



**CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN PETROLERA
PROYECTO DE GRADO**

PROYECTO DE GRADO

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA
PLANTA DE OBTENCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE UTILIZANDO
PLASTICO RECICLADO MEDIANTE
PIROLISIS NO CATALÍTICA, PARA LA
COMUNIDAD DE “ECO-RECOLECTORAS”
DEL MUNICIPIO DE COCHABAMBA”**

Presentado por:

JOHANS GERHARD MONJE VERGARA

Cochabamba – Bolivia

2024

ABSTRACT

TITULO: Propuesta de diseño de una planta de obtención de biocombustible utilizando plástico reciclado mediante pirolisis no catalítica, para la comunidad de “eco-recolectoras” del municipio de Cochabamba.

AUTOR(ES): Johans Gerhard Monje Vergara.

PROBLEMÁTICA.

Falta de combustibles líquidos en las estaciones de servicio y la acumulación de desechos plásticos en todo el municipio de Cochabamba.

OBJETIVO GENERAL.

Proponer el diseño de una planta de obtención de gasolina con especificaciones técnicas de octanaje de la ANH a través del plástico reciclado, mediante el proceso de pirolisis no catalítica para la comunidad de “Eco-Recolectoras” del municipio de Cochabamba.

CONTENIDO.

El proyecto propone el diseño de una planta para la generación de biocombustibles, específicamente gasolina, utilizando residuos plásticos reciclados mediante el proceso de pirolisis no catalítica. Esta planta está destinada a la comunidad de “Eco-Recolectoras” en Cochabamba y tiene como objetivos principales mitigar la contaminación ambiental y reducir la escasez de combustible en el municipio. El proyecto incluye el diseño detallado del reactor de pirolisis, la torre de destilación, los tanques de almacenamiento y el intercambiador de calor.

CARRERA	:	Ingeniería en Gestión Petrolera
TUTOR	:	Ing. Maria Dayana Uriarte Cueto
DESCRIPTORES O TEMAS	:	Petroquímica y Polímeros
PERÍODO DE INVESTIGACIÓN	:	Febrero 2024 al 12 de Julio 2024
E-MAIL DEL AUTOR	:	johansm26@gmail.com

DEDICATORIA:

Este trabajo está dedicado:

A Dios, por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia para alcanzar mis metas.

A mi madre, con todo mi amor y gratitud, dedico este proyecto a ti, que has sido la fuerza inquebrantable y la luz constante en mi vida.

Tu sacrificio, amor y apoyo incondicional me han dado el valor y la determinación para perseguir mis sueños y completar este proyecto. Has sido mi mayor inspiración, enseñándome el valor del trabajo duro, la perseverancia y la integridad.

Cada logro que he alcanzado es un reflejo de tu dedicación y esfuerzo. Tu fe en mí ha sido el pilar que me ha sostenido en los momentos más difíciles, y tu ejemplo de fortaleza y valentía es lo que me impulsa a seguir adelante.

A mi padre y hermana, por su amor, apoyo y constancia. Su fuerza y ejemplo han sido mi mayor inspiración. Este logro es tanto suyo como mío.

AGRADECIMIENTOS:

A Dios, por brindarme la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada desafío.

A mi madre, por su amor y apoyo incondicional, y por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación. Sin tu guía y ejemplo, no habría logrado alcanzar esta meta.

A mi padre, gracias por tu apoyo incondicional. Tu confianza en mí me ha dado la fuerza para seguir adelante. Este logro es también tuyo.

A mi hermana, por su constante ánimo y comprensión. Gracias por estar siempre a mi lado y por ser una fuente de inspiración.

A mi tutora, cuyo conocimiento, paciencia y compromiso han sido fundamentales para la realización de este proyecto. Gracias por guiarme

A mis docentes, por su enseñanza y orientación a lo largo de mi formación académica. Su dedicación ha sido clave para mi crecimiento profesional y personal.

A mis amigos y compañeros de estudio, por su apoyo y colaboración. Los momentos compartidos y el trabajo en equipo han sido esenciales para llegar hasta aquí.

