



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA,
PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE
POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROPUESTA TECNOLÓGICA

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: JORDÁN MORALES WILLIAM DAVID

ZURITA GARCÉS PAÚL OMAR

DIRECTOR: ING. PAÚL PALMAY

Riobamba - Ecuador

2018

©2018 William David Jordán Morales – Paúl Omar Zurita Garcés

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.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que, el trabajo de titulación, Tipo: Propuesta Tecnológica denominado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”**, de responsabilidad de los señores William David Jordán Morales – Paúl Omar Zurita Garcés, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

FECHA

FIRMA

Ing. Paúl Palmay

**DIRECTOR DE
TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ing. Mabel Parada

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Nosotros, William David Jordán Morales – Paúl Omar Zurita Garcés, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación. El patrimonio del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

William David Jordán Morales

180464833-3

Paúl Omar Zurita Garcés

180382919-8

DEDICATORIA

A toda mi familia materna en especial y siempre en mi corazón Beatriz Freire y Sandra Morales quienes son las mujeres de mi vida, a mi abuelito Miguel Morales que sé que desde el cielo siempre me cuidas y no me dejas solo, a mi hermano José Daniel por siempre llenarme de cariño y escucharme en todo momento, a mis amigos que han compartido conmigo muchos momentos de felicidad, tristeza y siempre han estado a mi lado.

David Jordán

Dicen que los homenajes hay que hacerlos en vida, sin embargo, no sabremos cuándo la muerte nos pueda sorprender; es por eso que el presente trabajo de titulación está dedicado a toda mi familia, por su apoyo incondicional, la confianza brindada, por todos los consejos dados únicamente esperando lo mejor para mí y especialmente está dedicado a una persona que no se encuentra entre nosotros Saúl Alcides Torres Barahona, quién fue un excelente ser humano y el pilar fundamental tanto en mi formación personal como espiritual; él me enseñó que la humildad y el respeto son los valores que marcan a un gran hombre, además que la perseverancia y dedicación constante son recompensadas en algún momento, es por eso que hoy tengo la seguridad que desde el cielo me cuida y se enorgullece que la semilla que sembró en mí, están dando un fruto muy valioso al cumplir uno de mis grandes sueños, ser un profesional de calidad.

Paúl Zurita

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de vivir y la sabiduría necesaria para encaminarme en esta profesión.

A mi madre Sandra Morales por ser el pilar fundamental para llegar a culminar mis estudios, a mi abuelita Beatriz Freire por sus sabios consejos los que me han servido para ser una persona de bien, responsable, dedicada y humana. A mi tía Dra. Guillermina Morales que desde pequeño me inculco a ser un profesional. Un agradecimiento muy especial para mis primos José, Luis, Pablo y David Freire con quienes crecí y eh compartido una de mis mayores pasiones el futbol.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por brindarme la oportunidad de crecer académicamente y llenarme de conocimientos fundamentales para mi desempeño profesional.

A todos los amigos que en el transcurso de mi carrera he podido conocer, han sido como mi familia los aprecio infinitamente.

A el Ing.Msc. Paul Palmay, Ing.Msc. Mabel Parada, por sus excelentes colaboraciones durante el presente proyecto, porque más que mis profesores han sido mis amigos les estoy eternamente agradecido y espero siempre conservar nuestra amistad.

David Jordán

Paúl Zurita

ABREVIATURAS

ΔT	Diferencia de temperatura ($^{\circ}C$)
ΔH	Entalpia (KJ/mol)
ε	Eficiencia del equipo (%)
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
Cp	Calor específico (BTU/Lbm- $^{\circ}R$)
Cv	Capacidad calorífica a volumen constante (BTU/Lbm- $^{\circ}R$)
UA	Coefficiente global de transferencia de calor (BTU/hora pie ² $^{\circ}R$)
A	Área de transferencia de calor (cm ²)
m	Flujo másico (Kg/h)
mo	Peso de la muestra (g)
n	Orden de reacción
k	Coefficiente de la velocidad de reacción
m	Peso del residuo (g)
E	Energía de activación
A0	Constante pre-exponencial
P	Presión interna del reactor (psi)
FTIR	Infrarrojos por transformada de Fourier (μm)
TGA	Análisis termogravimétrico
AIISI	American Iron and Steel Institute
rpm	Revoluciones por minuto
P	Peso de la muestra (g)
Vb	Volumen del biocombustible obtenido (ml)
V agua	Volumen de agua (L)
t	Tiempo de operación del proceso (h)
T_F	Temperatura de la alimentación ($^{\circ}C$)
T_S	Temperatura del producto ($^{\circ}C$)
T_w	Temperaturas del proceso de Pirólisis ($^{\circ}C$)
P	Presiones obtenidas en el proceso (Psi)
Tr	Tiempo de residencia (min)
TR	Temperatura interna reactor ($^{\circ}C$)
T	Temperatura del agua ($^{\circ}C$)
m_e	Flujo másico de entrada (Kg/h)
m_s	Flujo másico de salida (Kg/h)
m_a	Flujo másico de acumulación (Kg/h)

- S** Cantidad de combustible producido durante el proceso (g)
- F** Cantidad de materia prima utilizada durante el proceso (g)
- T_{in}** Temperatura del interior del tanque (°K)
- T_{amb}** Temperatura de los alrededores (°K)
- Y_{ex}** Diámetro externo (m)
- Y_{in}** Diámetro interno (m)
- L** Longitud del tanque (m)
- K** Conductividad térmica
- h_{aire}** Factor de conductividad para el aire $W/m^2 \cdot ^\circ K$

INDICE DE CONTENIDO

Páginas

RESUMEN.....	xvii
SUMARY.....	¡Error! Marcador no definido.

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1. Identificación del Problema	1
1.2. Justificación del proyecto	2
1.3. Línea base del Proyecto	3
<i>1.3.1. Reconocimiento del lugar del proyecto</i>	<i>3</i>
<i>1.3.2. Residuos sólidos y su reciclaje.....</i>	<i>3</i>
<i>1.3.3. Plásticos.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.3.1. Residuos Plásticos y su reciclaje</i>	<i>8</i>
<i>1.3.4. Pirólisis o Termólisis.....</i>	<i>11</i>
<i>1.3.5. Cinética de reacción de la degradación de los plásticos</i>	<i>14</i>
<i>1.3.5.1. Modelo Cinético de Reciclaje</i>	<i>14</i>
<i>1.3.5.2. Mecanismo de Reacción.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3.6. Diagrama de flujo del proceso de Pirólisis</i>	<i>17</i>
<i>1.3.7. Generación de Biomasa a partir de Pirólisis</i>	<i>20</i>
<i>1.3.8. Factores que influyen en la pirólisis</i>	<i>21</i>
<i>1.3.9. Tipos de reactores y aplicaciones en el proceso de pirólisis</i>	<i>23</i>
<i>1.3.9.1. Reactor batch para pirólisis.....</i>	<i>24</i>
1.4. Beneficiarios Directos e Indirectos	25
<i>1.4.1. Beneficiarios Directos.....</i>	<i>25</i>
<i>1.4.2. Beneficiarios Indirectos.....</i>	<i>25</i>

CAPITULO II

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	26
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	26
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26

CAPITULO III

3. ESTUDIO TÉCNICO.....	27
3.1. Localización del Proyecto.....	27
3.2. Ingeniería del Proyecto	28
<i>3.2.1. Tipo de Estudio</i>	<i>29</i>
<i>3.2.2. Métodos</i>	<i>29</i>

3.2.3. Determinación de Variables del proceso.....	31
3.2.3.1. <i>Temperatura.....</i>	31
3.2.3.2. <i>Presión.....</i>	31
3.2.3.3. <i>Tiempo de Residencia.....</i>	31
3.2.3.4. <i>Tipo de Plástico.....</i>	31
3.2.4. Cálculos de Ingeniería.....	31
3.2.4.1. <i>Cálculos del calor necesario:.....</i>	31
3.2.4.2. <i>Cálculos del Rendimiento del Reactor.....</i>	32
3.2.5. Análisis de Materia Prima.....	33
3.3. Proceso de Producción.....	35
3.3.1. Diseño del Reactor de Pirólisis Térmica.....	35
3.3.1.1. <i>Tipos de resistencias eléctricas:.....</i>	36
3.3.1.2. <i>Tipos de manómetros.....</i>	42
3.3.1.3. <i>Clasificación de los aceros inoxidable.....</i>	46
3.3.1.4. <i>Tipos de aislantes.....</i>	49
3.3.1.5. <i>Tipos de ventiladores.....</i>	52
3.3.1.6. <i>Tapa del Reactor Escogida Para el Presente Proyecto.....</i>	54
3.3.2. Instrucciones para el uso del Reactor de Pirólisis.....	55
3.3.3. Procedimiento para la utilización del Reactor.....	56
3.3.4. Validación del Equipo.....	57
3.4. Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.....	61
3.5. Análisis de costos/beneficio del proyecto.....	62
3.5.1. Costos de inversión.....	62
3.6. Cronograma de Ejecución del proyecto.....	64
RESULTADOS.....	65
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL EQUIPO..	67
CONCLUSIONES.....	70
RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Residuos generados en la ESPOCH.....	1
Tabla 2-1. Tipos y clasificación de los plásticos.....	6
Tabla 3-1. Identificación de los plásticos.....	7
Tabla 4-1. Parámetros cinéticos de Reacción.....	16
Tabla 5-1. Factores que determinan la Pirólisis de Plásticos.....	22
Tabla 6-1. Tipos de reactores con sus aplicaciones para el proceso de Pirólisis.....	23
Tabla 1-3. Localización Geográfica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.....	27
Tabla 2-3. Análisis de los productos obtenidos del proceso de Pirólisis.....	58
Tabla 3-3. Análisis del líquido obtenido en el proceso de Pirólisis.....	61
Tabla 4-3. Materiales requeridos para la construcción del reactor.....	62
Tabla 5-3. Materiales para la construcción de Reactor de Pirólisis	63
Tabla 6-3. Mano de Obra	64
Tabla 7-3. Recursos Totales.....	64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso de residuos plásticos en recuperación de hidrocarburos.....	19
Figura 2-1. Reactor tipo Batch.....	24
Figura 1-3. Localización geográfica del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.....	28
Figura 2-3. Análisis FTIR del polipropileno (1).....	34
Figura 3-3. Análisis FTIR del polipropileno (2).....	35
Figura 4-3. Análisis TGA del polipropileno.....	36
Figura 5-3. Resistencias eléctricas flexibles de cerámica.....	37
Figura 6-3. Resistencias eléctricas de banda con aislamiento mineral.....	39
Figura 7-3. Resistencias eléctricas tipo cartuchos.....	42
Figura 8-3. Manómetro tipo Bourdon.....	45
Figura 9-3. Aceros inoxidable austeníticos.....	49
Figura 10-3. Aislante tipo poliestireno expandido.....	51
Figura 11-3. Aislante tipo lana de roca.....	52
Figura 12-3. Aislante tipo fibra de cerámica.....	52
Figura 13-3. Ventilador de tipo centrífugo.....	54
Figura 14-3. Tapa del reactor de Pirólisis Térmica.....	56
Figura 15-3. Diagrama de flujo del proceso de Pirólisis.....	57
Figura 16-3. Análisis FTIR del residuo sólido obtenido del proceso de Pirólisis.....	59
Figura 17-3. Esquema de condensación.....	59
Figura 18-3. Sistema de condensación.....	60
Figura 19-3. Análisis FTIR Líquido del producto obtenido.....	61

LISTADO DE ANEXOS

- Anexo A** Partes del Reactor de Pirólisis Térmica.
- Anexo B** Visualización del Reactor de Pirólisis Térmica.
- Anexo C** Vistas lateral y frontal en 3D del Reactor de Pirólisis Térmica.
- Anexo D** Vista perspectiva del Reactor de Pirólisis Térmica.
- Anexo E** Vista frontal del Panel de control del Reactor de Pirólisis Térmica.
- Anexo F** Panel de control del Reactor de Pirólisis Térmica.
- Anexo G** Productos obtenidos del proceso en estado líquido y sólido.
- Anexo H** Información sobre el panel de control.
- Anexo I** Análisis realizados en laboratorio CESTA

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto fue diseñar y construir un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno (PP), generados en la ESPOCH. Se inició con la selección del modelo de reactor, escogiéndose un modelo Batch, porque es con el que mejor se puede trabajar a escala de laboratorio. Se construyó el reactor con un cilindro de acero inoxidable, recubierto por una carcasa con difusores de calor en su parte inferior. Se escogió el tipo de resistencias eléctricas de banda flexible de cerámica 220v y 3000W, las mismas que pueden alcanzar temperaturas de hasta 830 ° C. El tipo de manómetro utilizado es el Bourdon, también se utilizó fibra de cerámica como aislante térmico en la parte superior del reactor. La tapa que se utilizó presenta un sistema de bridas, que mantienen la temperatura interna. Se liberará la presión y producto por un sistema de tubería de cobre que consta de 4 extensiones. Además consta de un panel de control que sirve para medir la temperatura interna mediante una termocupla introducida en el interior del cilindro y a su vez para el encendido y apagado de las resistencias eléctricas. Por último un sistema de enfriamiento con ventiladores centrífugos. En la validación, se alcanzó un rendimiento del 51,10%; obteniéndose así un producto líquido, el cual era una mezcla de hidrocarburos, de C6 a C12 un porcentaje del 51 %; mientras que de C12 a C28 un porcentaje de 32,6 %; para llegar a estos porcentajes se utilizaron como variables de proceso temperaturas entre 400° a 450° C y tiempos de residencia de 15 y 30 minutos; los productos gaseosos se generaron en un porcentaje de 47,9 % y la fracción sólida en un porcentaje del 1% verificando la presencia de Carbono, en el proceso se determinó que la presión juega un papel importante porque de ella depende el producto que se desee obtener, siendo el valor ideal de 70PSI, para de esta manera poder trabajar a presiones más elevadas y analizar los productos que se encuentren.

Palabras clave: <CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES> <DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN>
<REACTOR BATCH> <PIRÓLISIS> <POLIPROPILENO> <TEMPERATURA> <TIEMPO DE RESIDENCIA>

ABSTRACT

The objective of this project was design and build a thermal pyrolysis reactor, using polypropylene plastic waste (PP), generated at ESPOCH. It began with the selection of the reactor model, choosing a Batch model, in view of the fact that it is the best to work on a laboratory scale. The reactor was built with a stainless steel cylinder, covered by a casing with heat diffusers in its lower part. The type of ceramic flexible band resistors chosen was 220v and 3000W, which it can reach high temperatures to 830°C. The type of manometer used is Bourdon; also ceramic fiber was used as thermal insulation in the upper part of the reactor. The flap that was used has a system of flanges, which maintain the internal temperature. The pressure and product will be released by a copper pipe system consisting of 4 extensions. It furthermore has a control panel to measure the internal temperature through a thermocouple inserted inside the cylinder to turn on and off the electrical resistances. Finally, a cooling system with centrifugal fans. In the validation, a yield of 51.10% was reached; thus obtaining a liquid product, which was a mixture of hydrocarbons, from C6 to C12 a percentage of 51%; while from C12 to C28 a percentage of 32.6%; to reach these percentages, temperatures between 400° to 450°C were applied as process variables and resistance times of 15 to 30 minutes; the gaseous products were generated in a percentage of 47.9% and the solid fraction in a percentage of 1% verifying in Carbon, during the process was determined that the pressure has an important role to obtain the desired item, being the best value of 70PSI, been able to work at higher pressures and analyze the products inside.

Keywords: EXACT AND NATURAL SCIENCES, DESIGN AND CONSTRUCTION, BATCH REACTOR, PYROLYSIS, POLYPROLIPEN, TEMPERATURE, RESIDENCE TIME.

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del Problema

Dentro de las alternativas de remediación sobre la reducción de la huella de carbono y de la obtención de bio-combustibles, la pirólisis de los residuos plásticos es un método de reciclaje químico en donde se pueden obtener productos derivados del petróleo, gas y energía (Ipiales, P 2018).

El componente técnico, ha promovido iniciativas para minimizar este problema latente, por lo que, se han establecido normativas, ordenanzas y leyes que buscan implementar una separación in situ o simplemente realizar un reciclaje en cada uno de los hogares, instituciones públicas o privadas, entre otras.

En este contexto y tomando en cuenta que en la actualidad la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) cuenta con 7 facultades, 24 escuelas y 37 carreras y a la fecha el número de estudiantes presenciales es de 14 134, donde cada facultad dispone de infraestructura física constituida por: aulas, talleres, auditorio, bodegas, laboratorios, canchas deportivas, bares, centros de copiado, baterías sanitarias y espacios verdes; se determinó que los estudiantes generan cierta cantidad de residuos sólidos por día, los cuales se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1-1: Residuos generados en la ESPOCH

TIPO DE RESIDUO	PESO DEL RESIDUO KG/SEMANA
Papel	175.96
Plástico	141.61
Cartón	14.05
Vidrio	11.68
Varios	118.65
Virutas	42.75
Guaipes	6.17
Orgánicos	3452.30
Infeciosos	3.97
Peso total de Residuos	3967.14
Peso Promedio Diario	793.44

Fuente: Coro E., 2010

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.

En base a este estudio se observa que la cantidad de residuos plásticos que se generan en la comunidad politécnica no está lejana a la realidad nacional, según datos del INEC (2016), en el área urbana se produce 0,57 kg/hab/día de residuos sólidos y de este total, el 12% es plástico, en promedio el 60 % es polietileno terftalato PET y polipropileno PP y sus derivados.

Como una alternativa a este problema, se encuentra el proceso de pirólisis térmica o termólisis que es un tipo de reciclaje químico; donde se da una adición de calor a los polímeros para la descomposición en cadenas más pequeñas, esta adición de calor se la puede hacer en el rango de temperatura entre 350 °C y 850 °C en ausencia de oxígeno, método que requiere una alta demanda de energía, por tal razón se hace necesaria la utilización de catalizadores que ayuden a la reacción con un menor consumo de calor, en el caso de una pirólisis catalítica (MARGMA 2006).

1.2. Justificación del proyecto

En el mundo cada día se considera que se genera alrededor de 4 millones de toneladas de residuos plásticos, lo cual se supone un espacio de almacenamiento de 20 millones de metros cúbicos en rellenos o basureros para la disposición de estos residuos, si el cálculo se realiza para un año se generan residuos alrededor de 1500 millones de toneladas y el espacio necesario para disponer estos residuos plásticos ascendería a 7300 millones de metros cúbicos (Association of Plastics Manufactures in Europe 2002-2003).

En el plan de manejo de residuos sólidos de la ESPOCH, se menciona que se genera una gran cantidad de residuos sólidos a diario, el cual determina también que existe un 85% de residuos orgánicos (3452,3 Kg/semana), 15% de residuos inorgánicos (514.839Kg/semana) y un incremento de residuos de 5% anuales. A partir de estos resultados se determinó que el 15% son residuos sólidos corresponde a diferentes tipos de plásticos entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: PS, PP, PET; a estos y todos los tipos de plásticos se les puede dar una mejor reutilización, es decir se puede dar una recolección, un reciclaje y un re-uso, evitando así la contaminación dentro de la institución (Coro E., 2010).

Los principales tipos de reciclaje son el mecánico y químico, que han sido el punto de enfoque de nuevos tratamientos de residuos sólidos y especialmente de plásticos, debido a su tiempo de degradación que oscila entre los 100 y 1000 años, ocasionando que el impacto en el medio por la presencia de este tipo de residuos sea mayor (PNGIDS 2010).

Según Espinoza, E., (2009), menciona que en el reciclado mecánico se obtienen materias primas secundarias con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original, en el reciclado

químico se incluye la despolimerización, gasificación y pirólisis, donde se descomponen los plásticos usados en componentes más sencillos como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos.

1.3. Línea base del Proyecto

1.3.1. Reconocimiento del lugar del proyecto

El presente trabajo técnico se realizó con el fin de proponer una alternativa para la reutilización de los plásticos generados dentro de la ESPOCH y de esta manera proponer usarlos como biocombustibles, para lo cual se recurrió a bibliografías de varios autores, en la cual se encontró que en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional poseían un reactor tipo Batch, en el que se podía realizar la pirólisis térmica, para lo cual se inició con el contacto del encargado del laboratorio y así programar una visita al mismo. Una vez programada la visita se procedió a realizar preguntas tales como: ¿Qué sugerencias usted recomendaría para el trabajo técnico?, ¿Cuál es el rendimiento del equipo de pirólisis térmica?, y ¿Qué se puede corregir del equipo?; se llegó a la conclusión de que en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, no se dispone de un equipo con las características requeridas, por lo que se planteó diseñar y construir un reactor tipo batch con similares características al equipo de pirólisis que disponían en la EPN y con lo cual se beneficiará a estudiantes y docentes de la Facultad así como al grupo investigadores de la carrera de Ingeniería Química.

1.3.2. Residuos sólidos y su reciclaje

A nivel urbano y rural se generan una gran cantidad de residuos sólidos, dentro de estos tenemos a los que son de procedencia orgánica e inorgánica. En la actualidad se quiere dar un mejor manejo a los mismos es por eso que tenemos los diferentes tipos de reciclaje, para de esa manera tratar de reducir la contaminación que existe día a día. Según lo determinado por los tipos de reciclaje se tiene que existen diferentes tratamientos para los residuos dependiendo de la procedencia del mismo.

