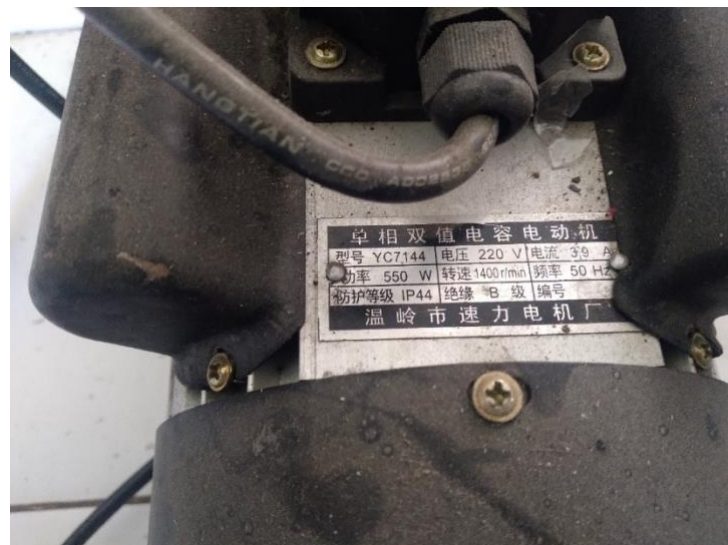
Prohibit disassembly under pressure!

WeiHai Global Chemical Machinery MFG Co., Ltd.
Add: No.2 South No.1 Road, YangTing Village, HuanCui District, WeiHai City, Shandong Province, China
Tel: 86-631-5766828 Fax: 86-631-5766831 Web: www.whgcm.com

ANEXO E: BOMBA DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN



ANEXO F: BOMBA DE SISTEMA DE VACÍO





epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 06/ 02 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Lenin Andrés Minaya Romero
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

2215-DBRA-UPT-2023