Finalmente, a la comunidad de "Eco-Recolectoras" del municipio de Cochabamba, por inspirar este proyecto y por su labor incansable en pro del medio ambiente. Espero que este trabajo pueda contribuir de alguna manera a mejorar su calidad de vida y a fomentar la sostenibilidad en nuestra sociedad.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	PÁG.
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.1.1 Antecedentes Generales.....	3
1.1.2 Antecedentes Específicos.....	4
1.2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	5
1.2.1 Situación problemática.....	5
1.2.2 Objeto de estudio.....	7
1.2.3 Pregunta de investigación.....	7
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 DELIMITACIÓN.....	10
1.4.1 Limitaciones.....	11
1.4.2 Límite temporal.....	11
1.4.3 Límite temático.....	11
1.4.4 Límite geográfico.....	12
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	13

1.5.1	Justificación técnica.....	13
1.5.2	Justificación económica.....	14
1.5.3	Justificación social.....	14
1.5.4	Justificación académica.....	14
1.5.5	Justificación ambiental.....	15
1.6	TIPOLOGÍA DE PROYECTO.....	16
1.7	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
1.7.1	Metodología cuantitativa.....	16
1.8	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	17
1.8.1	Fuentes primarias.....	17
1.8.2	Fuentes secundarias.....	17
1.9	TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.10	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	18
2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	19
2.1	PETRÓLEO.....	20
2.1.1	Origen del petróleo.....	20
2.1.2	Proceso de formación del petróleo.....	21
2.1.2.1	Diagénesis (descomposición anaerobia).....	22
2.1.2.2	Catagénesis (transformación del querógeno en combustible fósil)	22

2.1.2.3 Metagénesis.....	22
2.1.3 Propiedades y usos del petróleo.	22
2.1.4 El petróleo en Bolivia.....	23
2.2 REFINACIÓN	24
2.2.1 Procesos de refinación.....	24
2.2.1.1 Destilación fraccionada	24
2.2.1.2 Destilación al vacío	25
2.2.1.3 Coquización.....	25
2.2.1.4 Reformado catalítico	25
2.2.1.5 Isomerización	26
2.2.1.6 Cracking catalítico	26
2.2.2 Principales derivados el petróleo.....	27
2.3 GASOLINA.....	29
2.3.1 Composición química de la gasolina.....	29
2.3.2 Gasolina en Bolivia.....	30
2.4 ENERGÍAS ALTERNATIVAS.....	31
2.4.1 Fuentes de energía primaria.	31
2.4.1.1 Viento	31
2.4.1.2 Sol.....	33

2.4.1.3 Agua (Hidráulica).....	36
2.4.1.4 Calor (Geotérmica).....	37
2.4.2 Biocombustibles	39
2.4.2.1 Fuentes de biomasa y tipos de biocombustible.....	40
2.4.2.2 Beneficios de los biocombustibles.....	40
2.5 POLÍMEROS.....	41
2.5.1 Clasificación de Polímeros.....	41
2.5.1.1 Según su origen	41
2.5.1.2 Según su estructura.....	41
2.5.1.3 Según su comportamiento térmico.....	42
2.5.1.4 Propiedades de los Polímeros.....	42
2.5.1.5 Aplicaciones de los Polímeros.....	42
2.5.1.6 Polímeros y Medio Ambiente.....	42
2.5.2 PLÁSTICO.....	43
2.5.2.1 Obtención de los plásticos.....	44
2.6 PIROLISIS.....	48
2.6.1 Etapas de la pirolisis	49
2.6.1.1 Precalentamiento	49
2.6.1.2 Descomposición.....	49

2.6.1.3	Enfriamiento.....	49
2.6.2	Pirolisis de plásticos.....	50
2.6.2.1	Temperatura de pirolisis.....	51
2.6.3	Tipos de pirolisis.....	51
2.6.3.1	Pirolisis catalítica.....	51
2.6.3.2	Pirolisis no catalítica.....	52
2.6.4	Países que emplean el proceso de pirolisis para la obtención de biocombustibles.....	53
2.6.4.1	Chile.....	53
2.6.4.2	Ecuador.....	54
3	INGENIERÍA DEL PROYECTO.....	56
3.1	PROPUESTA GEOGRÁFICA DE LA UBICACIÓN DE LA PLANTA DE OBTENCIÓN DE GASOLINA.....	57
3.1.1	Selección de zona geográfica considerando factores ambientales	57
3.1.2	Presentación de la zona dentro del terreno de acopio donde está diseñada la planta de pirolisis no catalítica.....	57
3.2	DETERMINACIÓN DE LOS PLÁSTICOS QUE SE EMPLEAN EN EL PROCESO DE PIROLISIS NO CATALÍTICA	58
3.2.1	Identificación de tipos de plásticos reciclables en el municipio de Cochabamba.....	58