A continuación se mencionan los tipos de tratamiento en general que existen para el manejo de residuos sólidos urbanos:

- **Reciclado**

Es muy importante mediante una gestión adecuada realizar el reciclado de material que por su estructura química y física se puede volver a utilizarlo como un producto final. Es la técnica más fácil de cumplir sin embargo es la más compleja en implementar. Su división se la hace en función de su estructura química y / o afinidad.

- **Incineración**

La incineración es una combustión completa donde se utiliza a ciertos tipos de residuos como combustible y conforma una parte de un sistema de tratamiento de residuos. Este método es principalmente utilizado para residuos orgánicos, aunque se lo puede aplicar a cualquier tipo de estos, sin embargo presenta el limitante de la alta toxicidad de sus gases de escape dependiendo de lo que se incinere.

- **Rellenos Sanitarios**

También conocidos con vertederos que es una de las técnicas más antiguas cuyo principal contratiempo es el volumen de la planta que se necesita, y restringe su utilización en ciudades metrópolis por la cantidad en volumen que se puede obtener por persona y por día.

Estos métodos o tratamientos de los residuos sólidos han sido muy usados, en la última década, los cuales tienen como objetivo reducir los costos de procesamiento, cantidad de desechos producidos y una correcta disposición final de los mismos evitando al máximo la contaminación ambiental.

- **Generación de nuevos productos**

Es una técnica de carácter relevante ya que se le da un valor agregado a un desecho y se lo puede utilizar con otras aplicaciones:

- ✓ Compost.- Se define como la degradación biológica de material orgánico. Para poder producir un compost de alta calidad se debe tener en cuenta variables como temperatura, humedad, pH. Thi et al. (2015) realizó una revisión donde mostro que la cantidad de compost obtenido será una función directa de las propiedades antes mencionadas. Chang y Hsu (2008) desarrollaron un método para predecir 10 parámetros del proceso de compostaje de residuos de granja; incluido el compostaje y tiempos de acidificación, temperatura más alta, valores de pH final y más bajo, CO₂ acumulativo evolución, y los porcentajes de pérdidas materiales en términos de las fracciones de peso de proteína sintético compuesto de alimentos humanos y animales.

Estos métodos o tratamientos de los residuos sólidos han sido muy usados, en la última década se han potenciado métodos que involucran a la biomasa generada de las ciudades es decir sistemas basados en energías renovables que toman cada vez una mayor relevancia. Estos sistemas tienen una doble ventaja ya que posibilitan la diversificación energética y reducen la dependencia del petróleo a la vez que se disminuyen las emisiones globales de CO₂.

Cabe recalcar que los residuos sólidos inorgánicos tienen un alto grado de contaminación y el tiempo que demora en degradarse es demasiado largo, debido a ello existe un gran interés que se enfoca en investigaciones y estudios para darle un tratamiento y manejo adecuado.

1.3.3. Plásticos

Los plásticos son compuestos formados por moléculas de gran tamaño de carbono mediante enlaces covalentes llamados polímeros, los cuales son derivados del petróleo y tienen como característica la facilidad de ser moldeable.

Los plásticos se obtienen de la polimerización de moléculas pequeñas de carbono por reacciones de adición o condensación, la cual forma un carbocatión el cual genera una reacción en cadena que termina cuando todo el reactivo inicial se haya convertido en el producto deseado (Ipiates, P 2018, 25).

Por ellos los plásticos han reemplazado a varios materiales tradicionales como metales, cerámicas, y otras aplicaciones como micro electricidad, biomedicina y comunicaciones (Salinas, V.; Vazquez, F. 2010), por medio de este avance el consumo de plásticos ha crecido considerablemente, originando así una gran generación de residuos plásticos que no son tratados adecuadamente.

Los plásticos se pueden dividir en varios grupos según en función de sus características, según su comportamiento térmico-mecánico se pueden establecer tres grandes grupos de plásticos:

Tabla 2-1: Tipos y clasificación de los plásticos







TIPOS	CLASIFICACIÓN
Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none">• Policloruro de vinilo (PVC)• Poliestireno• Polietileno• Polipropeno• 1-Polibuteno
Elastómeros	<ul style="list-style-type: none">• Cauchos• Gomas• Látex• Polisopreno
Termoestables	<ul style="list-style-type: none">• Las resinas• Fenoplásticos o plásticos de Fenol-Formaldehido

Fuente: Ipiales, (2018)

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.

Además los plásticos que se utilizan para reciclaje se identifican por medio de una simbología y abreviaturas específicas para cada establecida por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI):

Tabla 3-1: Identificación de los plásticos

NÚMERO	ABREVIATURA	NOMBRE COMPLETO
1	PET	Tereftalato de polietileno 
2	PE-AD	Polietileno de alta densidad 
3	PVC	Policloruro de Vinilo 
4	PE-BD	Polietileno de baja densidad 
5	PP	Polipropileno 
6	PS	Poliestireno 
7	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU), Acrilonitrilo-butadiestireno (ABS), Policarboboato (PC), Biopolimeros.

Fuente: GIZMODO, (2018)

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.

1.3.3.1. Residuos Plásticos y su reciclaje

Tomando en cuenta el tiempo de vida de estos residuos tenemos a los plásticos que su tiempo de degradación esta alrededor de 100 años; es así que dentro de los tipos de reciclaje se han propuesto que específicamente existan un manejo adecuado para los mismos, entre los cuales se pueden mencionar a continuación:

- **Reciclaje primario**

Consiste en un proceso de separación, limpieza y reutilización en el mismo proceso del que se origina el plástico en mención. Es un reprocesamiento del plástico utilizando operaciones diferentes aumentando la producción, para aquello tenemos operaciones como moldeado por inyección, por extrusión, por termoformado entre otros. Cabe recalcar que se conoce el origen de este reciclo, que pueden ser incluso del mismo proceso de obtención original. Existen muchas empresas que se encargan de este tratamiento primario en el que se obtiene plástico reciclado en forma de pellets, limpio y seco.

- **Reciclado secundario**

También se lo conoce como reciclado o método mecánico. El cual consiste en convertir el reciclo en materiales de menor calidad. Por lo general se lo realiza por extrusión con el particular, que mediante este método no es necesario el lavado y clasificación de plásticos ya que se lo realiza mezclando los mismos. Se obtienen plásticos de menor calidad justamente por lo antes mencionado, ya que al utilizar mezclas de plásticos desconocidos variamos su estructura cristalina modificando así sus propiedades físicas originales. Por lo general, se somete a medios mecánicos de conversión, en un esquema de reciclaje de circuito cerrado. Sin embargo, este método no puede resolver el plástico acumulado en entornos urbanos.

- **Reciclado terciario**

También llamado reciclado químico. Consiste en realizar tratamiento aprovechando la química del plástico y obtener combustibles a partir de ellos. Entre las macromoléculas que constituyen un material plástico tienen lugar a interacciones físicas y de la misma forma que entre moléculas de bajo peso. Dichas interacciones son responsables de las diferentes propiedades que presentan los plásticos, por ejemplo las moléculas lineales donde el calor puede reblandecerse y en muchos casos fundirse. Según el grado de ordenamiento de las macromoléculas en estado sólido es posible distinguir entre plásticos parcialmente cristalinos y amorfos.

Los materiales que se reblandecen al calentarse y empiezan a fundir son llamados termoplásticos y mientras que los materiales contrarios es decir ni funden ni son disueltos se los conoce como termoestables, característica que se debe al entrecruzamiento de sus macromoléculas, formando redes de carácter tridimensional. De acuerdo a su aspecto físico también se puede clasificar a los plásticos en elastómeros y no elastómeros.

En la actualidad han aparecido productos compuestos por mezcla de plásticos que sirven para mejorar las propiedades del plástico original y que ha servido para obtener productos de características específicas y mejoradas según la necesidad del cliente. Esto se lo puede realizar mediante polimerización, con la adición de monómeros que se insertan en la estructura de la macromolécula.

- **Reciclaje cuaternario**

El reciclaje cuaternario consiste en la degradación térmica de los plásticos para la obtención de energía, debido al alto contenido de energía calorífica de los plásticos, que ayudan a reducir a combatir los problemas medioambientales y la utilización de espacio en los rellenos sanitarios.

Dentro del reciclaje terciario o reciclaje químico tenemos varios tipos de tratamientos que se pueden dar a los diferentes tipos de plásticos, que en la actualidad son de gran importancia, debido a que es una alternativa para obtener biocombustibles, además es una de las propuestas que se utilizan para reducir la huella de carbono; entre los cuales se mencionan a continuación:

- ✓ **Despolimerización química**

Es un proceso donde se da la hidrolisis hasta la obtención de monómeros.

- ✓ **Gasificación**

Proceso donde ocurre una reacción con agua a Temperaturas mayores a los 1000°C. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento de los gases ligeros (syngas), necesario para su secado (eliminación de vapor de agua) y filtración, y en el lavado (cuando es necesario eliminar los alquitranes (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía 2007).

✓ **Hidrogenación**

Este proceso es uno de los más utilizados a nivel industrial, en donde se produce una reacción con H₂ en presencia de un catalizador metálico a Temperaturas de 300 a 500°C produciéndose así que los hidrocarburos insaturados rompan sus dobles o triples enlaces, transformándolos en hidrocarburos saturados y líquidos.

✓ **Pirólisis Térmica**

También se la conoce como cracking térmico, es un proceso en el que ocurre una descomposición térmica en atmosfera inerte entre temperaturas de 500 a 900°C; para de esta manera obtener hidrocarburos gaseosos y líquidos, así como también solidos carbonosos.

Una corta exposición a altas temperaturas recibe el nombre de pirólisis rápida, y maximiza el producto líquido. Si se aplican temperaturas más bajas durante períodos de tiempo más largos, predominarán las cenizas sólidas (CARE 2017).

La pirólisis térmica es una alternativa para el reciclado eliminando así las limitaciones del reciclado mecánico, en donde se utilizan grandes cantidades de residuos plásticos que estén completamente limpios y homogéneos para de esta manera poder ejecutarlo con éxito, donde la gestión de residuos sólidos plásticos tienen un papel importante en este proceso.

✓ **Pirólisis Catalítica**

También se la conoce como cracking catalítico, este es un proceso de descomposición térmica en presencia de un catalizador metálico a temperaturas que están entre los 350 a 550 °C. Los catalizadores más comunes en este proceso son las zeolitas que tienen un alto contenido de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃).

La pirólisis es el proceso típico reciclado químico, lo que permite la producción de monómeros, principalmente etileno, propeno y buteno a partir de plásticos de desecho. En el caso de procesos de craqueo, sus principales productos son combustibles fracciones, hidrocarburos gaseosos y mezclas líquidas de hidrocarburos que hierven en el intervalo de temperaturas de 35 a 360°C (aceites de gasolina y gas de luz), así como los residuos de carbono sólidos, similar a coque (Al Salem et. al. 2010).

El enfoque del estudio estará basado en la pirólisis térmica debido a que en los últimos años este proceso se ha estudiado de una manera profunda en los diferentes tipos de plásticos dando así buenos rendimientos y de esta manera obtener valiosos hidrocarburos que poseen una alta capacidad calorífica.

1.3.4. Pirólisis o Termólisis

Al proceso de Pirólisis, también se le puede denominar como termólisis, él mismo que consiste en un proceso de descomposición química y térmica que por lo general produce moléculas más pequeñas de cadenas carbonadas. La pirólisis es el proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400° C y 1000°C, obteniendo unas fracciones gaseosas, líquidas y sólidas aprovechables. (Aracil I 2008).

En el proceso de pirólisis se excluye el aire, por razones de seguridad y calidad de los productos obtenidos, además este método se lo puede realizar a varios niveles de temperatura, tiempos de reacción, presiones y en presencia o ausencia de gases o líquidos reactivos y de catalizadores.

Dentro de la descomposición térmica de los polímeros existe gran producción de gases, destilados y carbón, aunque en cantidades relativamente variables. Los cuales se pueden aplicar como combustibles, petroquímicos y monómeros. Dependiendo de los polímeros o mezclas de polímeros alimentados y las condiciones de operación utilizadas, los rendimientos pueden variar en rangos considerables. Como regla general, los productos gaseosos y líquidos son mezclas de numerosos compuestos diferentes. Existe un gran problema de fraccionar estos efluentes y actualizar a las especificaciones comerciales, al tiempo que separa las impurezas indeseables, debe ser investigado caso por caso. El chart incorpora rellenos, pigmentos y cenizas.

El proceso de pirólisis implica ruptura de enlaces y en su gran mayoría son, endotérmicos, por lo que un suministro de calor al material reaccionante es de primordial importancia y generalmente determinante de la velocidad de reacción.

Las resinas de poliolefina contienen solo carbono, hidrógeno y aditivos, como algunos antioxidantes y estabilizadores UV. Además, la presencia de heteroelementos, como el cloro y el bromo es indeseable, ya que estos elementos se distribuyen en las tres fases del producto: gas, líquido y sólidos, reduciendo el potencial de mercado y el valor de cada uno de estos. Estudiando su eliminación es una consideración importante en el desarrollo de procesos para plásticos mixtos (Bridgewater 2008).

El aprovechamiento, revalorización y minimización de residuos es un factor clave para la competitividad de las actividades que los generan, para el cuidado del medio ambiente y para restaurar la conservación de los recursos naturales (Bonet 2011). Desde el avance de la producción en masa de plásticos en la década 1960, el lado industrial se ha visto en la necesidad de hallar una alternativa, encontrando la solución en el proceso de pirólisis, en donde los residuos sólidos son degradados con la ausencia de oxígeno contribuyendo así con la problemática ambiental, generando como productos de dicho proceso una fracción sólida, una fracción gaseosa y una fracción líquida, lo cuales tras posteriores tratamientos son utilizados para varias aplicaciones de importancia industrial.

En Ebenhausen, Oerlenbach se construyó una planta que funciona según el proceso de pirólisis de la Universidad de Hamburgo, con una capacidad de 5000 toneladas por año. La viabilidad de la conversión de poliolefinas por pirólisis se demostró con éxito, con rendimientos de mezclas de PE / PP de típicamente 51% (m / m) de gas, 42% (m / m) de líquidos y el resto no contabilizado (Buekens 2006).

Los procesos de combustión y gasificación son posteriores a los procesos de pirólisis, por lo cual tiene como objetivo producir la materia prima que será utilizada para una oxidación total o parcial. Este proceso está constituido por tres etapas, las cuales son: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y finalmente, la obtención y separación de los productos los cuales tendrán fines alternativos.

Los productos obtenidos de la degradación térmica son factores dependientes de manera íntima de dos variables de operación fundamentales, estos siendo la temperatura y tiempo de residencia. Tomando en cuenta la relación que existe entre los valores de estas propiedades y la estabilidad de los productos resultantes se han hecho varios estudios que muestran el rendimiento de este proceso de reciclado (Bridgewater 2008).

A mayores temperaturas de operación incrementan la producción de hidrógeno, metano, acetileno, aromáticos y coque, mientras que bajas temperaturas aumentan la producción de compuestos líquidos (F. Contreras 2014, 11).

A temperaturas mayores a 600 °C, la dilución del producto y del vacío favorecen la producción de pequeñas moléculas simples de gas, mientras que a bajas temperaturas 400° C y presión incrementada se producen productos líquidos más viscosos, por ende tenemos mayor tasa de pirólisis y mayor tendencia a la coquización. El tiempo de reacción requerido se determina principalmente por la temperatura de reacción. La formación de productos primarios, como los

monómeros está favoreciendo por tiempos de residencia cortos, la formación de más productos termodinámicamente estables (H₂, CH₄, aromáticos, carbono). La baja presión (al vacío o en presencia de un diluyente inerte) favorece la producción de productos primarios, incluido el monómero, a alta presión, el de fracciones líquidas complejas (Buekens 2006, 8,9).

La degradación de polímeros mediante la pirólisis térmica se lleva a cabo por medio de dos reacciones, las que ocurren simultáneamente dentro del reactor. La primera reacción es el corte aleatorio de enlaces, lo que provoca que la molécula reduzca su tamaño y por ende, resulta en una disminución del peso molecular del plástico. En diversos estudios se ha mostrado que el corte aleatorio es la vía principal de degradación de la pirólisis térmica de variados polímeros, en particular de poliolefinas tales como PE y PP (F. Contreras 2014).

Por otro lado, la segunda reacción que se lleva a cabo es el corte de fin de cadena de los enlaces, la misma que genera productos volátiles. Murata, como se citó en (F. Contreras 2014), mostró que la segunda reacción que se da en una degradación se lleva a cabo en la interface gas-líquido al interior del reactor, asumiendo que el reactor de estudio es un reactor semi-batch, dada a la naturaleza heterogénea de esta reacción y que es causada por una transferencia de radicales intramoleculares. A su vez, concluyó que la reducción de los productos volátiles generados para PP, PE y PS, se da gracias a la disminución de la interface gas-líquido en un reactor.

Debido a las condiciones de trabajo que demandan ciertos residuos sólidos para su descomposición con la ausencia de catalizadores y para alcanzar porcentajes de rendimiento aceptables, un gran número de estudios de craqueo térmico son únicamente en polietileno, poliestireno y polipropileno ya que estos se degradan con facilidad entre un rango de temperatura de 350-500 °C. Es por esta razón que solo algunos pocos han trabajado en la descomposición térmica de otros plásticos comunes como poli cloruro de vinilo, poli metacrilato de metilo, poliuretano y polietilentereftalato (Mancheno M 2016).

Además, (Buekens 2006, 22) menciona: “Para polímeros a granel como poliolefinas, poliestireno, poliéster y PVC, la escala de producción es demasiado pequeña y los márgenes son demasiado bajos para hacer que la pirólisis de los plásticos sea un proceso económicamente viable”. Dado que el gas y el petróleo son los principales productos de pirólisis, la viabilidad económica depende crucialmente del precio del petróleo crudo.

Sin embargo, numerosos estudios han dado a conocer los productos que estos plásticos generan tras su degradación térmica, aun siendo estos de valor insuficiente para cubrir los gastos del

proceso, se espera que la corriente política que hoy en día genera el reciclaje de desechos sólidos favorezca al contexto económico.

1.3.5. Cinética de reacción de la degradación de los plásticos

La descripción de las reacciones de descomposición durante la degradación de los plásticos es bastante difícil, porque el proceso en sí es muy complejo, además se considera que existen factores que influyen en la degradación térmica ya que puede ocurrir en ausencia o presencia de catalizadores, así como también otro factor importante es el tipo de reactor, el tipo de plástico y la cantidad.

La degradación térmica en presencia de catalizadores se la denomina como degradación termocatalítica, las pruebas experimentales del mismo se realizan en reactores discontinuos en el 95% de los casos y dentro de ellos predomina el análisis termogravimétrico que no es más que analizar la temperatura a la cual el polímero se va a degradar y de esa manera mantener un rango de temperatura para el funcionamiento del reactor.

También se puede realizar en reactores de tipo continuo donde se necesitan cantidades considerables de desechos para de esta manera abastecer al proceso, dentro de este surgen dificultades causadas por la geometría del reactor y mayores cantidades de materiales o la alimentación de catalizadores, su separación de los productos y la regeneración. Se han propuesto algunos modelos cinéticos para la degradación del polímero térmico o catalítico. El enfoque comúnmente utilizado es la cinética de primer orden para investigar las características de la degradación de mismo.

1.3.5.1. Modelo Cinético

Los objetivos de los experimentos son la determinación de las energías de activación aparentes y otros parámetros cinéticos de reacción (velocidad de reacción, constante pre-exponencial, etc.) de productos volátiles resultantes de la degradación (gases y líquidos). Además del desarrollo de modelos cinéticos, la predicción de los rendimientos o las principales propiedades de los productos en el conocimiento de las propiedades de la materia prima también son importantes. El principal problema en este caso es la derivación de la constante de velocidad de reacción porque algunos factores afectan significativamente la conversión de la degradación (física, geométrica, estérica, etc.).

Por lo general, se postula un valor constante de la velocidad de reacción y se usa la ecuación cinética de primer orden junto con la ecuación de Arrhenius. Las relaciones se vuelven más difíciles cuando se consideran las reacciones auto-catalíticas. Existen algunas correlaciones para calcular los parámetros cinéticos de la reacción en circunstancias dinámicas. La energía de activación y la constante pre-exponencial se determinan a partir de la forma logarítmica de la ecuación de Arrhenius: (Buekens 2006).

$$-\frac{dm}{dt} = km^n$$

$$k = A_0 e^{-\frac{E}{RT}}$$

Donde:

m_0 = es el peso de la muestra

n = es el orden de reacción

k = es el coeficiente de la velocidad de reacción

m = es el peso del residuo

t = es el tiempo de degradación

E = es la energía de activación

A_0 = es la constante pre-exponencial

Las relaciones pueden simplificarse mediante el uso de métodos termogravimétricos, pero se debe introducir un nuevo parámetro; este nuevo parámetro es la velocidad de calentamiento. La Tabla 4.1 se muestra algunos de los enfoques que se utilizan para la determinación de parámetros cinéticos:

Tabla 4-1: Parámetros cinéticos de reacción

MÉTODO	ECUACIÓN
Flynn – Wall	$\Delta \ln = -1052 \left(\frac{E_a}{R} \right) \Delta \left(\frac{1}{T} \right)$
Friedmann	$\ln \left(\frac{dx}{dt} \right) = \ln A + n \ln(1-\alpha) + \min(\alpha) - \left(\frac{E_a}{T} \right)$
Kissinger	$\ln \left(\frac{\beta}{T^2} \right) = -\frac{E}{RT} + \left[\ln \left(\frac{AR}{E} \right) - \ln F(x) \right]$
Ozarawa	$\ln \beta = -0.4567 \frac{E}{RT} + \left(\log \frac{AE}{R} - \log F(x) \right) - 2.315$
Horowitz–Metger	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{a-\alpha} \right) \right] = \frac{E_a \Phi}{RT^2}$

Fuente: Buekens. (2006)

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.