3.2.2	Evaluación, separación y limpieza de los plásticos reciclados para su posterior eliminación de impurezas.....	60
3.2.3	Limpieza y triturado de los plásticos separados.....	61
3.3	DISEÑO DE LA PLANTA DE OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE A TRAVÉS DE PLÁSTICOS RECICLADOS.....	62
3.3.1	Selección y diseño del reactor.....	62
3.3.1.1	Calculo del volumen del reactor y diseño en base a la cantidad proyectada de materia prima recolectada.....	63
3.3.1.2	Medidores de temperatura y presión de trabajo del reactor.....	66
3.3.2	Selección de tuberías y su diseño.....	67
3.3.2.1	Calculo del peso de la tubería en base a la densidad, tamaño, diámetro y espesor.	68
3.3.3	Diseño del intercambiador de calor.....	69
3.3.4	Tanques de almacenamiento.	70
3.3.4.1	Diseño del primer tanque de almacenamiento.	70
3.3.4.2	Diseño del tanque de almacenamiento de kerosene.....	73
3.3.4.3	Diseño del tanque de almacenamiento de diésel.	74
3.3.4.4	Diseño del tanque de gasolina.	76
3.3.5	Diseño de la torre de destilación de combustibles.	77
3.3.5.1	Calculo de número de placas necesarias en la torre de destilación.....	77

3.3.5.2	Altura ocupada de las placas dentro de la torre.	81
3.3.5.3	Determinación de la altura de la torre de destilación.....	82
3.3.5.4	Determinación del diámetro de la torre de destilación.....	82
3.3.6	Propuesta de diseño final de la Planta de Pirolisis no Catalítica en la comunidad de “Eco-Recolectoras”.....	84
3.4	PROCESO DE PIROLISIS NO CATALITICA QUE ES EJECUTADA EN LA PLANTA.	86
3.4.1	Proceso de recolección de plásticos desechados.	87
3.4.2	Calculo de variables de trabajo en el reactor pirolítico.	90
3.4.2.1	Simulación teórica de la primera tanda del proceso de pirolisis dentro del reactor con los polímeros Polietileno (PE) y Polipropileno (PP).	91
3.4.2.2	Simulación teórica de la segunda tanda del proceso de pirolisis dentro del reactor con los polímeros Poliestireno (PS) y Polietileno Tereftalato (PET).	97
3.4.3	Cálculo del flujo saliente del reactor pirolítico de la primera tanda polietileno y polipropileno.	103
3.4.3.1	Masa molar del Polietileno (PE) y Polipropileno (PP).....	103
3.4.3.2	Determinación de la masa de los materiales a moles.	104
3.4.3.3	Cálculo de los moles de gas utilizando la ley de los gases.....	105
3.4.3.4	Cambio en el número de moles que sufre durante el proceso térmico del reactor.	106
3.4.3.5	Flujo molar y flujo másico de salida del reactor.....	106

3.4.4	Cálculo del flujo saliente del reactor pirolítico de la segunda tanda Poliestireno y Polietilentereftalato.	107
3.4.4.1	Masa molar del Poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET).....	107
3.4.4.2	Determinación de la masa de los materiales a moles.	109
3.4.4.3	Flujo másico de salida del reactor de la segunda tanda de PS y PET. 109	
3.4.5	Cálculo de la velocidad con la que sale el gas hacia el intercambiador de calor en la primera tanda.....	110
3.4.5.1	Flujo volumétrico.	111
3.4.5.2	Calculo de velocidad de salida.	111
3.4.6	Proceso del intercambiador de calor con el gas resultante de la primera tanda procesada en el reactor.....	112
3.4.6.1	Calor transferido de la primera tanda (Q).....	113
3.4.6.2	Flujo de salida de los gases condensados y no condensados.	114
3.4.7	Proceso del intercambiador de calor con el gas resultante de la segunda tanda procesada en el reactor.....	115
3.4.7.1	Calor transferido (Q).....	116
3.4.7.2	Flujo de salida de los gases condensados y no condensados.	117
3.4.8	Simulación teórica de la composición química del aceite pirolítico resultante de la primera tanda de Polietileno (PE) y Polipropileno.....	118
3.4.9	Simulación teórica de la composición química del aceite pirolítico resultante de la segunda tanda de Poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET).....	120

3.4.10	Cantidad de aceite pirolítico almacenado de la primera tanda en el tanque de almacenamiento N°1	122
3.4.11	Cantidad de aceite pirolítico almacenado de la segunda tanda en el tanque de almacenamiento N°1	124
3.4.12	Cálculos de balance de materia en el destilador con el aceite pirolítico resultante.....	126
3.4.13	Cantidades de combustibles estimados que se puede obtener de la primera tanda de aceite pirolítico resultante de PE y PP.	128
3.4.14	Cantidades de combustibles estimados que se puede obtener de la segunda tanda de aceite pirolítico resultante de PS y PET.....	130
3.4.15	Cantidades estimadas teóricamente de combustibles producidos por la planta de pirolisis no catalítica.....	132
3.4.16	Calculo del octanaje de la gasolina obtenida en la primera tanda de PE y PP.	132
3.4.17	Calculo del octanaje de la gasolina obtenida en la segunda tanda de PE y PP.	134
3.5	ASPECTOS AMBIENTALES.....	135
3.5.1	Impactos Ambientales Positivos.....	136
3.5.1.1	Reducción de residuos plásticos	136
3.5.1.2	Reutilización de gases.	136
3.5.1.3	Proceso con un circuito cerrado.	137
3.5.1.4	Disminución de la Dependencia de Combustibles Fósiles.	137