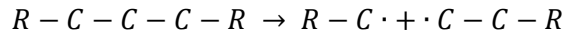
Al comparar las ecuaciones que se muestran en la tabla se determinó que las ecuaciones de Flynn-Wall, Horowitz-Metger y Friedmann; dieron una excelente correlación en el caso de la degradación del polipropileno, mientras que los otros crearon un software para calcular los parámetros cinéticos de la reacción utilizando la ecuación cinética de primer orden basada en estas ecuaciones. Los parámetros clave se calcularon con la minimización de las diferencias entre los resultados calculados y experimentales obtenidos directamente por un análisis termogravimétrico.

1.3.5.2. Mecanismo de Reacción

La reacción se produce por la química que tiene el ión carbonilo e incluye diversas etapas como la transferencia de hidrógeno, el corte de cadena, isomerización, oligomerización, alquilación y aromatización. La pirólisis térmica transcurre por un mecanismo de ión carbonilo formando así radicales libre; entre los cuales se mencionan a continuación:

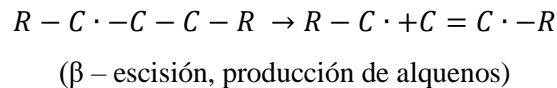
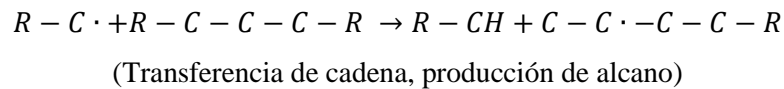
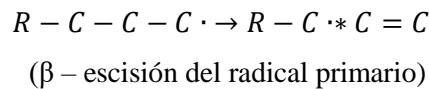
✓ **Iniciación**

La iniciación puede ocurrir en algún defecto de la cadena polimérica. Por ejemplo:



✓ **Propagación**

El peso molecular de las cadenas poliméricas principales puede reducirse a través de sucesivos ataques de los sitios ácidos u otros iones carbonilos y rompimiento de cadena, produciéndose una fracción oligomérica (aproximadamente C30 – C80). Posteriores rompimientos de la fracción oligomérica probablemente por corte- directo de iones carbonio de fin de cadena lleva tanto a la formación de gases por un lado, como a una fracción líquida (aproximadamente C10 – C25) por el otro (F. Contreras 2014).



✓ **Terminación**

Ocurre cuando se combinan dos radicales para formar una cadena de polímero.

1.3.6. Diagrama de flujo del proceso de Pirólisis

Para obtener un producto petrolífero en el proceso de la pirólisis de plásticos usados, se tiene en cuenta que son generados del hogar, en las industrias, en las escuelas, colegios, universidades, etc. Estos residuos se utilizan para obtener productos valiosos, pero a su vez se encuentran invariablemente contaminados con materiales como tierra, hierro y madera, etc., además se debe tener en cuenta que existen varios tipos de plásticos y por ende este y cualquier material independientemente de su procedencia no podrá ser utilizado directamente en el proceso de pirólisis. Por lo tanto, en el paso siguiente se deben aplicar tratamientos de separación para obtener plástico residual con una composición homogénea, de no realizarse este tratamiento se encontrara

con diversos materiales contaminantes y por ende conducirá a una economía deficiente para de esta manera aumentar el costo del procedimiento de reciclaje.

Por lo tanto, el punto importante para el proceso de pirólisis es la purificación de los termoplásticos procedentes de los desechos; en el tratamiento especialmente se debe excluir al PVC y PET porque estos pueden causar emisiones desfavorables debido a la presencia de Cl. El material de desecho debe separarse en componentes individuales, como termoplástico, PVC, PET, termoendurecimiento, hierro, aluminio y papel, etc.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso de los plásticos previo a su tratamiento:

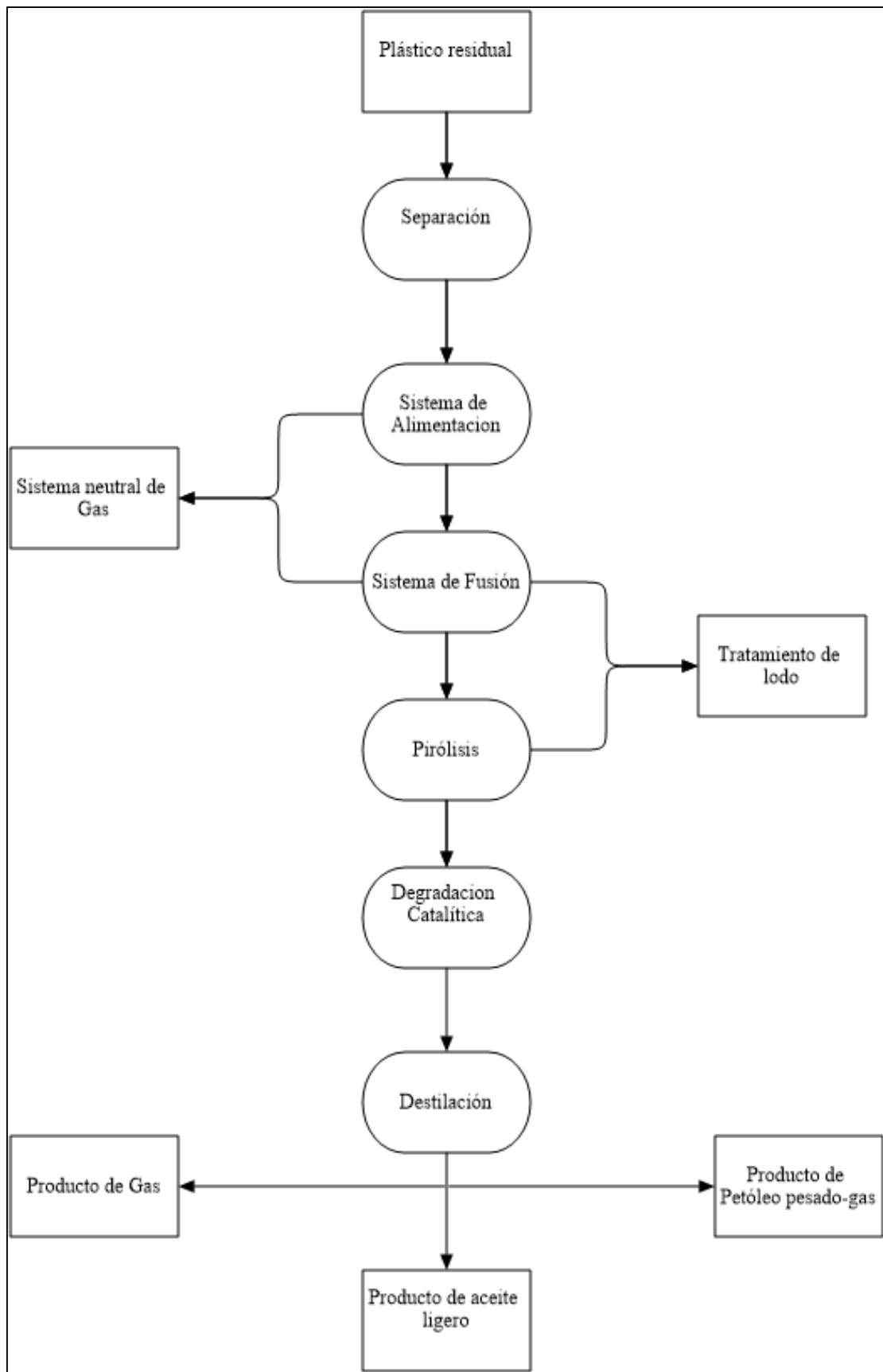


Figura 1-1. Diagrama de flujo de proceso para residuos de plásticos en recuperación de hidrocarburos.

Fuente: Adaptado de Buenkes, (2006)

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.

1.3.7. Generación de Biomasa a partir de Pirólisis

La biomasa es uno de los recursos energéticos con mayor potencial tanto en países desarrollados como recurso emergentes, pero sigue sin sufrir el desarrollo esperado (Pérez, J., Borge, D., Agudelo, J. 2009).

La biomasa puede ser transformada mediante procesos biológicos o termoquímicos en combustibles de alto contenido energético. Los procesos biológicos son por lo general más selectivos, y se llevan a cabo en tiempos de reacción mayores a los tiempos llevados a cabo en procesos térmicos, que a su vez brindan múltiples y complejos productos en tiempos de reacción cortos (Bridgwater 2011). Dentro de los procesos termoquímicos se encuentran la combustión, la gasificación, la licuefacción, la torrefacción y la pirólisis como sus principales exponentes.

En el presente estudio haremos una revisión de cuál es el efecto de la pirólisis en los plásticos específicamente en el polipropileno (PP), sin embargo para poder entender las características de este proceso térmico, se introducirá la gasificación.

La gasificación de biomasa es uno de los sistemas con gran potencial ya que permite la generación de electricidad, mediante tecnologías de bajo costo como los gasificadores de lecho fijo (potencias medias – bajas), o reactores de lecho fluidizado con tecnología más exigente y con mayor capacidad de generación. La transformación de la biomasa en un combustible gaseoso, aprovechable en motores de combustión interna alternativos o en turbinas de gas como combustible, exige que la biomasa atraviese varios procesos termoquímicos, compuestos por reacciones endotérmicas (secado, desvolatilización y reducción) y exotérmicas (oxidación de volátiles y carbón).

Actualmente existen sistemas de combustión directa para generación de energía eléctrica (Sierra J., Guerrero F., Arango C. 2008), a partir de biomasa como combustible, pero con el problema de la dosificación inherente a un sólido (Yoshioka T., Hirata S., Matsumura Y., Sakanishi K. 2005), por esta razón la gasificación resulta atractiva, puesto que simplifica los sistemas de dosificación y transporte del combustible. El gas de síntesis de los procesos de gasificación normalmente es un gas compuesto por monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano, trazas de etano y eteno, agua, nitrógeno y algunos contaminantes, como pequeñas partículas de carbonizado, ceniza y alquitranes (Sierra J., Guerrero F., Arango C. 2008).

La energía proveniente de este material gaseoso, la calidad y el porcentaje de este en su obtención, ha sido la base fundamental de muchos estudios; los cuales algunos autores se han enfocado en

la construcción de la máquina de gasificación, otros en la biomasa suministrada y algunos en el tratamiento del proceso agregando otros agentes que faciliten el proceso o realizando combinaciones entre los factores anteriores, pero siempre se busca incrementar la calidad del material gaseoso (Sierra J., Guerrero F., Arango C. 2008) (Yoshioka T., Hirata S., Matsumura Y., Sakanishi K. 2005).

Los plásticos por su estructura química comprende una macromolécula de síntesis variada que tiene industrialmente varias formas de obtención que determinan sus propiedades finales, dichas propiedades físicas sirven para una clasificación en termoplásticos y termoestables.

1.3.8. Factores que influyen en la pirólisis

Los factores que influyen en el proceso de pirólisis térmica son:

Tabla 5-1: Factores que determinan la pirólisis de plásticos

FACTOR DE INFLUENCIA EFECTO	EFECTOS
Temperatura	<p>El proceso de pirólisis se desarrolla a una temperatura que varía desde los 200°C hasta los 800°C, en si la temperatura ayuda al rompimiento de enlaces químicos de las moléculas, esto se debe a que las fuerzas de Van der Waals colapsan debido al aumento de vibraciones, lo que provoca el rompimiento del enlace Carbono-Carbono. Según Remedio Hernández (2007): menciona que; “dentro de la pirólisis se puede distinguir tres etapas de temperatura:”</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Entre 220°C y 330°C: la fracción que mayor se obtiene de la descomposición de los materiales plásticos son sólidas como: cenizas y coque. ✓ Entre 330°C y 450°C: las fracciones líquidas tienen un alto rendimiento, mientras que la generación de gases se da en menor cantidad. ✓ Las temperaturas mayores a 500°C los plásticos pasan su punto de ebullición y la fracción con mayor rendimiento son gases.
Composición química de las resinas	<p>Los productos de pirólisis primaria se relacionan en forma directa con la sustancia química estructura y composición de la resina, y también a la mecanismo de descomposición (puramente térmico o catalítico).</p>
Tiempo de pirólisis	<p>Los tiempos de residencia más largos favorecen a una conversión secundaria de productos primarios, produciendo más coque, alquitrán, así como productos térmicamente estables, oscureciendo gradualmente el efecto de la estructura original del polímero.</p>
Presión de funcionamiento	<p>La baja presión reduce la condensación de fragmentos reactivos formando coque y pesados.</p>
Presencia de gases reactivos, como oxígeno (aire) o hidrógeno	<p>Dicha presencia internamente genera calor, diluye los productos e influencias sobre los equilibrios, la cinética y los mecanismos</p>
Uso de catalizadores	<p>Su uso influye en la cinética y los mecanismos, y por lo tanto, la distribución del producto.</p>
Aditivos incorporados	<p>Los aditivos generalmente se evaporan o se descomponen. Algunos pueden influir en la cinética y el mecanismo.</p>
Fase líquida o de "gas"	<p>La pirólisis en fase líquida retarda el escape de los productos en evolución, mejorando así las interacciones.</p>

Fuente: Buekens, (2006)

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P, 2018.

1.3.9. Tipos de reactores y aplicaciones en el proceso de pirólisis

Para el proceso de la pirólisis, se debe tener una caracterización de los tipos de reactores que se vaya a utilizar en el proceso. Resulta que la determinación de cada uno depende de muchos factores, entre ellos, el tiempo de residencia, el tipo de contacto entre la muestra a degradar, el catalizador o las cinéticas de reacción (Obando 2015). Teniendo en cuenta la calidad de los productos que resultan de la variedad de reactores, se debe elegir cual resultará con el mejor proceso térmico para plantas industriales de acuerdo con las propiedades de los flujos de residuos disponibles.

Tabla 6-1: Tipos de reactores con sus aplicaciones para el proceso de pirólisis

TIPO DE REACTOR	CARACTERÍSTICAS PARTICULARES	APLICACIONES
Extrusora	La temperatura de operación es limitada. La desgasificación de productos de descomposición prematura es esencial.	Producción de ceras de PE.
Reactor tubular	Simplicidad.	Poliiolefinas fundidas.
Reactor tanque agitado, posiblemente con un circuito de calentamiento externo y / o un enfriador de reflujo	Reactor de fase líquida convencional. La agitación mejora la transferencia de calor. La obstrucción de los conductos aguas abajo debe evitarse.	Plásticos mezclados: BASF, Ludwigshafen Chiyoda Engineering, Niigata.
Reactor vertical o eje	Flujo gravitacional.	Pirólisis de caucho Foster Wheeler.
Reactor de lecho fijo	Principalmente para reacciones catalíticas, conversión de vapores de un primer reactor.	
Reactor de baño de sal o plomo	El baño actúa como un agente de transferencia de calor. Los residuos se acumulan en la parte superior de la capa, lo que requiere un cierre periódico para la limpieza.	Pirólisis de PMMA.
Reactor de lecho fluidizado	El lecho fluidizado actúa como un agente de transferencia de calor, dispersando el plástico fundido en capas delgadas. Los residuos se llevan a cabo con los productos que requieren una filtración delicada de finos (pigmentos, rellenos).	
Horno rotatorio	Unidades simples, con acción de tambaleo y flujo de gravedad. El sellado es delicado.	Proceso de pirólisis de PVC NKK.
Autoclave	Reactor para operar bajo presión, generalmente en modo batch.	La hidrogenación.

Fuente: Kaminsky, (2006)

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.

Los primeros sistemas de pirólisis del extrusor fueron desarrollados por Unión Carbide y Japan Steel Works con el propósito de degradar residuos sólidos. Están disponibles con una capacidad de más de 1 tonelada / h. En su mayoría se calientan eléctricamente o usan aceite térmico circulante, y se pueden usar en sistemas pirolíticos para alimentar plásticos, forzando la alimentación fundida, eliminando el HCl del PVC a temperaturas de hasta 400 ° C. El profesor Menges y su sucesor, el profesor Michaelis (como se mencionó en Buekens, 2006) llevaron a cabo la pirólisis en RWTH-Aachen en una extrusora calentada externamente, hasta 430 ° C, y la temperatura fue dictada al máximo por consideraciones de selección de materiales.

1.3.9.1. Reactor batch para pirólisis

Un equipo batch es un tipo de reactor caracterizado por poseer un depósito cubierto por una chaqueta calefactora y en la mayoría de los casos, por poseer un dispositivo de agitación mecánico (Acosta Mongua & Pérez Moreno 2012) & (Kaminsky 2006). Este tipo de reactores se caracteriza por no poseer flujos gaseosos inertes que vayan desplazando los volátiles desprendidos por la reacción (Basu 2013), (Lechuga 2008), debido a esto ocurren reacciones secundarias (como lo son aromatizaciones o ciclaciones) que afectan el correcto desempeño del equipo en el sentido de que se obtienen productos no deseados.

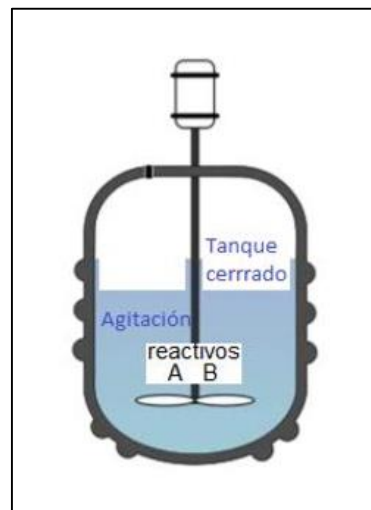


Figura 2-1: Reactor tipo Batch

Fuente: Obando, A, (2015)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

1.4. Beneficiarios Directos e Indirectos

1.4.1. Beneficiarios Directos

Los principales beneficiarios de este proyecto serán los alumnos, docentes e investigadores de la carrera de Ingeniería Química, de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

1.4.2. Beneficiarios Indirectos

Los beneficiarios indirectos serán todos los estudiantes de las diferentes carreras de la Facultad de Ciencias, docentes y grupos de investigación pertenecientes a la misma.

CAPITULO II

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1.OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el tipo de reactor a utilizar para la pirólisis o cracking térmico en función de revisión bibliográfica.
- Determinar las variables de diseño del reactor de pirólisis mediante pruebas de ensayo en el laboratorio.
- Dimensionar el reactor de pirólisis en función de las variables y la información obtenida.
- Validar el equipo mediante caracterización de los productos obtenidos en la reacción de pirólisis.

CAPITULO III

3. ESTUDIO TÉCNICO

3.1. Localización del Proyecto

El presente proyecto tecnológico fue implementado en la Provincia de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba, dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Ciencias, específicamente dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química.

Tabla 1-3: Localización geográfica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

LÍMITES ESPOCH	Norte: limita con el barrio 24 de mayo y la Av. Canónigo Ramos. Sur: limita con la Av. Pedro Vicente Maldonado y el Barrio de los Maestros. Este: limita con la Av. 11 de Noviembre. Oeste: limita con la Av. By Pass.
RANGO ALTITUDINAL	Está ubicada a 2754 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar).
CLIMA	Temperatura Promedio 15°C
Localización coordenadas Utm	17 M 758393.95 m E UTM 9817026.05 m S
Localización coordenadas geográficas	78°40'39.24" de longitud occidental y al 39°14.58" de latitud sur.

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

Realizado por: Jordán. D y Zurita. P. 2018.



Figura 1-3: Localización geográfica del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias – ESPOCH
Fuente: Adaptado de Google Earth (2018)

3.2. Ingeniería del Proyecto

Este proyecto de tipo tecnológico tiene como finalidad implementar un reactor de Pirólisis Térmica, que servirá para el estudio e investigación de todos los estudiantes de la Facultad de Ciencias, así como también al Grupo de Investigación de la carrera de Ingeniería Química de la ESPOCH.

- ✓ En primer lugar se recogió todo tipo de información referente a equipos de pirólisis térmica dentro y fuera del país, mediante investigación, revisión de publicaciones y artículos científicos que se encuentran publicados en páginas web, tesis, libros y demás material bibliográfico, etc.
- ✓ Una vez recogida toda la información necesaria, se encontró que en la Escuela Politécnica Nacional existía un equipo de las características que se requerían, además se encontró un artículo científico sobre la “OBTENCION DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE RESIDUOS PLASTICOS”, creado por Proaño y Crespo en el año 2009. En su artículo científico mencionan un procedimiento similar para el diseño y construcción de un reactor de pirólisis para lo cual se realizó el vínculo directo con las personas afines al proyecto, con el

fin de hacer una visita técnica a las instalaciones y realizar una práctica en el laboratorio de Operaciones Unitarias de dicha institución, donde disponen del reactor de pirólisis.

- ✓ Con la información recaudada y la visita técnica se procederá a establecer los criterios de construcción y ciertos parámetros que debe tener el equipo en base a modelos teóricos y comerciales en operación, una vez que las prácticas de laboratorio se realizaron con normalidad se recaudó la información necesaria, como el funcionamiento del equipo, las variables del proceso, las condiciones a las que debe trabajar.
- ✓ Una vez que el equipo se encuentre ensamblado y en perfecto estado, se procederá a realizar varias pruebas, donde nos permitan determinar las condiciones de operación y los productos obtenidos del proceso, de esta manera nos permitirá realizar una comparación con el funcionamiento del equipo inicial y así se podrá conocer las especificaciones del diseño y evaluar la eficiencia del equipo.
- ✓ La parte final del proyecto corresponde a la validación del funcionamiento del equipo de Pirólisis, la misma que se realizará en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería química de la ESPOCH, con la colaboración de los tutores del proyecto, el técnico docente y los estudiantes de la carrera, a través de prácticas de laboratorio.

3.2.1. Tipo de Estudio

El diseño y construcción de un Reactor de Pirólisis Térmica, es un proyecto de tipo tecnológico, el mismo que se ha realizado a través del método deductivo, inductivo y experimental; con el obtener como resultado un equipo que facilite la degradación térmica de los plásticos generados en la institución.

3.2.2. Métodos

✓ Método Deductivo

Una vez conocidos los problemas que presenta el Equipo de Pirólisis al momento de operación por medio de técnicas de inducción, se formuló que los problemas de funcionamiento del equipo están siendo ocasionados por la capacidad de alimentación que tiene, así mismo el tiempo que demora en subir su temperatura interna, por lo cual si se quiere aumentar el rendimiento del equipo se debe solucionar los problemas que se encontraron en el mismo, con las cuales se mejorará las condiciones de operación, para la resolución de estos problemas se utilizarán técnicas de diseño

que permitan la construcción de un equipo con los requerimientos necesarios para tener un correcto funcionamiento y de esta manera que la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo disponga y haga uso del mismo para futuras investigaciones.

✓ **Método Inductivo**

Dentro del método inductivo les permitió a los investigadores conocer sobre donde se encuentra ubicado el equipo de pirólisis, además conocer el funcionamiento y su condición actual. Mediante una visita técnica y una práctica realizada en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional en el laboratorio de Operaciones Unitarias, se pudo observar de una manera detallada los procesos y su funcionamiento que ocurrían en el equipo de Pirólisis Térmica. Dentro de esta práctica se evidencio cuáles son los principales problemas que enfrentaba al momento de la operación, con lo cual permitió establecer ciertos parámetros, para de esa manera mejorar las condiciones de operación, mejorar eficiencia y rendimiento en el equipo planteado para la construcción.

✓ **Método Experimental**

Los métodos que se utilizaron para el diseño y la construcción del equipo se basaron fundamentalmente en bibliografía y papers, dando así una alternativa para la obtención de biocombustible a partir de los plásticos reciclados, para de esta manera reducir la contaminación. Por medio de papers se pudo encontrar que la EPN, contaba con un equipo que se utilizaba para realizar el proceso de pirólisis, donde se procedió a realizar las varias pruebas para poder determinar las variables netas del proceso, además se tomaron las dimensiones del equipo para de esta manera poder replicarlo y obviamente mejorarlo en temas de rendimiento y eficiencia. Una vez obtenido estos datos se procedió a realizar el contacto debido con el constructor del equipo.

Posteriormente a ello se procedió a analizar los tipos de residuos que se generan en la institución, mediante un estudio realizado se encontró que la mayor cantidad de residuos que se generaban era papel y plástico. De estos residuos el de importancia para nuestro estudio son los residuos plásticos enfocados principalmente en polipropileno.

A partir de estos datos y enfocados a un solo tipo de plástico se procedió a realizar análisis tales como: Espectroscopia Infrarroja (FTRI), que nos ayudara a determinar la procedencia del polipropileno y en que rango se encuentra el pico resultante del análisis; también se realizaron análisis de humedad y un análisis Termogravimétrico (TGA) que nos ayudaba a determinar un

rango de temperatura de degradación del polímero y de esta manera tener como dato específico para el proceso de pirólisis una vez ya construido el equipo.

3.2.3. Determinación de Variables del proceso

3.2.3.1. Temperatura

La temperatura en el proceso de pirólisis es uno de los aspectos más importantes a considerar, ya que estará en función a los productos que se deseen obtener, teniendo en cuenta que a mayor temperatura se tendrá fracciones líquidas, mientras que a menores temperaturas se obtendrá mayor cantidad de fracción gaseosa.

3.2.3.2. Presión

La presión en el proceso de pirólisis es directamente proporcional a la temperatura es decir a mayor temperatura mayor generación de presión dentro del reactor y por ende mayor cantidad de productos.

3.2.3.3. Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia dentro del proceso está relacionado directamente con los productos que se deseen obtener, como también determina el tipo de reactor que se desee utilizar para que el proceso ocurra con normalidad y los productos que se deseen obtener.

3.2.3.4. Tipo de Plástico

El tipo de plástico en el proceso es de mucha importancia, porque de este depende mucho la clase de productos que se deseen obtener, así como también se debe tomar en cuenta los riesgos que ciertos plásticos generan al momento de la degradación térmica.

3.2.4. Cálculos de Ingeniería

3.2.4.1. Cálculos de la Potencia:

$$Q = \frac{T_{int} - T_{amb}}{\frac{1}{2\pi Y_{ex} L \cdot h \text{ aire}} + \frac{\ln \frac{Y_{ex}}{Y_{in}}}{2\pi L k \text{ acero}}}$$

Donde:

T in: Temperatura del interior del tanque (°K)

T amb: Temperatura de los alrededores (°K)

Y ex: Diámetro externo (m)

Y in: Diámetro interno (m)

L: Longitud del tanque (m)

K: Conductividad térmica

h aire: Factor de conductividad para el aire $W/m^2 \cdot ^\circ K$

$$Q = \frac{(600 + 273) - (25 + 273)}{\frac{1}{2\pi(0,049)(0,9)(10)} + \frac{\ln \frac{0,048}{0,043}}{2\pi(0,9)(16,3)}}$$

$$Q = \frac{575}{\frac{1}{5,76} + \frac{8,6 * 10^{-3}}{92,17}}$$

$$Q = \frac{575}{0,36232 + 9,32 * 10^{-5}}$$

$$Q = \frac{575}{0,36241}$$

$$Q = 1586,59 \text{ W}$$

NOTA: 1586,59 W es el calor necesario para llegar a una temperatura de 600 °C, en el proceso de pirólisis térmica.

3.2.4.2. Cálculos del Rendimiento del Reactor

$$R = \frac{S}{F} \times 100$$

Donde:

S: Cantidad de combustible producido durante el proceso (g)

F: Cantidad de materia prima utilizada durante el proceso (g)

$$R = \frac{613,2473 \text{ g}}{1200 \text{ g}} \times 100$$

$$R = 51,10\%$$

NOTA: 51,10% es el rendimiento después de efectuadas 6 pruebas de pirólisis térmica utilizando con materia prima polipropileno (PP)

3.2.5. *Análisis de Materia Prima*

- **Análisis de Humedad**

Este análisis se lo realizo con el fin de poder determinar la cantidad de agua presente en el plástico que va ser objeto de estudio, porque previamente se somete a un proceso de lavado y secado, entonces el análisis no debe ser mayor a 5% de humedad.

- **Análisis FTIR**

Este análisis se lo realizó con el fin de determinar los picos y el rango en el que se encontraba el PP para así conocer su procedencia debido a que cierto tipo de plásticos poseen algunos aditivos haciendo así que su valor varié al momento de realizar el análisis ya mencionado.

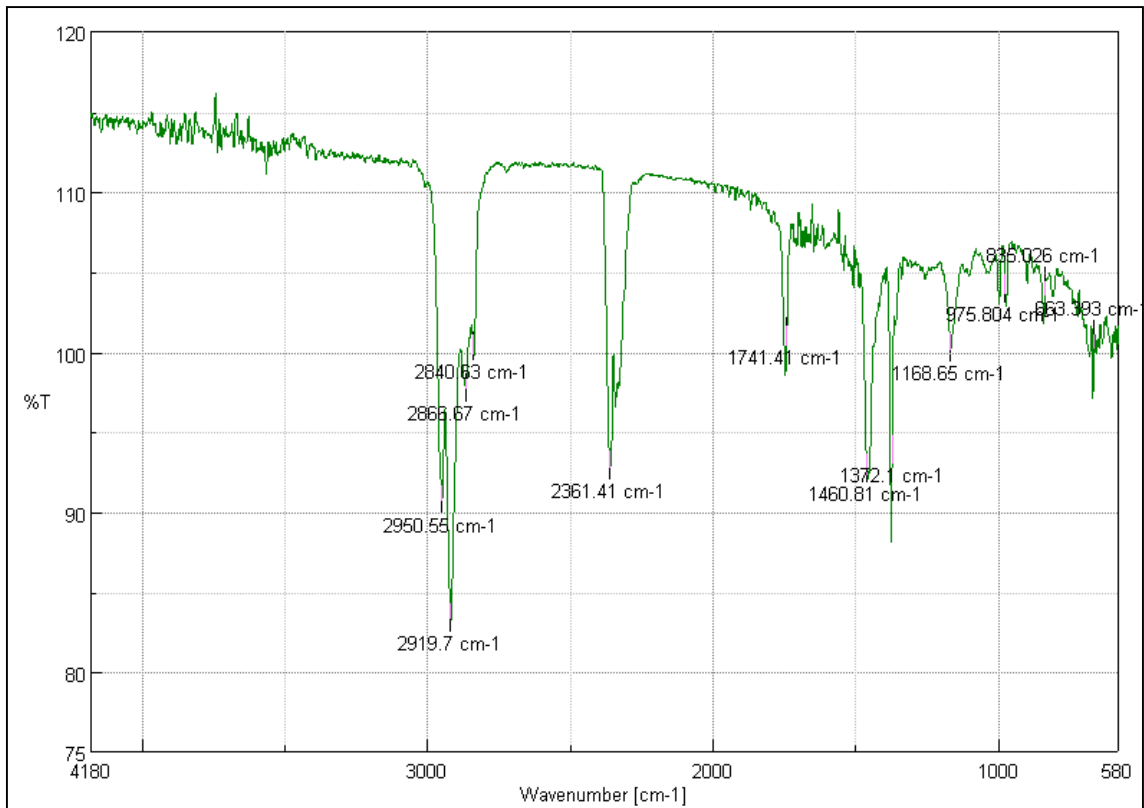


Figura 2-3: Análisis FTIR del polipropileno (1)

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Jordán y Zurita. 2018.

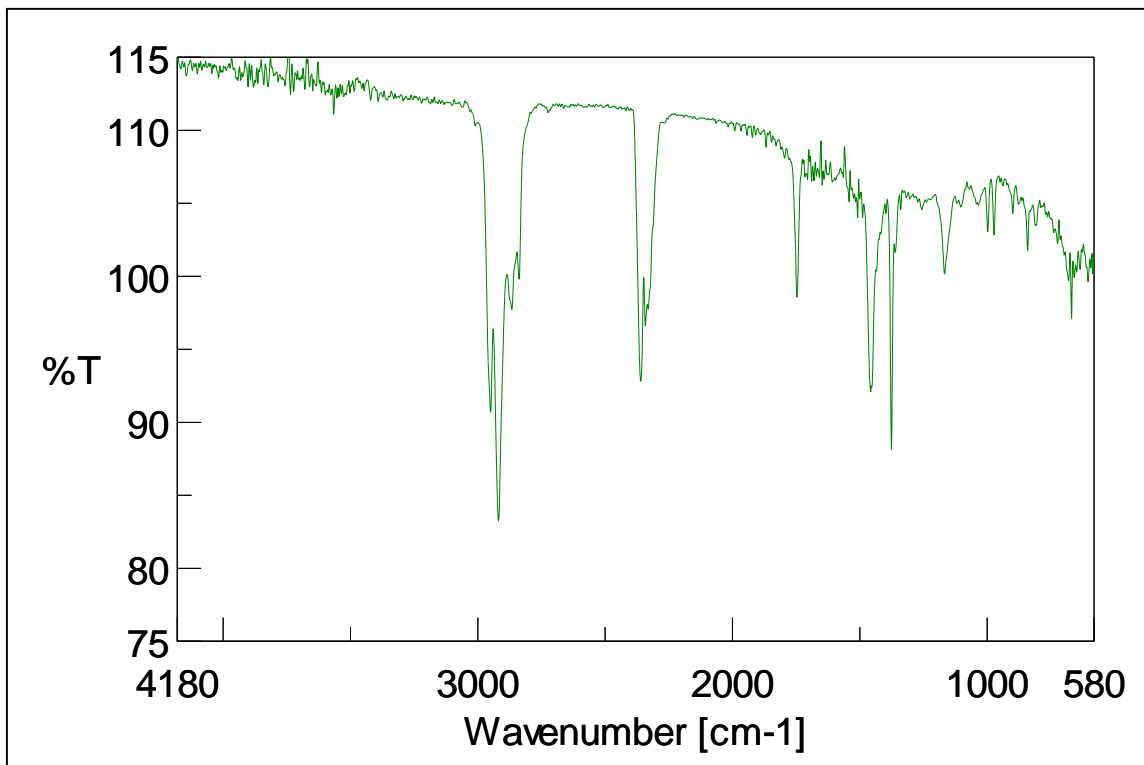


Figura 3-3: Análisis FTIR del Polipropileno (2)

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Jordán y Zurita. 2018.

- **Análisis TGA**

El análisis termogravimétrico se lo realiza para determinar un rango de temperatura a la cual la materia prima de va a degradar y de esta manera tener un valor de referencia para el proceso en situ.

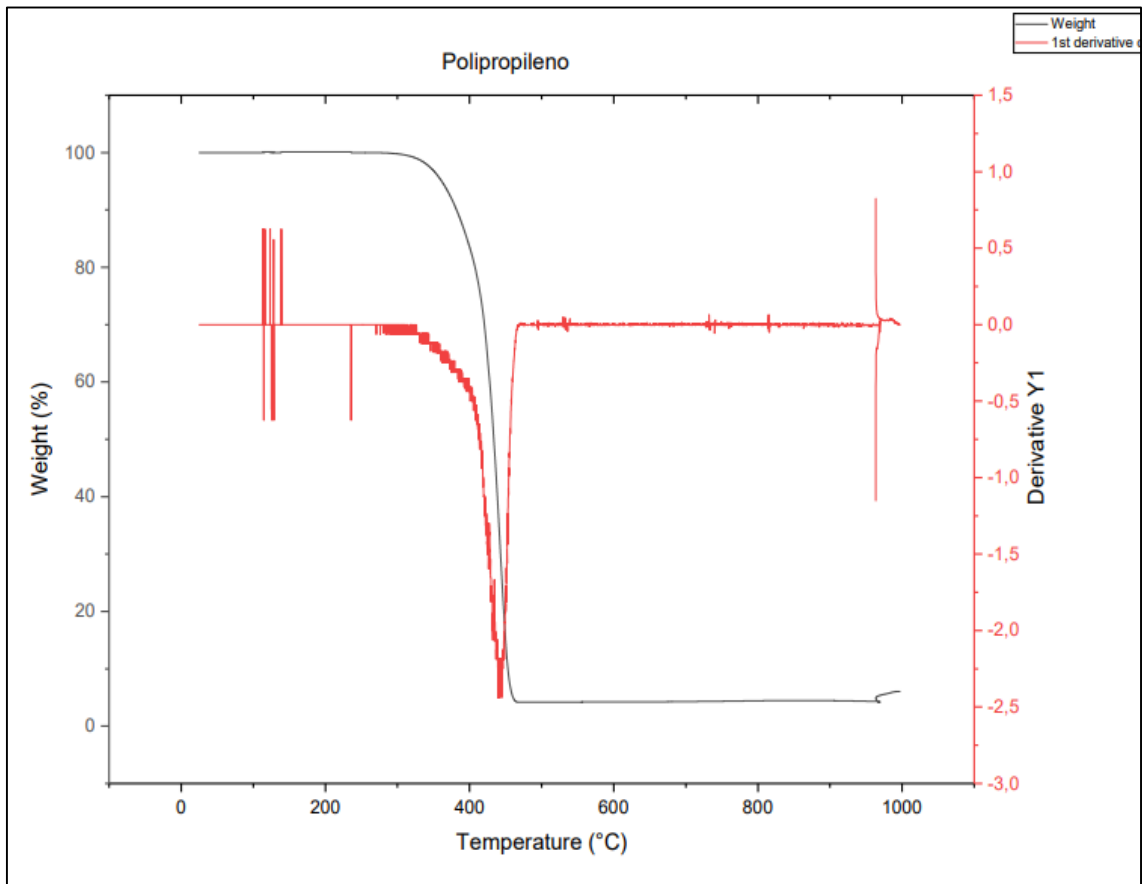


Figura 4-3: Análisis TGA del polipropileno

Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Alimentos UTA

Realizado por: Jordán y Zurita. 2018.

3.3. Proceso de Producción

3.3.1. Diseño del Reactor de Pirólisis Térmica

Los planos del reactor que detallan las partes cada una de los componentes que conforman el equipo se muestran en los ANEXOS A, B, C, D.

3.3.1.1. Tipos de resistencias eléctricas:

✓ Las resistencias flexibles de cerámica

Las resistencias flexibles de cerámica también denominadas (calentadores de banda cerámica), por sus incontables usos, son calentadores eléctricos fabricados de material térmico aislante dieléctrico en fibra cerámica. En su parte interior se cruza un circuito resistivo hecho de espirales de alambre de aleaciones especiales de alta calidad, que los hace ideales para todas las aplicaciones de calentamiento en contacto para altas temperaturas, protegidas con una coraza metálica o armadura que las protege contra los choques externos (Trec-Everwatt 2018).

Refiriéndonos a sus aplicaciones y sus temperaturas típicas de trabajo, estos calentadores de banda de cerámica son capaces de expresar su mejor potencial.

Las características de las materias primas utilizadas, así como la experiencia y el extremo cuidado de trabajo, hacen de este tipo de calentadores eléctricos de probada eficacia y fiabilidad. La fibra de cerámica aislante de espesor 1 / 4 “, se unió al hilo de resistencia en aleaciones de acero de alta calidad puede soportar altas temperaturas proporciona una eficiente transferencia de calor y un ahorro energético del 25% en comparación con los calentadores similar sin aislamiento térmico (Trec-Everwatt 2018).

Obteniéndose en varios tamaños, estas resistencias completamente rodean el diámetro de la superficie del cilindro que contiene el material a calentar, colocado en contacto directo con su superficie, lo que proporciona una especie de calefacción radiante en el cuerpo a calentar, gracias a un intercambio de calor óptima y de alta densidad de superficie (W/cm²).

En la siguiente figura se muestra el ahorro de energía de alrededor del 20% obtenido cuando se utiliza una banda de calentadores de cerámica que con aislamiento de mica. Este resultado es el resultado de una prueba de laboratorio después de 24 horas de trabajo continuo.



Figura 5-3: Resistencias eléctricas flexibles de cerámica

Fuente: TREC-EVERWATT, (2018)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

Ventajas:

Incrementadas temperaturas y menos tiempo para llegar al rango de temperatura requerido, debido al hecho de que trabajan en contacto directo con la superficie a calentar. Para determinar los requisitos específicos también es factible crear múltiples del circuito de distribución, o también la potencia total requerida a bordo barril se divide entre varios calentadores conectados entre sí.

- Muy robusto
- La diferenciación de temperatura / potencia en la superficie.
- Un buen aislamiento térmico
- Prácticas de montaje / instalación con ganchos y resortes.
- La integración de sensores de temperatura
- Fácil limpieza y mantenimiento

Usos:

- Las reglas para la aplicación de una banda de resistencia están en función del tipo de los medios de comunicación y la temperatura que será la sede que va a perdurar.

Las aplicaciones más comunes de este calentador son:

- Extrusoras de plástico y de fusión, las boquillas de inyección de plástico, fundición de boquilla.
- Tambores de almacenamiento, tuberías, calderas de agua caliente.
- Esterilizadores, máquinas para la industria de la confitería, máquinas de procesamiento de la madera, máquinas de embalaje y envasado para la industria textil.
- Muere el botón y moldes para la transformación del caucho.
- Proteger de la congelación de los líquidos.
- Disolución de los sólidos con bajo punto de fusión tales como parafina, resinas diversas y chocolate.
- El control de la viscosidad de los fluidos de pintura y / o alimentos (jarabes y miel).

Especificaciones Técnicas:

Voltaje: 230 V (estándar) o 120 V hasta 600 V (no estándar)

Potencia: 500 a 5000W

Densidad superficial: máx. 6W/cm²

Armadura de cromo y acero inoxidable resistente a la corrosión

Temperatura: máx. 800-830 ° C

Montaje: Todos los modelos se suministran con resortes y ganchos para una fácil instalación en los árboles resistentes.

Energía: Todos los modelos se suministran con los cables de alimentación con una longitud estándar de silicona (3 x 1 L = 1.5 metros), con tapón de cables eléctricos, o en función de las necesidades de aplicaciones específicas.

Dispositivos de Control de Temperatura: A solicitud, los calentadores de banda de cerámica se suministra completo con dispositivos integrados de control de temperatura son compatibles para la instalación de la batería / barriles de acero o de material plástico, tal como fija el termostato termostato bimetálico limitador, termostato fijo e integrado limitador de temperatura, termostato regulable de 0 a 180 ° C o termopares o PT100 (Trec-Everwatt 2018).