3.5.1.5 Fomento de la Economía Circular	137
3.5.2 Impactos Ambientales Negativos.	137
3.5.2.1 Emisiones de gases residuales.	137
3.5.2.2 Gestión de Subproductos Sólidos y Líquidos.	138
3.5.2.3 Impacto en la Calidad del Aire Local	139
3.5.2.4 Riesgo de Incidentes.....	139
4 VIABILIDAD Y COSTOS.	140
4.1 COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL.....	141
4.1.1 Equipos y maquinaria.....	141
4.1.1.1 Reactor de pirólisis.....	141
4.1.1.2 Torre de destilación.....	143
4.1.1.3 Intercambiador de calor.....	144
4.1.1.4 Tanque de almacenamiento de aceite pirolítico.	145
4.1.1.5 Tanque de almacenamiento de gasolina.....	146
4.1.1.6 Tanque de almacenamiento de diésel.....	148
4.1.1.7 Tanque de almacenamiento del kerosene.	150
4.1.1.8 Costo de tuberías de la planta.....	152
4.1.1.9 Empresas constructoras de equipos de la planta de pirolisis no catalítica.	
	153

4.1.2	Instalaciones	155
4.1.3	Gastos pre - operación.....	155
4.1.3.1	Permisos y licencias ambientales.....	155
4.1.3.2	Capacitación de personal.....	157
4.2	COSTOS DE OPERACIÓN.....	157
4.2.1	Materia prima	157
4.2.2	Energía y utilidades.....	158
4.2.3	Mano de obra	159
4.2.4	Mantenimiento y reparaciones.	159
4.2.4.1	Mantenimiento Regular y Preventivo.....	159
4.2.4.2	Reparaciones correctivas.....	160
4.3	INGRESOS ECONÓMICOS.....	160
4.3.1	Venta de productos	160
4.3.2	Venta de subproductos y residuos.	161
4.3.2.1	Carbón (Biochar)	161
4.3.2.2	Aceites pesados.....	161
4.4	FACTIBILIDAD ECONOMICA.....	162
4.4.1	Costos de inversión inicial.....	162
4.4.2	Costos Operativos Anuales.....	163

4.4.3	Ingresos anuales.....	163
4.4.4	Resumen financiero.	164
5	5. Conclusión.....	166
6	6. RECOMENDACIONES.	168
7	BIBLIOGRAFÍA	170
8	ANEXOS	176

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 COMUNIDAD DE "ECO-RECOLECTORAS" DEL MUNICIPIO DE COCHABAMBA.....	3
ILUSTRACIÓN 2 MUNICIPIO DE COCHABAMBA.....	12
ILUSTRACIÓN 3 UBICACIÓN GEOGRAFÍA DE UN CENTRO DE ACOPIO DE PLÁSTICOS DE LA COMUNIDAD DE "ECO-RECOLECTORAS".....	13
ILUSTRACIÓN 4 TRAMPA GEOLÓGICA (ANTICLINAL).	21
ILUSTRACIÓN 5 EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN BOLIVIA DESDE 1990 HASTA EL AÑO 2023.....	23
ILUSTRACIÓN 6 ESKEMA DEL PROCESO DE REFINACIÓN DE PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS.....	27
ILUSTRACIÓN 7 AEROGENERADOR EÓLICO TERRESTRE.	32
ILUSTRACIÓN 8 AEROGENERADORES EÓLICOS MARINOS.	33
ILUSTRACIÓN 9 PANELES FOTOVOLTAICOS GENERADORES DE ELECTRICIDAD.....	34
ILUSTRACIÓN 10 COLECTOR O CAPTADOR SOLAR.	35
ILUSTRACIÓN 11 SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR HIBRIDA.	36
ILUSTRACIÓN 12 CENTRAL HIDROELÉCTRICA.	37
ILUSTRACIÓN 13 EQUIPO DE PERFORACIÓN EN UN ÁREA GEOTÉRMICO.	38
ILUSTRACIÓN 14 SONDAS GEOTÉRMICAS.	39
ILUSTRACIÓN 15 ESKEMA DE UN PROCESO DE PIROLISIS CATALÍTICA.	52
ILUSTRACIÓN 16 ESKEMA DEL PROCESO DE PIRÓLISIS NO CATALÍTICA.	53
ILUSTRACIÓN 17 MUESTRA DE BIOCOMBUSTIBLE ELABORADO POR ELEMENTUM.....	54
ILUSTRACIÓN 18 PLANTA ECUATORIANA DE CONVERSIÓN DE PLÁSTICO EN BIOCOMBUSTIBLE.	55