✓ **Calentadores de banda con aislamiento mineral**

Características generales:

Este tipo de calentadores eléctricos de banda en aislamiento mineral, son los calentadores que ofrecen un alto rendimiento técnico y la densidad, permite que el mantenimiento de aplicaciones de alta temperatura de superficie realmente notable, gracias a los minerales únicos térmicos que permite un aislamiento térmico óptimo en comparación con los calentadores de banda tradicional (mica o cerámica).

Las nuevas técnicas de producción han permitido que estos calentadores de banda aislados en óxido mineral ofrezcan un aislamiento térmico superior, es decir un aislamiento térmico de aluminio muy delgado que proporciona excelente transferencia de calor entre el cable de resistencia y la superficie interior de la carcasa del calentador, así como la reducción de una temperatura de la superficie generalizada en el cable de resistencia y la consiguiente prolongación de la vida útil del calentador mismo (Trec-Everwatt 2018).



Figura 6-3: Resistencias eléctricas de banda con aislamiento mineral

Fuente: TREC-EVERWATT, (2018)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

El tipo de calentadores eléctricos en la banda de aislamiento mineral brinda ventajas al usuario importante en su uso, incluyendo:

- Estos calentadores pueden armonizar distintos tipos de resinas especiales como el P.T.F.E. (Politetrafluoroetilene).
- Sin acoger los mismos sistemas engorrosos apego de los calentadores de banda tradicional, aseguran la instalación fácil.
- Consienten alcanzar la temperatura de trabajo es necesario en un tiempo muy pequeño en balance con los calentadores de banda tradicional, digno a la alta temperatura y la densidad superficial de alta.

Especificaciones:

- Densidad superficial de alta: $35,6 \text{ W / cm}^2$ de calentadores ya han alcanzado un diámetro pequeño.
- Las temperaturas máximas de aplicación de hasta 760° C
- Suministro de tensión de hasta 240V
- Al aire libre armadura de acero inoxidable
- Alta transferencia de calor en los calentadores de tamaño limitado

Usos:

- Equipos de extrusión, equipos de plástico e inyección de plástico
- Otras aplicaciones que requieren de calentamiento de forma cilíndrica

✓ **Resistencias Tipo Cartuchos**

Son calentadores que conectan ajustados dentro de una cavidad redonda y calienta la pieza hasta alcanzar la temperatura deseada. Entre más ajuste el cartucho en el agujero, mejor. Un mal ajuste, equivale a transferencias de calor pobres y una vida más corta de su resistencia. Las resistencias tipo cartucho están diseñadas para resistir temperaturas de hasta 400, 650 y hasta 870 ° C (según el tipo de cartucho que seleccione). Pueden ser trazadas a cualquier medida con cualquier unidad de zona fría.

Por su transcurso de compactación, la cuidadosa selección de núcleos cerámicos y óxido de magnesio de relleno, el alambre resistivo de cromo níquel, tubos de acero inoxidable, y los procesos de producción controlados, estos cartuchos poseen el rendimiento y la durabilidad que exceden a los de otros cartuchos (Kintel 2017).

✓ **Industrias y Aplicaciones**

Las resistencias tipo cartucho pueden ser manejadas en una amplia diversidad de aplicaciones:

- Irrigación de plástico
- En el calentamiento de moldes
- Equipos de envasado
- Selladoras
- Placas de calentamiento
- Termoformado
- Impreso en caliente
- Pistolas de pegamento y ollas de cera
- Maquinaria de calzado
- El calentamiento de gases y líquidos

✓ **Construcción:**

De baja y media densidad

El proyecto del calentador consiste en la bobina hecha de alambre de níquel-cromo, uniformemente estirada y colocada en el interior de unos agujeros en un aislante de cerámica redondo. Esto se implanta en una cubierta de acero inoxidable. Proporcionando la mejor combinación de fuerza física y resistencia a la oxidación de calor. El tamaño de grano de óxido

de magnesio de alta pureza es especialmente seleccionado y se utiliza para llenar todo el espacio restante en el interior del aislador de cerámica para aumentar la conductividad térmica, resistencia dieléctrica y proporcionar una vida más larga de su resistencia (Kintel 2017).

De alta densidad

Un alambre Níquel-Cromo, embobinado idénticamente sobre un alma de Óxido de Magnesio de Alta Pureza seleccionado para una máxima rigidez dieléctrica y conductividad térmica para la máxima transferencia de calor. Esto dentro de un forro de acero inoxidable 304 para la evitar la oxidación en una amplia variedad de entornos. También están disponibles en Acero inoxidable 316 e Incoloro y según su aplicación. Tienen una culminación de casquillo de cerámica de alto Impacto lo cual retarda la contaminación y es adecuado para altas vibraciones. Cuentan con cables conductores de Alta Temperatura para soportar temperaturas de hasta 550 °C y los agujeros profundos en el casquillo evitan el deshilachado de las terminales de cable cuando estas se doblan.

Características y Beneficios

- Especificaciones diseñadas para su cartucho.
- Cobertura de acero inoxidable para la resistencia a la oxidación.
- Su esquema permite un calentamiento más rápido y una vida más larga
- Óxido de magnesio de alta pureza de grano fino (MgO) colma los espacios vacíos alrededor del alambre de resistencia para mejorar la transferencia de calor, resistencia dieléctrica y la vida del calentador.

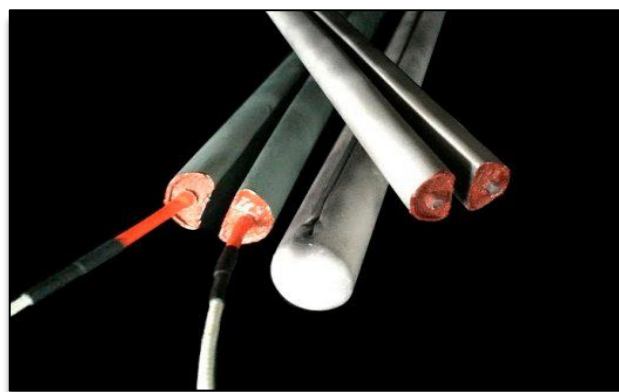


Figura 7-3: Resistencias eléctricas tipo cartuchos

Fuente: KINTEL, (2017)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

✓ **Bipartidas**

Las resistencias tubulares bipartidas, son la mejor opción para sustituir a los cartuchos de longitudes largas o bien donde estén orificios fuera de tolerancia dimensional ocasionado por el desgaste.

El modelo de las resistencias bipartidas, admite la transmisión del calor de manera independiente en cada mitad de las paredes hacia la porción exterior de la resistencia, y esto nos da como resultado una transferencia de calor hacia la pared del orificio más uniforme, mejorando con mucho lo que puede dar un cartucho convencional.

Las resistencias bipartidas son esencialmente una resistencia tubular doblada en forma de “U” y por lo tanto su elaboración permite hacerlas con una mayor densidad. Ya que entre más densa y uniforme sea su compactación, mayor será su transferencia de calor hacia la funda de la resistencia bipartida.

Tipo de resistencias escogidas para el presente proyecto

- Para el presente proyecto se escogió el tipo de resistencias eléctricas de banda cerámica, puesto que están probadas para funcionar 24 horas seguidas en laboratorio y además son las que presentaban el rango de temperatura máxima que necesitábamos en el proceso de pirólisis 800-830 ° C.

3.3.1.2. Tipos de manómetros

La gran diversidad de manómetros existentes en el mercado, se ha producido por sus innumerables aplicaciones en la industria. Sin embargo el prototipo más utilizado es el manómetro de Bourdon y sus variables, no obstante es necesario tener presente el intervalo de presiones en el que se trabaja y la exactitud que se requiera.

- **Manómetro Bourdon:** El principio de medida en el que se fundamenta este instrumento es el sensor conocido como tubo Bourdon. El sistema de medida está formado por un tubo aplanado de bronce o acero, cerrado, en forma de “C” de $\frac{3}{4}$ de circunferencia para la medición de bajas presiones, o enrollado en forma de espiral para la control de bajas presiones y que tiende a enderezarse proporcionalmente al aumento de la presión; este movimiento se transmite mediante un elemento transmisor y multiplicador que mueve la aguja indicadora sobre una escala graduada. La representación, el material y el espesor de las paredes dependen

de la presión que se quiera medir. El acumulado de medida está hecho por un tubo Bourdon soldado a un record de conexión, Por lo general este conjunto es de latón, pero en el caso de altas presiones y también cuando hay que medir presiones de fluidos corrosivos se hacen de aceros especiales. La exactitud de este tipo de manómetros depende en gran parte del tubo, por esa razón sólo deben emplearse tubos fabricados con las normas más estrictas y envejecidas cuidadosamente por los fabricantes (MEI 2015). El elemento de transmisión incorpora una biela para su ajuste. La norma aplicable para los manómetros Bourdon es la UNE-EN 837-1.

La acumulación y transporte del aparato deberá realizarse con el normal cuidado al tratarse de elementos muy sensibles a los golpes y vibraciones. Los manómetros industriales logran dividirse según distintas características:

Por su diámetro: es decir por el tamaño de la esfera en la que logra leerse la indicación de la presión para la que está diseñado el aparato. Los más corrientes son los siguientes diámetros nominales en mm son.: 40, 50, 63, 80, 100,160 y 250 mm. Los diámetros 40 y 50 mm. Son regularmente utilizados en conducciones para presiones comprendidas entre 2,5 bar y 60 bar, y en modelos muy económicos con conexiones en latón, cajas protectoras en ABS y precisiones del 2,5%, aunque es posible su fabricación en otros rangos de presión, materiales y precisiones. Industrias típicas que utilizan estos manómetros son: reguladores de presión, neumática, industria contra incendios, etc. El diámetro 63 mm. Es usual en la industria para conexiones de $\frac{1}{4}$, y el diámetro 100 para conexiones de $\frac{1}{2}$. Es normal su utilización en todos los materiales dependiendo de la aplicación a cubrir, desde aparatos en caja de ABS o acero, incluso manómetros fabricados íntegramente en acero inoxidable, pasando por los manómetros llenos de glicerina con conexiones en latón y caja protectora en acero inoxidable. Los diámetros 160 y 250 mm. Son habitualmente utilizados para aplicaciones de laboratorio y lo más común es que se fabriquen en acero inoxidable y/o en precisiones elevadas (0,5%, 0,25%,...etc.).

Por su elemento sensible: es decir por el componente mecánico elástico utilizado como elemento que genere la deformación proporcional a la presión. Corrientemente la elección de ese componente está en función del rango de presión a medir Cápsula o membrana para presiones comprendidas entre 5 mbar y 600 mbar (MEI 2015).

Fuelle: hecho por un fuelle metálico con o sin resorte, y utilizado para medir presiones relativamente bajas (hasta 7 bares) y presiones absolutas.

- ✓ **Tubo bourdon** para presiones comprendidas entre 1 bar y 60 bares.
- ✓ **Tubo helicoidal** para presiones superiores o iguales a 100 bares.

- ✓ **Por los materiales utilizados en su fabricación:** Sistema de medida en latón y el resto en los materiales más baratos posibles tales como ABS o acero Mixtos con sistemas de medida en latón y cajas protectoras en acero inoxidable, habitualmente utilizados llenos de glicerina para amortiguar las vibraciones mecánicas Inoxidable: con sistemas en Inoxidable AISI 316 y cajas protectoras en acero inoxidable llenas o no de líquido amortiguador (glicerina) cuando los manómetros llevan contactos eléctricos suele utilizarse como líquido amortiguador la silicona que no es conductiva. Por si llevan líquido amortiguante: en este caso se diferencia entre manómetros secos (sin líquido amortiguante) y manómetros con glicerina.



Figura 8-3: Manómetro tipo bourdon

Fuente: MEI, (2015)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

- **Manómetros de columna líquida:** Este ejemplo de manómetros es la forma más sencilla de dispositivo para medir presiones, donde la altura, carga o diferencia de nivel, a la que se eleva un fluido en un tubo vertical abierto conectado a un aparato que contiene un líquido, es una medida directa de la presión en el punto de unión y se utiliza con frecuencia para Mostar el nivel de líquidos en tanques o recipientes. Puede utilizarse el mismo principio con indicadores de tubo en U, en el cual, conocida la densidad del líquido empleado en él, la carga o altura constituye una medida de la presión relacionándola con la correspondiente a la atmosférica. La figura 1a muestra el manómetro fundamental de tubo en U. Otro dispositivo equivalente (figura 1b), cuando es necesario (como en el caso de la presión de un gas) que la presión se mida por la altura o carga de algún fluido distinto de aquel cuya presión se busca (MEI 2015). La totalidad de estos manómetros logran ser utilizados como manómetros abiertos o como manómetros diferenciales, cuando indican la diferencia entre dos presiones diferentes de la atmosférica. El fluido manométrico que forma la columna líquida en estos indicadores puede ser cualquier líquido que no se mezcle con el fluido a presión. Para altos vacíos o presiones elevadas y grandes diferencias de presión el líquido del medidor debe ser de una gran densidad por esto casi siempre se utiliza como fluido manométrico el mercurio y para las bajas presiones líquidos de menor densidad como el agua, alcohol, kerosén, etc. Los

manómetros abiertos dan lecturas en altura, cm. de mercurio o altura de fluido manométrico, luego para el cálculo de la presión manométrica del fluido de proceso (punto A de la figura 1a) se recurre a fórmulas como la siguiente:

$$da = \frac{(Hmdm - Kdm) * g}{gc}$$

Donde:

da: es la densidad del fluido A

dm: es la densidad del mercurio

K: es la distancia entre el fluido manométrico y el fluido cuya presión se quiere averiguar.

g: es la aceleración local debida a la gravedad

gc: es una constante adimensional

Dentro de los manómetros diferenciales tenemos el tubo en U diferencial, el cual mide la diferencia de presiones entre los orificios de toma A y B en altura de fluido manométrico, luego la diferencia de presión se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$da - db = \frac{(Hm(dm - da) + Kada - Kbdb) * g}{gc}$$

Donde:

Ka, kb: son las distancias verticales de la superficie del fluido manométrico por encima de A y B respectivamente.

da, db :son las densidades de los fluidos en A y B.

Otro tipo, es el tubo en U diferencial invertido, en el que el fluido que llena el tubo en U puede ser un gas o un fluido ligero, y el cual es repetidamente usado para medir diferencia de presiones en líquidos cuando las columnas abiertas líquidas son asombrosamente elevadas, o cuando el líquido a presión no puede exponerse a la atmósfera.

Por último están los manómetros de columna líquida que miden directamente la presión absoluta del fluido, siempre que el espacio encima del mercurio sea el “vacío total o el vacío perfecto”, luego en una medida con referencia a una presión nula, como los tubos en U cerrados o el barómetro de mercurio que registra directamente la presión absoluta de la atmósfera en función de la altura de la columna de mercurio. La presión barométrica normal es 760 mm Hg a 0°C (equivalente a 14,7 lb/pulg² o a 1 atm) (MEI 2015).

Cuando la presión se mida en términos de una altura de columna de líquido, que no sea de mercurio o de agua (para los cuales ya se conoce el valor de la presión estándar o normal) es fácil convertir la altura de un líquido a otro por medio de las siguientes expresiones:

$$p = \frac{dgh}{gc}$$

Dónde:

d = densidad del líquido

h = altura de la columna

Obteniendo la relación de esta expresión para dos sustancias diferentes se tendrá la relación entre las alturas de las dos columnas de líquido.

Altura fluido 1/ altura fluido 2 = densidad fluido 2 / densidad fluido 1.

Tipo de manómetro escogido para el presente proyecto.

- Para el presente proyecto se utilizó un manómetro tipo Bourdon, el principio de medida en el que se basa este instrumento es el sensor conocido como tubo Bourdon. El sistema de medida está formado por un tubo aplanado de bronce o acero, cerrado, en forma de “C” de $\frac{3}{4}$ de circunferencia para la medición de bajas presiones, o enrollado en forma de espiral para la medición de bajas presiones y que tiende a enderezarse proporcionalmente al aumento de la presión; este movimiento se transmite mediante un elemento transmisor y multiplicador que mueve la aguja indicadora sobre una escala graduada.

3.3.1.3. Clasificación de los aceros inoxidables

El acero inoxidable logra ser clasificado en cinco familias diferentes; cuatro de ellas pertenecen a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita y dúplex (austenita mas ferrita); mientras que la quinta son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina (Bonnet 2013).

- **Aceros inoxidables martensíticos:**

Son la primera rama de los aceros inoxidables simplemente al cromo. Figuran una porción de la serie 400, sus características son: Moderada resistencia a la corrosión endurecibles por tratamiento térmico y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza Son magnéticos Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad Los martensíticos son básicamente aleaciones de cromo y carbono. El contenido de cromo es generalmente de 10.5 a 18% y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2%.

- **Ferríticos**

Estos aceros inoxidables de la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute) conservan una estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, sus características son:

- ✓ Aguante a la corrosión de moderada a buena, la cual se aumenta con el contenido de cromo y algunas aleaciones de molibdeno
- ✓ Endurecidos moderadamente por trabajo en frío: no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico
- ✓ Son magnéticos
- ✓ Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados
- ✓ Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión
- ✓ Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío

Los ferríticos son fundamentalmente aleaciones con cromo. El contenido de cromo es usualmente de 10.5 a 30%, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08%. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características (Bonnet 2013).

- **Aceros inoxidables austeníticos** Los aceros inoxidables austeníticos forman la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series 200 y 300 AISI. Su popularidad

se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Sus características son las siguientes:

- ✓ Excelente resistencia a la corrosión.
- ✓ Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico.
- ✓ Excelente soldabilidad Excelente factor de higiene y limpieza.
- ✓ Formado sencillo y de fácil transformación.
- ✓ Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas Son no magnéticos.



Figura 9-3: Aceros inoxidables austeníticos

Fuente: BONNET, (2013)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

Los Auténticos se obtienen adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno. El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26% y su contenido de carbono es del rango de 0.03 al 0.08%. El cromo suministra una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas de 650° C en una variedad de ambientes. Esta familia se divide en dos categorías:

- ✓ **SERIE 300 AISI.-** Aleaciones cromo-níquel
- ✓ **SERIE 200 AISI.-** Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno
- ✓ **SERIE 300 AISI.-** Es la más extensa, mantiene alto contenido de níquel y hasta 2% de manganeso. Asimismo puede contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son adicionados para conferir ciertas características. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados.
- ✓ **SERIE 200 AISI.-** Contiene menor cantidad de níquel. El contenido de manganeso es de 5 a 20%. La adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

- **Aceros inoxidables dúplex.**-Son aleaciones cromo-níquel-molibdeno, sus características son las siguientes:

- ✓ Son magnéticos
- ✓ No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos
- ✓ Buena soldabilidad
- ✓ La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

Los dúplex tienen un contenido de cromo de entre 18 y 26% y de níquel de 4.5 a 6.5%. La adición de elementos de nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno imparten ciertas características de resistencia a la corrosión (Bonnet 2013).

- **Aceros inoxidables endurecibles por precipitación.**

Esta rama ofrece una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desea asociar elevadas particularidades mecánicas y de maquinabilidad. Son aleaciones hierro-cromo-níquel que se caracterizan por la resistencia mecánica obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento. Los aceros endurecibles por precipitación están patentados y continuamente se les designa con las siglas de la empresa productora (Bonnet 2013).

Tipo de acero inoxidable escogido para el presente proyecto.

- En el presente proyecto se utilizó acero inoxidable austenítico 309.- Poseen alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación en temperaturas de hasta 1000° C. Calentadores de aire, equipo químico de proceso, partes de quemadores de turbinas de gas e intercambiadores de calor son algunas de las aplicaciones más comunes fabricadas con este tipo de acero.

3.3.1.4. Tipos de aislantes

- **Espuma de poliuretano**

Este material está combinado a base de petróleo y azúcar dando lugar a una espuma rígida y ligera que presenta una baja conductividad térmica. Se define por la gran adherencia que tiene sobre diferentes tipos de superficies, además de la escasa absorción de humedad. Otra ventaja es que es

de fácil aplicación, pues se puede utilizar para rellenar cámaras y huecos con pistola (Blatem 2011).

- **Poliestireno expandido**

Se trata de un material de origen sintético que se caracteriza por ser muy versátil, por lo que es muy empleado en construcción. También es conocido como porexpan o corcho blanco y se maneja tanto para el aislamiento térmico como para aligerar densidades en construcciones.



Figura 10-3: Aislante tipo poliestireno expandido

Fuente: BLATEM, (2011)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

- **Poliestireno extruido**

El poliestireno extruido es muy equivalente al expandido pero tiene otras propiedades. La principal es que puede mojarse, por lo que se emplea sobre todo en la impermeabilización de cubiertas. Además presenta una gran resistencia al hielo y deshielo, así como una gran resistencia mecánica. Se puede manipular como material aislante en techos, cubiertas, muros enterrados, tabiquería, etc. (Blatem 2011).

- **Lana de vidrio**

Se trata de un producto de origen natural y mineral que está compuesto por filamentos de vidrio aglutinados mediante resina. El proceso mediante el cual se obtiene es similar al de la lana de roca y presenta una gran resistencia a la humedad, además de poseer propiedades ignífugas. La lana de vidrio se puede encontrar tanto en forma de paneles como de mantas (Blatem 2011).

- **Lana de roca**

Los paneles de lana de roca son uno de los tipos de aislantes térmicos más empleados en edificación por su alto rendimiento. Están compuestos en su mayoría por roca de origen volcánico

y un poco de ligante orgánico. Los paneles de lana de roca no son inflamables, a diferencia del poliestireno extruido y expandido. Además, también es un muy buen aislante acústico por la disposición multidireccional de sus fibras (Blatem 2011).



Figura 11-3: Aislante tipo lana de roca

Fuente: BLATEM, (2011)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

- **Fibra de cerámica.**

Fibra hecha fundamentalmente para resistir elevadas temperaturas (hasta 1260° C según el material de refuerzo), las fibras cerámicas presentan propiedades excelentes de peso ligero, conductividad térmica baja y estabilidad química resistiendo el ataque de la mayoría de agentes corrosivos.



Figura 12-3: Aislante tipo Fibra de Cerámica

Fuente: BLATEM, (2011)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

Las telas cerámicas son ampliamente usadas en industria de insolación térmica como aislador. Además pueden ser tejidas con refuerzos de fibra de vidrio, refuerzo alambrado de aluminio o acero.

Aplicaciones:

- Revestimiento de hornos industriales.
- Aislamiento de calderas.
- Enfriamiento controlado.
- Calefacción de hornos de vidrio.
- Estanquidad de puertas de hornos.
- Aislamiento de los conductos de gases en tuberías.
- Pantallas térmicas en la industria del automóvil.
- Protección contra incendios.
- Piezas cortadas para la industria del electrodoméstico.
- Aislamiento para el destensionado de soldaduras.
- Filtración a alta temperatura.
- Aislamiento de las turbinas de gas o a vapor.

Tipo de aislante térmico escogido para el presente proyecto.

- Para el presente proyecto se utilizó fibra de cerámica para recubrir la parte superior del reactor, ya que este tipo de Fibra está hecha especialmente para resistir altísimas temperaturas (hasta 1260° C según el material de refuerzo), las fibras cerámicas presentan propiedades excelentes de peso ligero, conductividad termal baja y estabilidad química resistiendo el ataque de la mayoría de agentes corrosivos.

3.3.1.5. Tipos de ventiladores

• Ventiladores centrífugos: tipos y características

Los ventiladores centrífugos son los ventiladores en los que el aire es inducido por una turbina o rodete que lo aspira por el centro y lo expulsa a través de sus álabes o palas. Así pues el aire ingresa al rodete de forma paralela a su eje y sale en dirección perpendicular al mismo, es decir en la dirección de un radio, de ahí que en muchos países se les llame también ventiladores radiales. De la propia definición se deduce que el conducto de aspiración y el de descarga deberán estar a 90°, lo cual no es muy adecuado cuando el ventilador centrífugo debe de instalarse en conducciones en línea, en algunas ocasiones se puede aprovechar esta característica colocando el ventilador en el punto en el que se requiera un cambio de dirección de 90° en las conducciones (nos ahorramos un codo). Bien es cierto que los fabricantes trazan ventiladores centrífugos “in

line” en los que el aire sale en la misma dirección que entra, para ello acoplan al ventilador los elementos necesarios para re direccionar el aire de salida alineándolo con el de entrada (Serna 2010).



Figura 13-3: Ventilador de tipo centrífugo

Fuente: DEPOSITPHOTOS, (2016)

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

- **Tipos de ventiladores centrífugos**

Como el tipo de turbina o rodete que empleen, distinguiremos tres tipos de ventiladores centrífugos: de pala radial, de álabe adelantado (forward) y de pala atrasada (backward). Una particularidad común a todos los tipos de centrífugos es que, para un dimensionamiento parecido y unas mismas rpms, dan más presión que los axiales (Serna 2010).

- **Centrífugos con rodete de pala radial**

En estos centrífugos las palas del rodete son rectas y alineadas según un radio, son el tipo menos usado de centrífugos debido a unas pobres prestaciones en métodos de eficiencia y ruido, sin embargo son muy provechosos para el traslado de materiales granulares o pulverulentos porque los álabes, al ser rectos no retienen esos tipos de materiales y permanecen limpios (Serna 2010).

- **Centrífugos con rodete de álabe adelantado**

Los rodetes de estos ventiladores disponen de muchos álabes de pequeña dimensión (anchura), su forma suele ser del tipo de “media caña”. También se les conoce como del tipo “jaula de ardilla”. Dan más caudal y menos presión que los del tipo pala atrasada y su eficiencia en términos de consumo energético tampoco es tan buena. Son muy utilizados en ventiladores de tamaño pequeño y medio (hasta potencias de motor de 3-5 kw) especialmente en usos residenciales y comerciales donde el ruido sea un factor a tener en cuenta, en efecto, estos ventiladores al disponer de muchos álabes producen relativamente poco ruido siendo éste multi frecuencia, lo

cual es una característica favorable porque es mucho mejor tolerado por el oído humano al no presentar “tonos puros” que son los más molestos (Serna 2010).

- **Centrífugos con rodete de pala atrasada (backward)**

Los rodetes de estos ventiladores sitúan de pocas palas curvadas en el sentido opuesto al giro del rodete, de ahí el nombre de atrasadas.

Por oposición a los de pala adelantada, ya han quedado reflejadas las principales características de estos rodetes. Son el tipo más usado de los centrífugos, se puede decir que usualmente es el único tipo de rodete que se usa en potencias grandes dada la alta eficiencia que llegan a conseguir.

Tipo de ventilador escogido para el presente proyecto.

- Para el presente proyecto se utilizó como sistema de ventilación los ventiladores Centrífugos con rodete de álabe adelantado (forward) Los rodetes de estos ventiladores disponen de muchos álabes de pequeña dimensión (anchura), su forma suele ser del tipo de “media caña”. También se les conoce como del tipo “jaula de ardilla”. Dan más caudal y menos presión que los del tipo pala atrasada y su eficiencia en términos de consumo energético tampoco es tan buena. Son muy utilizados en ventiladores de tamaño pequeño y medio (hasta potencias de motor de 3-5 kW) (Serna 2010).

3.3.1.6. Tapa del Reactor Escogida Para el Presente Proyecto.

La tapa que se utilizó en el reactor presenta un sistema de bridas que impide que existan fugas durante el proceso, más o menos se asemeja a una olla de presión en donde se mantiene la temperatura interna y se libera la presión por un sistema de tubería que consta de 3 salidas, de esta forma al mismo tiempo que se libera el producto generado en el interior del reactor, también presenta la válvula por donde se purga con nitrógeno el interior del reactor, de esta manera se crea una atmosfera neutra sin presencia de oxígeno. Por ultimo también presenta una salida para la válvula de emergencia que se activa una vez que se alcanza una presión interna de 120 psi.

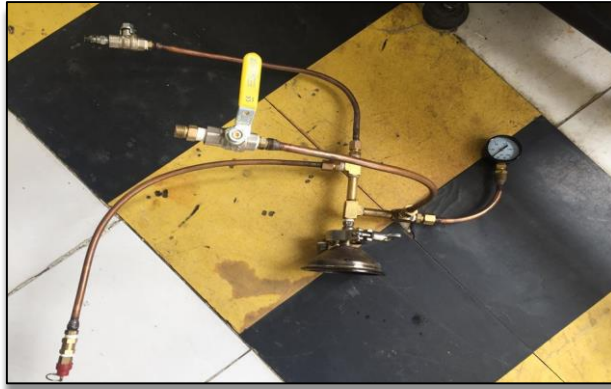


Figura 14-3: Tapa del reactor de pirólisis
Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

3.3.2. *Instrucciones para el uso del Reactor de Pirólisis*

Antes de que el equipo funcione se debe tener en cuenta que se encuentre correctamente instalado, para ello se debe tomar ciertos aspectos importantes:

- El equipo debe estar sobre una superficie plana.
- La conexión eléctrica debe estar cerca del equipo y debe ser de 220 V.
- Tener en cuenta que el sensor de temperatura se encuentre en la correcta posición y que el tubo donde se lo coloca este totalmente cerrado.
- Asegurarse que al momento de encender el equipo los ventiladores estén en correcto funcionamiento.
- Verificar que no exista ningún objeto extraño dentro del reactor.
- La manguera para la salida de vapor deberá ser una que trabaje a altas presiones y temperaturas, además debe tener abrazaderas para mayor seguridad.
- Las resistencias soportan una temperatura que no supere los 700°C.
- Para el correcto funcionamiento del equipo se debe proceder a cetar la temperatura de 50 en 50 °C, de esta manera no se excederá las temperaturas y se obtendrá un mejor producto.

3.3.3. Procedimiento para la utilización del Reactor

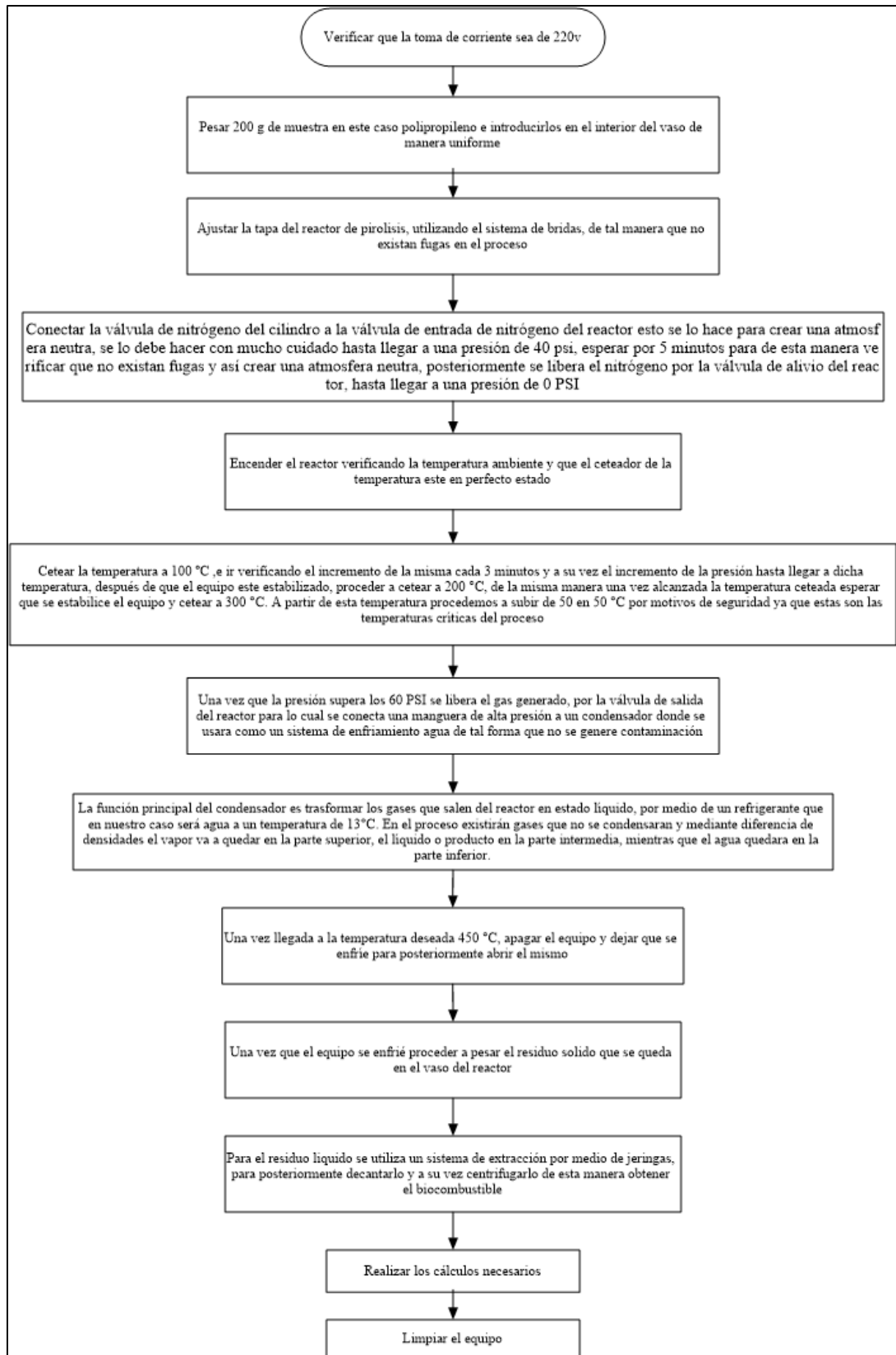


Figura 15-3: Diagrama de flujo del proceso de pirólisis
Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018

3.3.4. Validación del Equipo

Una vez realizado los análisis de la materia prima a ser uso de estudio se determinó mediante el análisis TGA que el polipropileno se degradaba en un rango de temperatura entre los 350 a 450 °C, mismos que se utilizaran como punto de partida del proceso, es decir este rango de temperaturas se considerarán como temperaturas críticas, donde se obtendrán mayor cantidad de líquidos esto es en base a revisión bibliográfica.

Para los análisis de los productos obtenidos se consideraron variables tales como el tiempo de residencia, la presión y la temperatura con respecto al tiempo; las cuales se muestran a continuación:

Tabla 2-3: Análisis de los productos obtenidos del proceso de pirólisis

Prueba	Peso Obtenido (gr)	% de Rendimiento	Tiempo de residencia (min)	Temperatura de final °C	$\Delta T/s$	Residuos
1	101	50	15	450	5	1,2
2	102,8427	51,42	15	450	5	1.1
3	102,0308	51,01	15	450	5	1
4	102,9386	51,47	30	450	5	1
5	102	51	30	450	5	1
6	102,4352	51,22	30	450	5	1,2
TOTAL	613,2473	51,10				4,2

Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

Los residuos sólidos que se obtuvieron del proceso fueron netamente carbón y para su respectivo análisis que corrobore sobre que sustancia es, se realizó un análisis FTIR en los que nos arrojó los siguientes resultados:

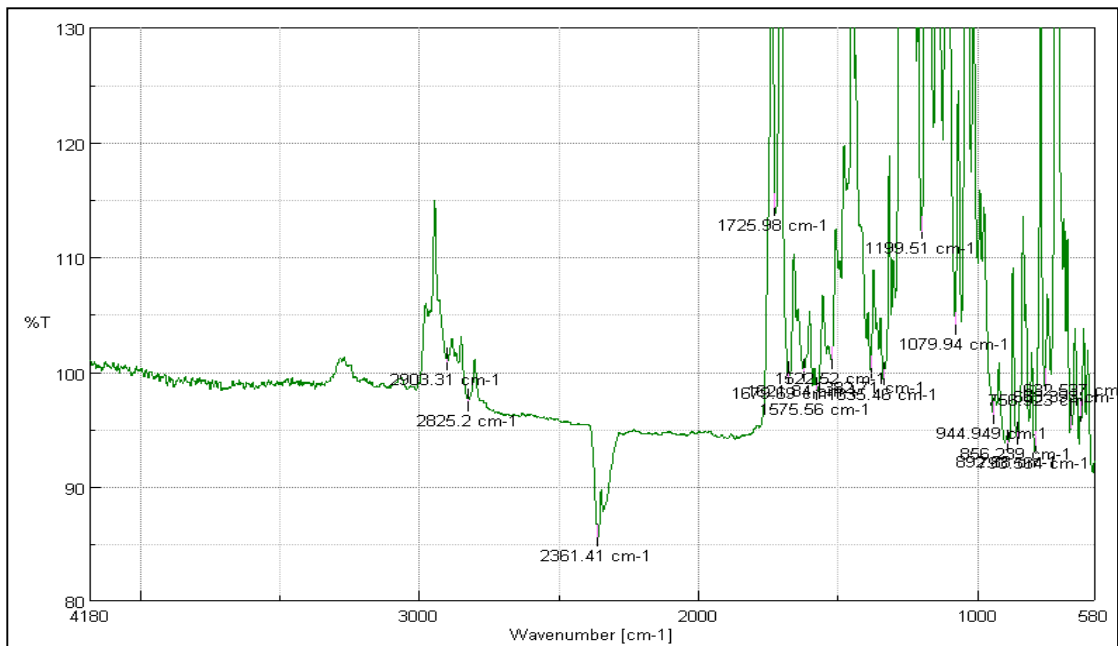


Figura 16-3: Análisis FTIR del residuo sólido obtenido del proceso de pirólisis

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

Para la obtención de los productos del proceso de pirólisis se lo realizaron mediante un sistema de condensación, por medio de burbujeo en un recipiente con agua que servía como un refrigerante, los mismos que obtuvieron de la siguiente manera:

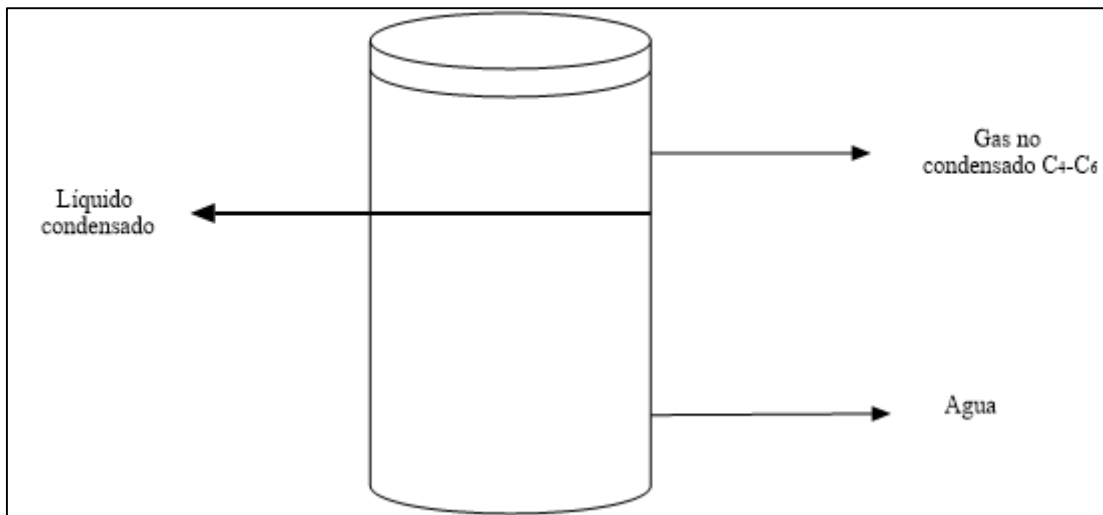


Figura 17-3: Esquema de condensación

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.



Figura 18-3: Sistema de condensación
Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

En la figura 18-3, se muestra el sistema de condensación que se utilizó para obtener un residuo líquido, en donde claramente se observa que por diferencia de densidades se ubican cada uno de los productos, teniendo en la parte superior gases no condensables y se sabe por medio de bibliografía y análisis flash point realizados se determinó que son gases que van desde el C4–C6; mientras que en la parte intermedia se puede observar que se genera una pequeña capa de color negra lo que se llevara a una decantación y posterior mente a una centrifugación y a un análisis de espectroscopia de líquidos; por último se encuentra el agua que nos sirvió como refrigerante en el proceso.

La capa que se forma en el interior del sistema de condensación se procede a extraerle por un método de decantación para posteriormente llevarlo a centrifugación para así tratar de separar lo mayor cantidad posible de agua presente en la muestra y de esta manera enviarlo a que se realicen sus respectivos análisis.

Los resultados se muestrean a continuación (Ver ANEXO G)

Tabla 3-3: Análisis del líquido obtenido del proceso de pirólisis

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR PERMISIBLE
Hidrocarburos totales (C6-C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	51	-
Hidrocarburos totales (>C12-C28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	32,6	-

Fuente: Laboratorio CESTTA

Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

Ver los resultados dados por laboratorio CESTA en el ANEXO J.