ILUSTRACIÓN 19 SELECCION DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.....	57
ILUSTRACIÓN 20 PRESENTACIÓN DEL TERRENO DONDE SE DISEÑA LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.....	58
ILUSTRACIÓN 21 SEPARACIÓN MANUAL DE LOS TIPOS DE PLÁSTICOS RECICLADOS.....	60
ILUSTRACIÓN 22 MÁQUINA TRITURADORA DE PLÁSTICO.....	61
ILUSTRACIÓN 23 MAQUINA LAVADORA DE PLÁSTICO RECICLADO	62
ILUSTRACIÓN 24 LAVADO DE MANUAL DE RESIDUOS PLÁSTICOS.....	62
ILUSTRACIÓN 25 REACTOR BATCH.....	63
ILUSTRACIÓN 26 DISEÑO DEL REACTOR DE PIROLISIS NO CATALÍTICA... ..	64
ILUSTRACIÓN 27 DISEÑO DE ACOPLAMIENTO DE MEDIDORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN EL REACTOR.....	67
ILUSTRACIÓN 28 TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.	68
ILUSTRACIÓN 29 INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBULAR.	70
ILUSTRACIÓN 30 TANQUE DE ALMACENAMIENTO.	71
ILUSTRACIÓN 31 DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE KEROSENE.....	73
ILUSTRACIÓN 32 DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL.	75
ILUSTRACIÓN 33 DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASOLINA.....	77
ILUSTRACIÓN 34 DISEÑO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN DE COMBUSTIBLE.	83
ILUSTRACIÓN 35 VISTA LATERAL DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.....	84
ILUSTRACIÓN 36 VISTA AÉREA DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.	85

ILUSTRACIÓN 37 VISTA GENERAL DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA	86
ILUSTRACIÓN 38 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PIROLISIS NO CATALÍTICA EN LA COMUNIDAD DE “ECO-RECOLECTORAS” DEL MUNICIPIO DE COCHABAMBA.....	87
ILUSTRACIÓN 39 COMUNIDAD DE "ECO-RECOLECTORAS" ACOPIANDO BOTELLAS (PET)	88
ILUSTRACIÓN 40 PUNTOS DE ACOPIO Y CONTENEDORES MUNICIPALES DE PLÁSTICOS.....	89
ILUSTRACIÓN 41 COMPORTAMIENTO DEL POLIETILENO (PE) EN EL REACTOR PIROLÍTICO	93
ILUSTRACIÓN 42 COMPORTAMIENTO DEL POLIPROPILENO (PP) EN EL REACTOR PIROLÍTICO	94
ILUSTRACIÓN 43 COMPORTAMIENTO DEL POLIETILENO (PE) EN EL REACTOR PIROLÍTICO	99
ILUSTRACIÓN 44 COMPORTAMIENTO DEL POLIPROPILENO (PP) EN EL REACTOR PIROLÍTICO	100
ILUSTRACIÓN 45 PLÁSTICO A COMBUSTIBLE	136
ILUSTRACIÓN 46 CARBÓN RESIDUAL DE PIROLISIS.....	138

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
TABLA 2 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO.....	10
TABLA 3 TIPOLOGÍA DEL PROYECTO.....	16
TABLA 4 DECLARACIÓN DE USO DE INSTRUMENTOS.....	18
TABLA 5 PRINCIPALES PRODUCTOS DE LA REFINACIÓN PETROLERA (SE INDICA ENTRE PARÉNTESIS EL NÚMERO DE ÁTOMOS DE CARBONO DE LOS HIDROCARBUROS COMPONENTES)	27
TABLA 6 TIPOS DE PLÁSTICOS MAYORMENTE UTILIZADOS EN EL MUNICIPIO DE COCHABAMBA.....	59
TABLA 7 ESPECIFICACIONES DEL REACTOR DISEÑADO.....	90
TABLA 8 PUNTOS DE FUSIÓN Y DEGRADACIÓN DE LOS POLÍMEROS.	91
TABLA 9 COMPORTAMIENTO DEL POLIETILENO Y POLIPROPILENO DENTRO DEL REACTOR.....	92
TABLA 10 REPRESENTACIÓN APROXIMADA DE LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE PIROLÍTICO DE PE Y PP	97
TABLA 11 COMPORTAMIENTO DEL POLIESTIRENO Y POLIETILENTEREFALATO DENTRO DEL REACTOR	98
TABLA 12 PORCENTAJES DE COMPONENTES QUE POSEE EL ACEITE DE LA PRIMERA TANDA DE PE Y PP	119
TABLA 13 MASA DE CADA COMPONENTE DEL ACEITE PIROLÍTICO RESULTANTE DE PE Y PP.....	120
TABLA 14 PORCENTAJES DE COMPONENTES QUE POSEE EL ACEITE DE LA SEGUNDA TANDA DE PS Y PET	121
TABLA 15 MASA DE CADA COMPONENTE DEL ACEITE PIROLÍTICO RESULTANTE DEL PS Y PET	122
TABLA 16 DENSIDADES PROMEDIO DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL PE Y PP	123