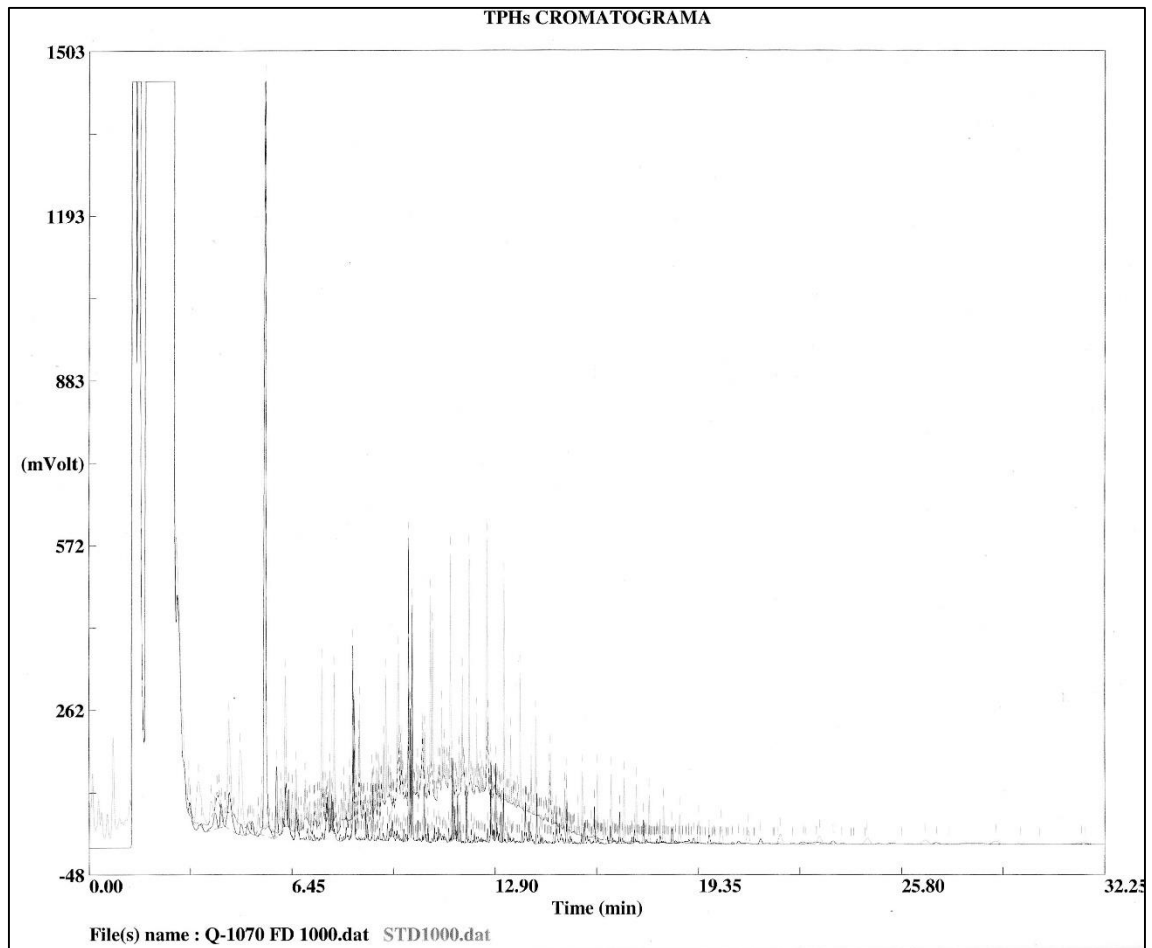


Figura 19-3: Análisis FTIR líquido del producto obtenido

Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

3.4. Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria

Tabla 4-3: Materiales requeridos para la construcción del equipo

NOMBRE	CANTIDAD	FUNCIÓN
Bridas de acero inoxidable 304	5	Son piezas que se utilizan normalmente para unir dos tuberías. Estas van soldadas a la tubería y se debe utilizar entre ellas algún tipo de empaquetadura que evite filtraciones no deseadas.
Cilindro de acero inoxidable	1	Los materiales hermetizantes consiguen que el conjunto sea muy resistente a sustancias químicas.
Resistencias de 3000W, 220V	2	Son las que transmiten el calor hacia el interior del cilindro para llegar a altas temperaturas.
Carcasas de ajuste para resistencias	2	Estas son las que le permiten que se ajusten al cilindro de tal forma que no exista ninguna deformación.
Pirómetro de 1200W	1	Mide la temperatura en el interior del cilindro.
Base estructural	1	Ayuda al soporte del peso del equipo.
Terminal estrella 50 A	1	Este se encuentra dentro de la caja de energía, para generar corriente hacia el seteador.
Manómetro 200 PSI	1	Mide la presión a la cual se está trabajando in situ.
Válvula de seguridad	1	Sirve para prevenir este tipo de accidentes. Se trata de una válvula reductora de presión, que se abre y expulsa el exceso de agua cuando la presión supere cierto nivel.
Llaves de paso	2	Son dispositivos, generalmente de metal, alguna aleación o más recientemente de polímeros o de materiales cerámicos, usado para dar paso o cortar el flujo de agua u otro fluido por una tubería o conducción en la que está inserto.
Acoples cónicos roscados	4	Son adecuados para la mayoría de aplicaciones que requieren que se unan barras de refuerzo. Se suministran normalmente encajadas en el extremo de la barra roscada y sólo necesitan que se acople y apriete la barra de unión in situ por medio de una llave de apriete calibrado.
Te de bronce	1	Donde se conectan los acoples, neoplos, válvula de seguridad, y manómetro.
Extensiones cañería 3/8 *50 cm	4	Darle un aumento en la longitud, evitando que se sobrecaliente la parte superior del equipo, y especialmente el manómetro.
Pletinas de sustentación	2	Dispositivo de suspensión y de compensación de alturas y de pesos.
Swich de un punto	2	Elementos encargados de la interconexión de dispositivos en una red local.

Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

3.5. Análisis de costos/beneficio del proyecto

3.5.1. Costos de inversión

- Recursos Materiales

Tabla 5-3: Materiales para reactor de pirólisis

Denominación	Cantidad	Costos de construcción (\$)
Cilindro de Acero inoxidable 304	1	230
Base estructural	1	200
Suelda	1	320
Torno	1	600
Taladrados y roscas	1	300
Caja	1	45
	TOTAL	\$1695
ACCESORIOS		
Tensores	4	160
Resistencias Eléctricas	2	180
Carcasas de ajuste para resistencias	2	60
Pirómetro de 1200W	1	140
Cable de salida	1	35
Terminal estrella 50 A	1	15
Manómetro 200 PSI	1	15
Válvula de seguridad	1	20
Llaves de paso	1	20
Acoples cónicos roscados	4	25
Neplo de bronce 1/4 *50mm	1	5
Te de bronce	1	5
Extensiones cañería 3/8 *50 cm	4	20
Pletinas de sustentación	2	30
Swich de un punto	2	10
Sensor de temperatura	1	15
	TOTAL	\$755

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

- Recursos Humanos

Tabla 6-3: Mano de obra

Mano de obra	2800
Planos en 3D de los Equipos.	50
Video en 3D de la simulación del proceso	50
Análisis externos	350
TOTAL	\$3250

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

- Costo Total del Proyecto

Tabla 7-3: Recursos Totales

Actividad	Inversión
Recursos materiales	2450
Recursos humanos	3250
TOTAL	\$5700

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

Como se puede observar el costo para el diseño y la construcción de este proyecto donde se tiene que para recursos materiales se necesita 2400 dólares; mientras que para recursos humanos 3250 dólares, dando como un total de 5700 dólares.

3.6. Cronograma de Ejecución del proyecto

ACTIVIDADES	TIEMPO																									
	1°				2°				3°				4°				5°				6°					
	MES				MES				MES				MES				MES				MES					
	SEMANAS																									
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Elaboración del anteproyecto	■																									
Pruebas de Laboratorio	■	■	■																							
Determinación de variables.			■	■	■																					
Dimensionamiento del equipo.					■	■	■	■																		
Construcción de los elementos a implementar.									■	■	■	■														
Implementación de los elementos construidos.													■	■	■											
Validación de los elementos implementados.															■	■	■	■								
Estudio técnico y económico.															■	■	■	■	■							
Redacción del trabajo final	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Análisis de costos.																			■	■						
Revisión del documento final.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Defensa de los del proyecto.																								■		

Realizado por: Jordán D y Zurita P. 2018.

RESULTADOS

En el diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica para la obtención de biocombustible a partir de residuos plásticos de polipropileno (PP) generados en la ESPOCH se tomaron las siguientes características: como diseño se tomó el modelo batch ya que es el que mejor se ajusta al proceso de pirólisis tanto en rendimiento como en variables de proceso a nivel de laboratorio, el mismo está fabricado con un cilindro de acero inoxidable y con especificación austeníticos 309 ya que estos poseen alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación en temperaturas de hasta 1000° C.

La caja de mandos presenta un comando para la potencia y otro para encender el cateador en donde se digita la temperatura que se quiere alcanzar, estando conectada a una termocupla que se encuentra en el interior del cilindro dándonos la lectura de la temperatura real a la cual se está llevando el proceso de pirólisis.

En la mitad de la tapa superior se encuentra conecta una tubería de cobre con 4 extensiones una de ellas sirve como salida del producto final, la segunda como entrada de Nitrógeno que va a purgar el reactor es decir crear una atmosfera neutra libre de oxígeno, la otra es en donde se encuentra el manómetro con el cual vamos a medir la presión en psi, la última salida es para la válvula de emergencia que se activa una vez que la presión llega a 120 psi, donde está la válvula de emergencia. No se colocó un agitador ya que la muestra de polipropileno que se utilizó ya se encontraba triturada y no se vio la necesidad de implementar el mismo.

La base en donde se encuentra el cilindro es pierda pomex capaz de soportar hasta 1200 °C con lo que no hay ningún problema que genere transferencia de calor hacia la base, para el sistema de enfriamiento se utilizó ventiladores de CPU, los cuales nos ayudan no solo en el proceso sino también en el momento del enfriamiento del equipo. En el cilindro se encuentran orificios que sirven como difusores de calor, además el aislante de fibra de cerámica utilizado se encuentra solo en la parte superior del cilindro ya que si este se encontrara en toda la superficie del mismo ocasionaría un incremento de temperatura haciendo que las niquelinas sobrepasen la temperatura máxima a la que pueden llegar. Las resistencias eléctricas son de banda flexible de cerámica 220 v y 3000 W, ya que están probadas para funcionar 24 horas seguidas en laboratorio y además son las que presentaban el rango de temperatura máxima en características de resistencias eléctricas 800-830 °C.

Para la obtención del producto final en este caso el combustible líquido, se trabajó con muestras de polipropileno, una vez realizada la validación del método a utilizar que en este caso fue a llave

abierta se obtuvo una cantidad de 613,2473 g de combustible líquido, en los cuales se pudo constatar que existe una mezcla de hidrocarburos de C6-C12 en un porcentaje del 51 % con hidrocarburos de C12-C28 en un porcentaje de 32,6 %. Utilizando tiempos de residencia de 15 y 30 minutos y un rango de temperatura de 300 a 400 °C, a esta temperatura en donde existe una mayor cantidad de producción de combustible líquido. A temperaturas comprendidas entre los 300 y 450 °C se obtiene la producción de productos gaseosos que según bibliografía deben ser hidrocarburos comprendidos entre C1-C5 Al comparar la cantidad de producto líquido obtenido con la muestra inicial de 1200 g, dando un rendimiento del 51,10% para el equipo construido en el presente proyecto.

DIMENSIONES DEL REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA

PARTE DEL REACTOR.	LONGITUD	ALTURA	ESPESOR	DIAMETRO INTERNO	DECLIVE
Cilindro.	21cm	50 cm	2mm	11,9 cm	
Base del Reactor.	34cm	15cm			
Carcasa Externa.	21cm	50cm	1mm		
Tapa.	15cm		9,6cm		
Caja de Mandos.	30 cm	20 cm			
Tubería de Carga de N.	35cm	90cm		1cm	
Tubería de Salida de Producto.	35cm	125cm			15cm
Tubería de Válvula de Emergencia	25cm	100cm		1cm	15cm
Tubería de Manómetro.	25cm	110cm		1cm	10cm
Mesa de Soporte.	34cm	37cm			
Válvulas				1/4cm	

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL EQUIPO

El mejor diseño que se acopla para la construcción de un reactor de pirolisis térmica en el presente proyecto fue el modelo batch ya que es el que mejor se ajusta al proceso de pirolisis tanto en rendimiento como en variables propias del mismo a nivel de laboratorio, está construido de un cilindro de acero inoxidable y con especificación austeníticos 309 ya que poseen alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación en temperaturas de hasta 1000° C., presenta una entrada de nitrógeno para purgar el interior del cilindro y así se lleve el proceso en ausencia de oxígeno o atmosfera neutra, las variables que se deben controlar en el proceso son la presión, temperatura y tiempo de residencia, dependiendo de estos es la cantidad de producto obtenido.

La temperatura con la cual se va a manejar el proceso dependerá en gran parte en cómo se manejen los tiempos de estabilización de la misma, ya que al comienzo del proceso se va a disparar en cierta forma, con la cual debemos estabilizar la misma hasta que ya no exista una gran diferencia y se maneje el proceso de forma controlada.

Tanto los difusores de calor que se encuentran en forma de orificios en la superficie de la carcasa del cilindro, como el aislante que se utilizó solo en la parte superior del cilindro van a determinar el tiempo de vida de las niquelinas, ya que si el aislante cubriera las mismas se produciría un incremento de temperatura, sobrepasando la temperatura limite que en este caso son 830 °C.

Para la determinación del rendimiento del equipo de pirolisis térmica, se procedió a pesar la cantidad de líquido obtenido luego de culminada cada práctica, arrojándonos una cantidad de 613,2473 g por las 6 pruebas realizadas, en las cuales se pudo constatar que existe una mezcla de hidrocarburos de C6-C12 en un porcentaje del 51 % con hidrocarburos de C12-C28 en un porcentaje de 32,6 %. Al comparar la cantidad de producto liquido obtenido con la suma de muestras utilizadas que en nuestro caso fueron 1200 g, se tuvo un rendimiento del 51,10% para el reactor construido en el presente proyecto. La diferencia de rendimiento en este caso centrándonos y comparando los datos obtenidos del paper Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos de Oswaldo Proaño y Sara Crespo en donde se obtuvo un porcentaje del 76,23%, se puede deber a diferentes factores, uno de ellos puede ser las características de la muestra utilizada para el proceso que en el caso de aquella investigación fue polietileno y en nuestro caso fue polipropileno ,estas pueden variar dependiendo de donde se obtiene la misma, también en el proceso de tratamiento previo a la Pirolisis, esto incluye el lavado, triturado, secado, etc. Otro factor que pudo ser determinante al momento de obtener un rendimiento parecido al obtenido en el paper de Oswaldo Proaño y Sara Crespo se puede deber a las variables de proceso, en concreto a temperatura, tiempo y presión, tiempos de residencia que en el presente proyecto

fueron comprendidos entre 15 y 30 minutos, a diferencia de los utilizados en el equipo utilizado en el paper en donde se manejaron con tiempos comprendidos entre 0.50 , 1 , y 2 horas y con una variación de temperatura comprendida entre 300 y 400 °C, en el presente proyecto el rango de temperatura fue de entre 400 a 450 °C, es por esta razón que la diferencia de rendimiento.

Otro factor y una de los más importantes se refiere al material con el cual está construido el equipo en este caso se trata de acero inoxidable con especificación y con un espesor de 2mm en el cilindro en donde se produce el proceso de pirólisis, comparado con el utilizado en el paper de Oswaldo Proaño y Sara Crespo varía no solo en el espesor del cilindro ya que este es de 5mm y su capacidad de carga es de 1L, mientras que el de nuestro proyecto es de 5L, la diferencia de rendimiento se puede deber a la potencia de las níquelinas y de la manera con que estas difunden el calor dentro del cilindro, en el paper se utiliza un reactor en donde se presenta un aislante de acero negro, sumadas a las variables de construcción y de materiales es un indicativo del porque vario el rendimiento entre un equipo y otro.

que en el presente proyecto fueron comprendidos entre 15 y 30 minutos, a diferencia de los utilizados en el equipo de la Escuela Politécnica Nacional en donde se manejaron con tiempos comprendidos entre 0.50 , 1 , y 2 horas y con una variación de temperatura comprendida entre 300 y 400 °C, en el presente proyecto el rango de temperatura fue de entre 400 a 450 °C, es por esta razón que la diferencia de rendimiento.

Otro factor y una de los más importantes se refiere al material con el cual está construido el equipo en este caso se trata de acero inoxidable con especificación y con un espesor de 2mm en el cilindro en donde se produce el proceso de pirólisis, comparado con el de la Escuela Politécnica Nacional varía no solo en el espesor del cilindro ya que este es de 5mm y su capacidad de carga es de 1L, mientras que el de nuestro proyecto es de 5L, la diferencia de rendimiento se puede deber a la potencia de las níquelinas y de la manera con que estas difunden el calor dentro del cilindro, en el reactor de la Escuela Politécnica Nacional se utiliza un reactor en donde se presenta un aislante de acero negro, sumadas a las variables de construcción y de materiales es un indicativo del porque vario el rendimiento entre un equipo y otro.

Tabla de Resultados de los ensayos de laboratorio

Prueba	Peso Obtenido (gr)	% de Rendimiento	Tiempo de residencia (min)	Temperatura de final °C	$\Delta T/s$	Residuos
1	101	50	15	450	5	1,2
2	102,8427	51,42	15	450	5	1,1
3	102,0308	51,01	15	450	5	1
4	102,9386	51,47	30	450	5	1
5	102	51	30	450	5	1
6	102,4352	51,22	30	450	5	1,2
TOTAL	613,2473	51,10				4,2

Realizado por: Jordán, D y Zurita, P. 2018.

CONCLUSIONES

- ✓ Se diseñó el reactor batch para el proceso de pirólisis térmica con un cilindro de acero inoxidable con especificación austeníticos 309, una carcasa con difusores de calor en su parte inferior, usando como fuente de calor resistencias eléctricas flexibles de cerámica de 3000 W, con una caja de control de temperatura. La tapa superior consta de una tubería de cobre con 4 extensiones una de ellas sirve como salida del producto final, la segunda como entrada de Nitrógeno que va a purgar el reactor, la otra consta de un manómetro y la última salida es para la válvula de alivio calibrada a 120 psi por seguridad y resistencia del material.
- ✓ Se construyó el equipo para el proceso de pirólisis térmica, capaz de trabajar hasta una temperatura de 700 °C y una presión máxima de 120 psi. Sus extensiones son adaptables a un sistema de condensación capaz de recuperar hidrocarburos de bajo peso molecular y de fácil muestreo de la fracción gaseosa.
- ✓ Se realizó a través de la experimentación la validación del equipo utilizando polipropileno reciclado y determinando el rango de temperatura para este tipo de plástico entre 350 y 450 °C donde se obtuvo la mayor fracción líquida con un 51.1 % constituida por una mezcla de hidrocarburos comprendidos a su vez del 51 % de hidrocarburos totales C6 a C12 y el 32 % entre >C12 a C28. Adicional, se obtiene el 47,9 % de fracción gaseosa y el 1% de fracción sólida.

RECOMENDACIONES

- ✓ La purga con Nitrógeno para el proceso es de suma importancia, ya que el principio básico para que ocurra una reacción de pirólisis es que no exista presencia de oxígeno dentro del reactor, para que de esta manera se evite que ocurran otras reacciones dentro del mismo.

- ✓ La condensación del combustible líquido y de las fracciones gaseosas se lo debe llevar a cabo en un condensador que ofrezca la facilidad de entrada de agua y salida de la misma, de tal forma que se obtenga el producto líquido sin ninguna mezcla con agua.

- ✓ Al momento de que vaya a utilizar el reactor leer el manual de operación para evitar accidentes tanto humanos como materiales.

- ✓ El presente proyecto es punto de partida para futuras tesis de investigación, en donde no simplemente se obtenga un combustible líquido de un tipo de plástico en este caso polipropileno, sino más productos variando el tipo de plástico excepto el PVC debido al gas que va emanar en el proceso y las variables con las que se manejen dentro del mismo.

BIBLIOGRAFIA

Acosta Mongua & Pérez Moreno. *Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en seri.* Cartagena, 2012.

Al Salem et. al. Valoración de residuos plásticos sólidos PSW por rutas primarias a cuaternarias. En *Valoración de residuos plásticos sólidos PSW por rutas primarias a cuaternarias*, de Lettieri P., Baeyens B. Al Salem, 103-129. Journal Molecular, 2010.

Aracil I. Formación de Contaminantes y Estudio Cinético de la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PPVC y PCP). En *Tesis Doctoral*, de Font Montesinos, Rafael Conesa, Juan Antonio Ferrer Aracil I, 2. Alicante: Universitaria, 2008.

Association of Plastics Manufactures in Europe. Analysis of Plastics Consumption and Recovery in Europe. En *Analysis of Plastics Consumption and Recovery in Europe*, de Association of Plastics Manufactures in Europe (APME), 23. Alicante: Universidad de Alicante, 2002-2003.

Basu, P. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. *Academic press*, 2013.

Blatem. *Tipos de aislantes térmicos y sus características.* San José: Publicaciones San Augusto, 2011.

Bonet, Juan José Cerezuela. *Procesos de gasificación aplicados a los residuos plásticos.* Editado por Valladolid. 2011.

Bonnet. *Clasificación y características de los aceros inoxidables.* Buenos Aires: Publicaciones Lorenzo Aguirre, 2013.

Bridgewater, A. *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook.* Vol. Volume 2. Newbury : Cpl Press, 2008.

Bridgewater, A. Review of fast pyrolysis of biomass and product. *Biomass and Bioenergy.*, 2011.

Buekens, A. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. Editado por J. Scheirs and W. Kaminsky. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

CARE, HEALTH. *Greenpeace*. 10 26, 2017. greenpeace.

CONESA. *Estudio de la Pirolisis de Residuos Plasticos del Polietileno y Neumaticos Usados*. 1996.

Contreras, Francisco. *Estudio de Pirólisis Catalítica de Propileno en un Reactor semi-batch*. Santiago de Chile, 2014.

Contreras, Fransisco. *Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch*. Santiago de Chile: universidad de Chile, 2014.

Coro E. *Plan de Manejo de Residuos Solidos De la ESPOC*. Riobamba, 2008.

Espinoza E. *Modelo de Gestion de Residuos Plasticos. II Simposio Iberoamericano de Ingenieria de Residuos*. Argentina: Mensoza, 2009. 2.

Gallo, Margarita María Cardona. *Minimización de Residuos: una política de gestión ambiental empresarial*. 2007.

GIZMODO. 2018. <https://es.gizmodo.com/que-significan-realmente-los-numeros-grabados-en-la-par-1793164289> (último acceso: 04 03, 2018).

Hernandez R. *Evaluacion de la Pirolisis Termica y Ctalitica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Tecnica de Reciclado. Infleuncia de las Variables sobre los Productos Generados*. En *Remedio Hernandez Ferez*, de *Evaluacion de la Pirolisis Termica y Ctalitica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Tecnica de Reciclado. Infleuncia de las Variables sobre los Productos Generados*, 27-30. Alicante: Universidad de Alicante, 2007.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Biomasa: Gasificación*. En *Biomasa: Gasificación*, de IDAE, 6-15. Madrid: comunicacion@idae.es, 2007.

Ipiiales, P. *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirolisis catalítica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno*. Riobamba, 2018.

Kaminsky, J. Scheirs and W. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastic*. Berlin: John Wiley and Sons, 2006.

Kintel. *Resistencias Electricas Tipo Carucho*. San Luis Potosi: Publicaciones Alonso Cano , 2017.

Lechuga, F. *ABC para comprender reactores químicos con multireacción*. Antioquia, 2008.

Ludlow-Palafox et al. Microwave-induced pyrolysis of plastic waste. De C., Chase, H.A., Ludlow-Palafox, 4749-4756. England: Revista Indecxada, 2001.

Mancheno M. *Plastic Pyrolysis Reactor | Recycle Waste Plastic to Oil*. Quito, 2016.

MARGMA. *Domestic Consumption of Natural Rubber Products Industry*. Malasia: Management Association, 2006.

MEI. *Tipo de Manómetros* . Barcelona: Publicaciones "El Pla", 2015.

Obando, Gabriel. *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)*. Manizales: Universidad de Manizales, 2015.

Pérez, J., Borge, D., Agudelo, J. Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales. *Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia*. Septiembre 23, 2009. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n52/n52a09.pdf> (último acceso: Enero 2018).

PNGIDS. «Programa ‘PNGIDS’ Ecuador.» *Ministerio del Ambiente programas y servicios*. (Marco de gestion Santillan), 2010: 22.

Salinas, V.; Vazquez, F. Diseño y Construcción de un Sistema de Combustion para la Caracterización Térmica de Desechos Plásticos Utilizados como Combustible Alternativo. 4-6. Sangolquí, 2010.

Serna. *Ventiladores centrífugos: tipos y características*. Bogota: Publicaciones Mundo de Letras, 2010.

Sierra J., Guerrero F., Arango C. *Tecnologías para el Aprovechamiento de los Biocombustibles. Grupo de investigación en Mecanismos de desarrollo Limpio y gestión Energética.* Primera. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2008.

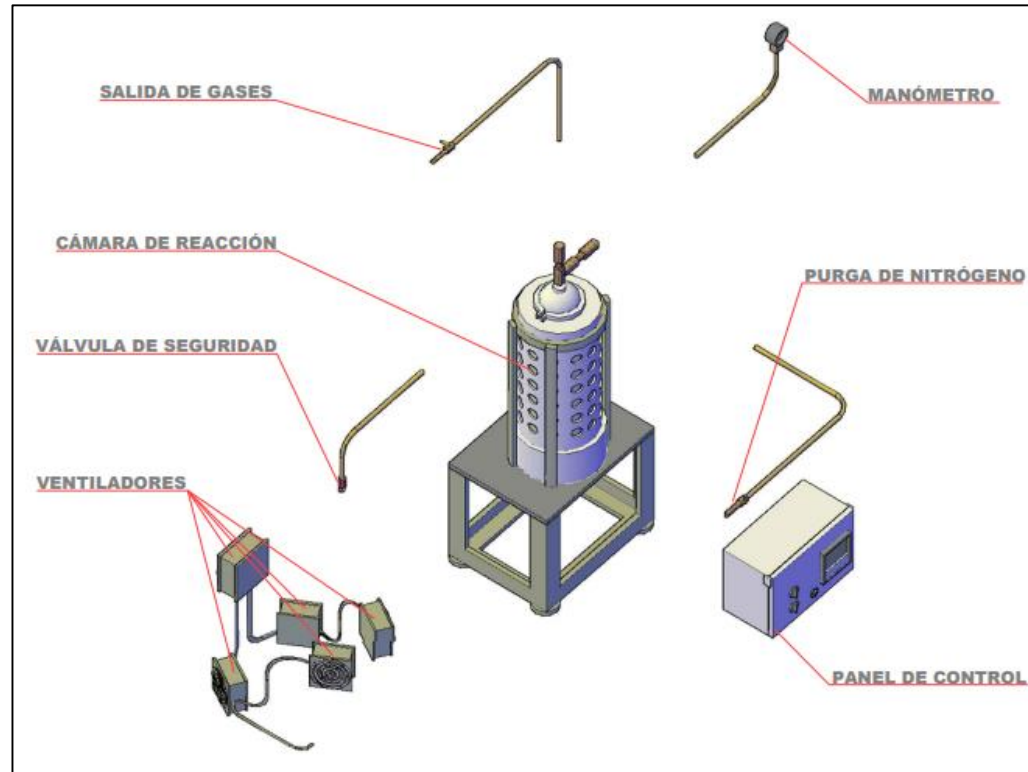
Trec-Everwatt. *Resistencias Electricas Tipo Ceramica.* Milan: Segratte Works, 2018.

Yoshioka T., Hirata S., Matsumura Y., Sakanishi K. Biomass resources and conversion in Japan: the current situation and projections to 2010 and 2050. *Biomass Bioenergy*, 2005.

ANEXOS

Anexo A

a)



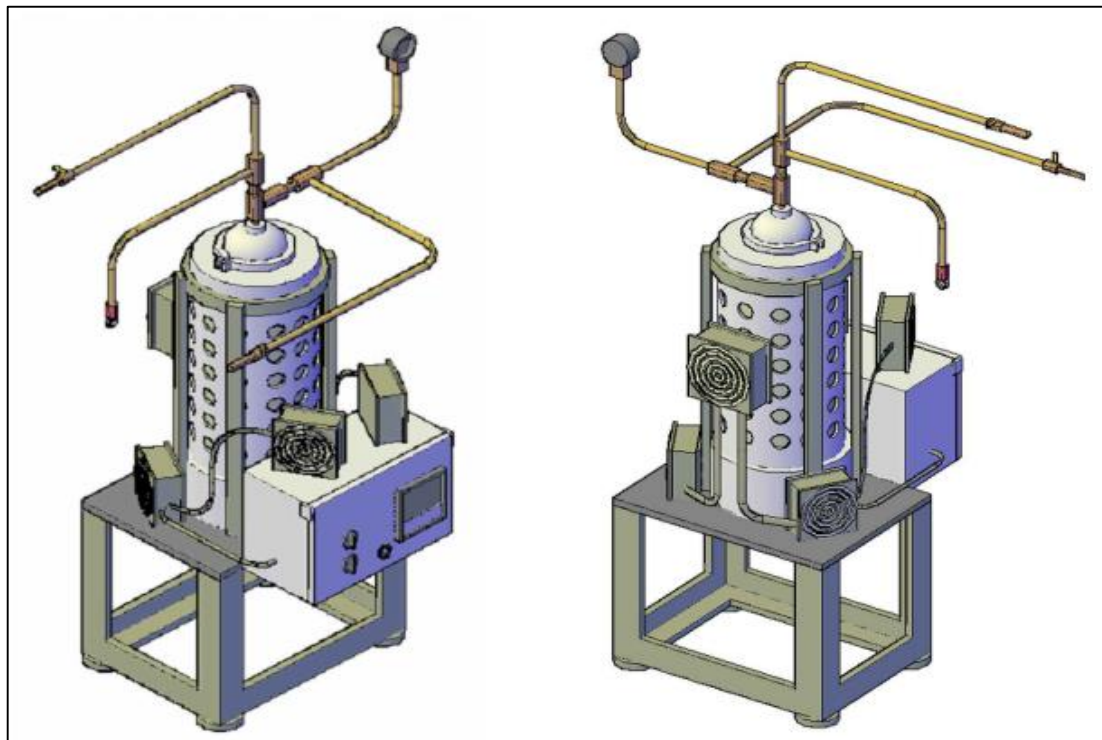
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”		
			ESCALA	FECHA	LAMINA



a) Partes del Reactor de Pirólisis Térmica	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar	ESPOCH Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita	1:1	15/05/2018	1
--	---	--	-----	------------	---

Anexo B

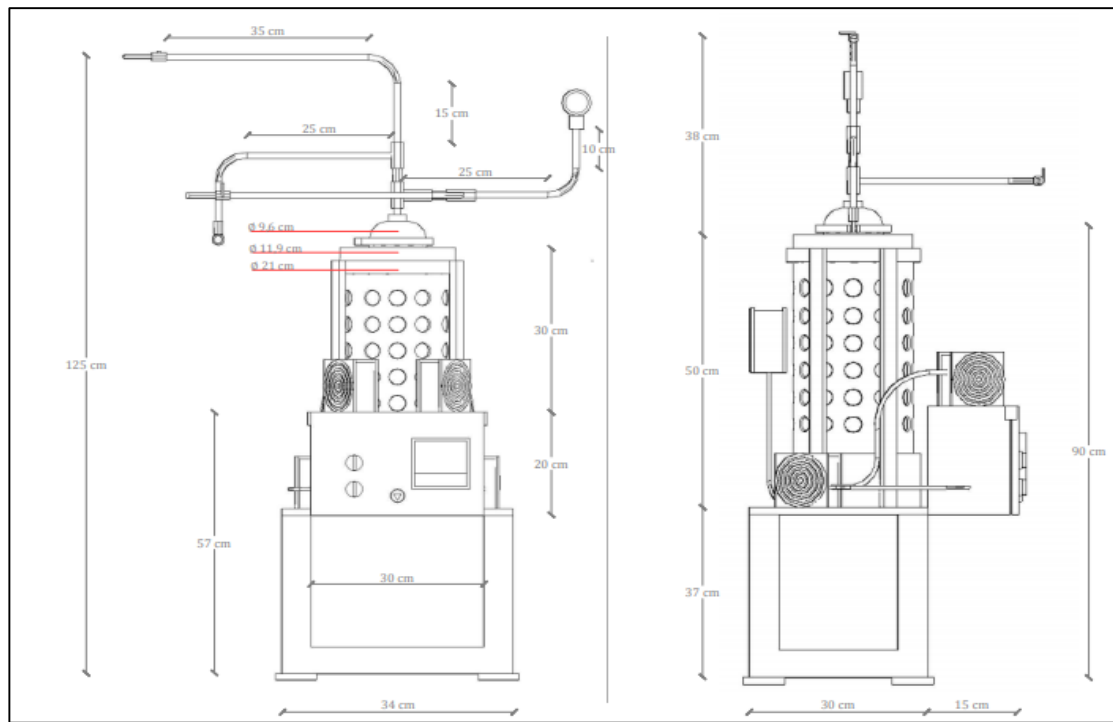
a)



<p>NOTAS</p>	<p>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</p>	<p>ESPOCH</p>	<p>“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”</p>		
<p>a) Visualización de Reactor de Pirólisis Térmica</p>	<p>b) Por aprobar c) Por calificar d) Por certificar</p>	<p>ESPOCH Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita</p>	<p>ESCALA</p>	<p>FECHA</p>	<p>LAMINA</p>
			<p>1:1</p>	<p>15/05/2018</p>	<p>1</p>

Anexo C

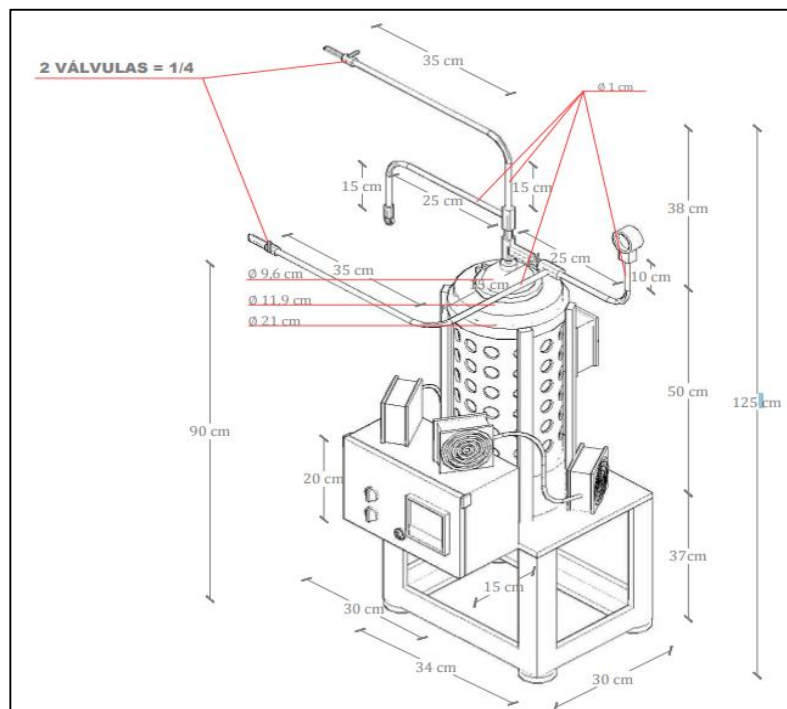
a)




<p>NOTAS</p>	<p>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</p>	<p>ESPOCH</p>	<p>“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”</p>		
<p>a) Vistas lateral y frontal en 3D del Reactor de Pirólisis Térmica</p>	<p>b) Por aprobar c) Por calificar d) Por certificar</p>	<p>ESPOCH Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita</p>	<p>ESCALA</p>	<p>FECHA</p>	<p>LAMINA</p>
			<p>1:1</p>	<p>15/05/2018</p>	<p>1</p>

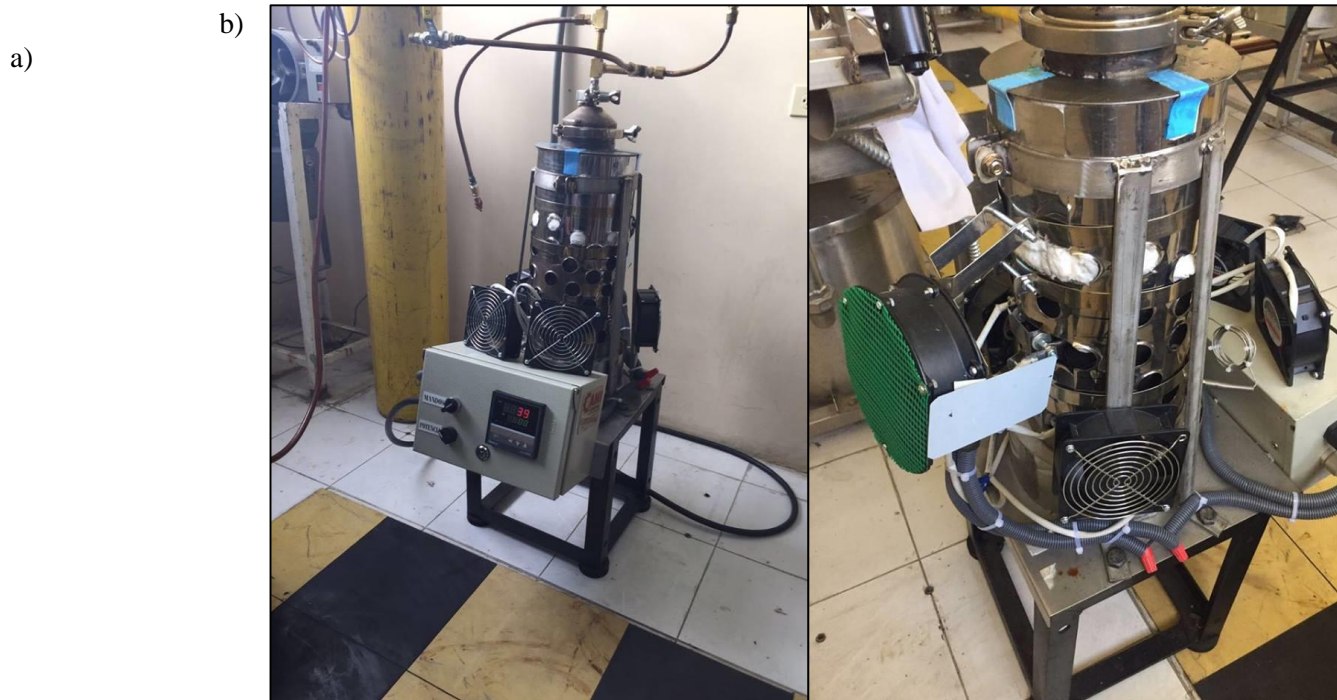
Anexo D

a)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH"		
a) Vista perspectiva del Reactor de Pirólisis Térmica	b) Por aprobar c) Por calificar d) Por certificar	 <p>ESPOCH Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita</p>	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	15/05/2018	1

Anexo E



<p>NOTAS</p>	<p>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</p>	<p>ESPOCH</p>	<p>“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”</p>		
<p>a) Vista frontal y lateral del Reactor de Pirólisis Térmica</p>	<p>e) Por aprobar f) Por calificar g) Por certificar</p>	<p>ESPOCH Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita</p>	<p>ESCALA</p>	<p>FECHA</p>	<p>LAMINA</p>
			<p>1:1</p>	<p>15/05/2018</p>	<p>1</p>

Anexo F

a)



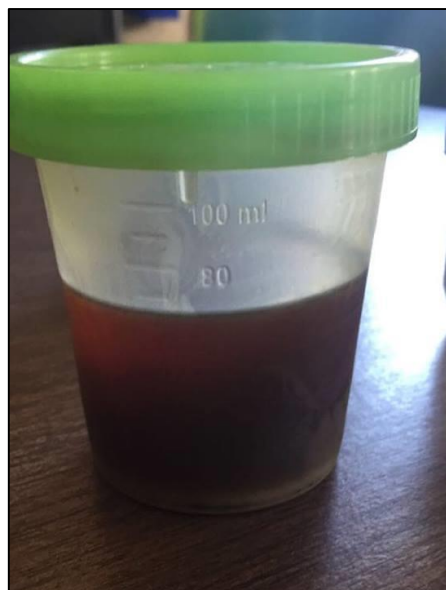
b)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”		
a) Panel de control. b) Tapa del Reactor de Pirólisis Térmica	h) Por aprobar i) Por calificar j) Por certificar	 Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	15/05/2018	1


Anexo G

a)



b)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH”		
a) Producto líquido del proceso. b) Producto sólido del proceso.	k) Por aprobar l) Por calificar m) Por certificar	 ESPOCH Elaborado por: David Jordán Paúl Zurita	ESCALA	FECHA	LAMINA
			1:1	15/05/2018	1

Anexo H


INFORMACIÓN DEL PANEL DE CONTROL



INFORMACIÓN DE COMANDOS DE CONTROL PARA EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	
	DESCRIPCIÓN:
MANDOS:	Esta perilla sirve para activar el sistema de ventilación, así como también para conocer la temperatura interna del reactor.
POTENCIA:	Esta perilla sirve para activar las resistencias del reactor y de esta manera proporcionar calos hacia el mismo.
LLAVE DEL PANEL DE CONTROL:	Es una herramienta que nos permite abrir el panel de control para realizar correcciones del sistema eléctrico. Se recomienda que para hacer estas correcciones lo haga personal capacitado.

Anexo I

Análisis Realizados en laboratorio CESTA

	<p style="text-align: center;">CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</p> <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO : SERVICIOS DE LABORATORIO</p> <p style="text-align: center;">Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183</p>															
INFORME DE ENSAYO No:	Q-1070-18															
ST:	027- 18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS															
Nombre Peticionario:	ESPOCH.															
Atn.	Paul Zurita.															
Dirección:	Riobamba, Chimborazo Riobamba-Chimborazo															
FECHA:	11 de Mayo del 2018															
NUMERO DE MUESTRAS:	1															
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	2018/05/07- 16:00															
FECHA DE MUESTREO:	2018/05/07 - 15:00															
FECHA DE ANÁLISIS:	2018/05/07 - 2018/05/11															
TIPO DE MUESTRA:	Hidrocarburo															
CÓDIGO CESTA:	LAB-Q 1070-18															
CÓDIGO DE LA EMPRESA:	Tesis															
PUNTO DE MUESTREO:	NA															
ANÁLISIS SOLICITADO:	Químico															
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:	Paul Zurita															
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:	T máx.:25,0 °C. T min.: 15,0 °C															
RESULTADOS ANALÍTICOS:																
<table border="1"><thead><tr><th>PARÁMETROS</th><th>MÉTODO/NORMA</th><th>UNIDAD</th><th>RESULTADO</th><th>VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)</th></tr></thead><tbody><tr><td>Hidrocarburos totales (C6-C12)</td><td>PEE/CESTA/07 TNRCC 1005</td><td>%</td><td>51</td><td>-</td></tr><tr><td>Hidrocarburos totales (>C12-C28)</td><td>PEE/CESTA/07 TNRCC 1005</td><td>%</td><td>32,6</td><td>-</td></tr></tbody></table>	PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)	Hidrocarburos totales (C6-C12)	PEE/CESTA/07 TNRCC 1005	%	51	-	Hidrocarburos totales (>C12-C28)	PEE/CESTA/07 TNRCC 1005	%	32,6	-	
PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)												
Hidrocarburos totales (C6-C12)	PEE/CESTA/07 TNRCC 1005	%	51	-												
Hidrocarburos totales (>C12-C28)	PEE/CESTA/07 TNRCC 1005	%	32,6	-												
OBSERVACIONES:																
<ul style="list-style-type: none">Muestra receptada en el laboratorio.																
RESPONSABLES DEL INFORME:																
 Dr. Mauricio Álvarez RESPONSABLE TÉCNICO																
Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio. Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados																
MC01-16	Página 1 de 1 Edición 0															