TABLA 17 DENSIDADES PROMEDIO DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL PS	124
TABLA 18 DENSIDADES PROMEDIO DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL PET	125
TABLA 19 DENSIDAD PROMEDIO DEL ACEITE PIROLÍTICO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO N°1	127
TABLA 20 VOLUMEN TOTAL DE ACEITE PIROLÍTICO QUE INGRESA AL TANQUE N°1	127
TABLA 21 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS HIDROCARBUROS DEL ACEITE PIROLÍTICO RESULTANTE DE PE Y PP	128
TABLA 22 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS HIDROCARBUROS DEL ACEITE PIROLÍTICO RESULTANTE DE PE Y PP	130
TABLA 23 VOLÚMENES DE COMBUSTIBLES OBTENIDOS POR LA SIMULACIÓN TEÓRICA	132
TABLA 24 MEDIDAS DE OCTANAJE DE LOS HIDROCARBUROS COMPONENTES DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA PRIMERA TANDA.	133
TABLA 25 MEDIDAS DE OCTANAJE DE LOS HIDROCARBUROS COMPONENTES DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA SEGUNDA TANDA.	134
TABLA 26 EMPRESAS CONSTRUCTORAS DE EQUIPOS INDUSTRIALES..	153
TABLA 27 COSTOS Y VOLUMEN DE LOS COMBUSTIBLES PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA	160
TABLA 28 COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL.....	162
TABLA 29 COSTOS OPERATIVOS ANUALES.....	163
TABLA 30 INGRESOS ANUALES DE VENTA DE COMBUSTIBLES.....	163
TABLA 31 RESUMEN FINANCIERO DEL PROYECTO	164

ÍNDICE DE ECUACIONES.

ECUACIÓN 1 VOLUMEN REQUERIDO PARA PROCESAR LA MATERIA PRIMA.	64
ECUACIÓN 2 VOLUMEN DEL REACTOR CILÍNDRICO.	65
ECUACIÓN 3 DIÁMETRO EXTERNO DEL REACTOR PIROLÍTICO.	66
ECUACIÓN 4 DIÁMETRO INTERNO DEL REACTOR PIROLÍTICO.	66
ECUACIÓN 5 ALTURA DEL REACTOR PIROLÍTICO.	66
ECUACIÓN 6 PESO DE LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.	68
ECUACIÓN 7 CÁLCULO DEL DIÁMETRO INTERNO DE LAS TUBERÍAS.	69
ECUACIÓN 8 VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO Nº1	71
ECUACIÓN 9 DISEÑO DE LA ALTURA DEL TANQUE.	72
ECUACIÓN 10 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE KEROSENE.	73
ECUACIÓN 11 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE DE KEROSENE.	74
ECUACIÓN 12 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL.	74
ECUACIÓN 13 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE DE DIÉSEL.	75
ECUACIÓN 14 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASOLINA.	76
ECUACIÓN 15 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE DE GASOLINA.	76
ECUACIÓN 16 NUMERO MÍNIMO DE PLACAS SEGÚN FENSKE	78
ECUACIÓN 17 CÁLCULO DE FRACCIÓN MOLAR DE LA GASOLINA	78
ECUACIÓN 18 CÁLCULO DE FRACCIÓN MOLAR DEL DIÉSEL	80
ECUACIÓN 19 CALCULO DE ALTURA OCUPADA DE LAS PLACAS DENTRO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN.	81

ECUACIÓN 20 CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA TORRE DE DESTILACIÓN ..	82
ECUACIÓN 21 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN.	82
ECUACIÓN 22 CALCULO DE LA PRESIÓN FINAL SEGÚN LA LEY DE LOS GASES IDEALES.....	91
ECUACIÓN 23 PROMEDIO DE CALOR ESPECIFICO ENTRE EL POLIETILENO Y POLIPROPILENO PARA LA PRIMERA TANDA.....	94
ECUACIÓN 24 CALCULO DE CALOR NECESARIO.....	95
ECUACIÓN 25 CALCULO DEL PODER CALORÍFICO.....	95
ECUACIÓN 26 CALCULO DE LA PRESIÓN FINAL SEGÚN LA LEY DE LOS GASES IDEALES.....	97
ECUACIÓN 27 PROMEDIO DE CALOR ESPECIFICO ENTRE EL POLIETILENO Y POLIPROPILENO PARA LA PRIMERA TANDA.....	100
ECUACIÓN 28 CALCULO DE CALOR NECESARIO.....	101
ECUACIÓN 29 CALCULO DEL PODER CALORÍFICO.....	101
ECUACIÓN 30 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIETILENO.....	103
ECUACIÓN 31 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIPROPILENO	104
ECUACIÓN 32 CÁLCULO DE LOS MOLES DEL POLIETILENO Y PROPILENO.	104
ECUACIÓN 33 CALCULO DE LOS MOLES DE GAS SEGÚN LA LEY DE GASES IDEALES,.....	105
ECUACIÓN 34 CAMBIO DE NUMERO DE MOLES EN EL REACTOR	106
ECUACIÓN 35 CALCULO DEL FLUJO MOLAR DE SALIDA DEL REACTOR..	106
ECUACIÓN 36 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSICO.....	106
ECUACIÓN 37 MASA MOLAR PROMEDIO.....	107
ECUACIÓN 38 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIESTIRENO	108
ECUACIÓN 39 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIETILENTEREFTALATO.....	108

ECUACIÓN 40 CÁLCULO DE LOS MOLES DEL POLIESTIRENO Y POLIETILENTEREFALATO.....	109
ECUACIÓN 41 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSICO DE LA SEGUNDA TANDA DE PS Y PET.....	109
ECUACIÓN 42 MASA MOLAR PROMEDIO.....	110
ECUACIÓN 43 CÁLCULO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO.....	111
ECUACIÓN 44 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SALIDA DE LOS GASES EN BASE A LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	111
ECUACIÓN 45 CÁLCULO DEL ÁREA DE SALIDA DE LOS GASES DEL REACTOR	112
ECUACIÓN 46 CÁLCULO DEL CALOR SENSIBLE DEL PE y PP.	113
ECUACIÓN 47 CÁLCULO DEL CALOR LATENTE (CONDENSACIÓN DEL GAS)	113
ECUACIÓN 48 CÁLCULO DEL FLUJO DE AGUA NECESARIO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	114
ECUACIÓN 49 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DEL GAS CONDENSADO.	114
ECUACIÓN 50 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DE GAS NO CONDENSADO	115
ECUACIÓN 51 CÁLCULO DEL CALOR SENSIBLE.	116
ECUACIÓN 52 CÁLCULO DEL CALOR LATENTE.....	116
ECUACIÓN 53 CÁLCULO DEL FLUJO DE AGUA NECESARIO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	117
ECUACIÓN 54 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DEL GAS CONDENSADO.	117
ECUACIÓN 55 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DE GAS NO CONDENSADO	118
ECUACIÓN 56 MASA TOTAL DEL ACEITE PIROLÍTICO OBTENIDO DEL PE Y PP	119

ECUACIÓN 57 MASA TOTAL DE LOS GASES Y RESIDUOS PIROLÍTICOS OBTENIDO DEL PE Y PP	119
ECUACIÓN 58 CÁLCULO DE LA DENSIDAD PROMEDIO DEL ACEITE PIROLÍTICO DE LA PRIMERA TANDA DE PE Y PP	123
ECUACIÓN 59 VOLUMEN DEL ACEITE DESCARGADO EN LA PRIMERA TANDA	123
ECUACIÓN 60 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL ACEITE PIROLITICO PROMEDIO DEL POLIESTIRENO	124
ECUACIÓN 61 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL ACEITE PIROLITICO PROMEDIO DEL POLIETILENTEREFTALATO	125
ECUACIÓN 62 VOLUMEN DEL ACEITE DESCARGADO EN LA SEGUNDA TANDA.....	126
ECUACIÓN 63 CÁLCULO DEL RON DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA PRIMERA TANDA.....	134
ECUACIÓN 64 CÁLCULO DEL RON DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA SEGUNDA TANDA.....	135
ECUACIÓN 65 CÁLCULO DEL VOLUMEN EXTERNO DEL REACTOR.....	141
ECUACIÓN 66 VOLUMEN TOTAL DE ACERO EN EL REACTOR PIROLÍTICO.	142
ECUACIÓN 67 MASA TOTAL DE ACERO INOXIDABLE 304 DEL REACTOR PIROLÍTICO.....	142
ECUACIÓN 68 CÁLCULO DEL ÁREA DE LA TORRE DE DESTILACIÓN SIN SUS TAPAS.	143
ECUACIÓN 69 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DE LA TORRE DE DESTILACIÓN.	143
ECUACIÓN 70 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO Nº 1, SIN TAPAS.	145
ECUACIÓN 71 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO Nº1.....	145
ECUACIÓN 72 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASOLINA.....	147

ECUACIÓN 73 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE GASOLINA.....	147
ECUACIÓN 74 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL	148
ECUACIÓN 75 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE DIÉSEL.....	149
ECUACIÓN 76 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE KEROSENE.....	150
ECUACIÓN 77 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE KEROSENE.....	150

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El mundo ha demostrado una creciente dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía a lo largo de los años. Como respuesta, la ciencia ha desarrollado diversas formas de obtener energía alternativa prometedora, como la eólica, solar, geotérmica y la producción de biocombustibles.

Actualmente, existe una preocupación constante por la contaminación ambiental causada por la basura y los residuos plásticos. Esto ha generado una necesidad urgente a nivel mundial de encontrar soluciones para mitigar los daños ambientales que producen.

Este proyecto propone el diseño de una planta de generación de biocombustibles (gasolina) mediante pirolisis no catalítica, con el objetivo de contribuir a la solución de dos problemas que afectan a la sociedad cochabambina y boliviana: la escasez de combustible en el municipio y la excesiva contaminación debido a la mala gestión de basura y plásticos.

La pirolisis no catalítica es un proceso térmico que degrada residuos plásticos en ausencia de oxígeno, permitiendo así la producción de gasolina de buena calidad. Esta gasolina puede ser utilizada en diversos sectores, desde el transporte hasta la generación de energía.

La materia prima para este proceso es obtenida a través de las “ECO-RECOLECTORAS”, una comunidad compuesta en su mayoría por mujeres que se dedican a recolectar materiales reciclables. Estos materiales son llevados a un centro de acopio, donde se venden según su peso.

ILUSTRACIÓN 1 COMUNIDAD DE "ECO-RECOLECTORAS" DEL MUNICIPIO DE COCHABAMBA.

Fuente: Bolivia verifica, 2023.

Esta planta de generación de gasolina, además de ofrecer una solución efectiva para el manejo de desechos plásticos, genera beneficios económicos y sociales significativos. Entre estos beneficios se incluyen la creación de nuevos empleos, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de la economía circular.

Este documento detalla y evidencia el diseño de una planta de biocombustible (gasolina) a partir del plástico recolectado de las calles y botaderos del municipio. Además, analiza los impactos económicos, sociales y ambientales que se pretende lograr con su implementación.

1.1 ANTECEDENTES.

Los antecedentes del proyecto se desglosan de la siguiente forma:

1.1.1 Antecedentes Generales.

Bolivia es un país gasífero que carece de la producción suficiente de combustibles líquidos para abastecer su mercado interno, por lo cual recurre a la importación de combustibles donde Estados Unidos el principal proveedor de gasolina.

El segundo producto más importado en el país en la gestión 2023 fue la gasolina y el principal vendedor de este combustible es Estados Unidos con el 31,3% de volumen importado, seguido de Argentina y Suiza. El valor fue \$us 1.286 millones. (Economy, 2023).

La gestión de los residuos plásticos en Bolivia representa un desafío ambiental, debido a la falta de infraestructuras para su tratamiento y descomposición, ya que estos desechos plásticos en su mayoría van a parar en vertederos de agua y calles de las ciudades, causando una contaminación alta. Conjuntamente con estos problemas de contaminación ambiental también persiste la escasez de combustibles líquidos, los cuales afectan negativamente a la población y la economía local.

La pirolisis no catalítica es una técnica prometedora para convertir los desechos plásticos en biocombustibles, como la gasolina diésel y gas natural. Este proceso implica la descomposición térmica de plásticos, a altas temperaturas y en un ambiente de baja presión sin oxígeno.

La pirolisis no catalítica puede ser especialmente adecuada para áreas con recursos limitados como Cochabamba, debido a su relativa simplicidad y menor costo de implementación en comparación con otras tecnologías de reciclaje.

Considerando estos factores, surge la necesidad de proponer el diseño de una planta de biocombustible basada en el proceso de pirolisis no catalítica en el municipio de Cochabamba. Este proyecto busca abordar tanto los problemas de manejo de residuos plásticos y la alta demanda de gasolina que existe en el municipio.

1.1.2 Antecedentes Específicos.

La escasez de combustible que afecta a nivel nacional se debe a diversos factores en la actualidad, ya sean políticos o económicos, solo en Cochabamba, la demanda

de gasolina es de aproximadamente de 1 millón de litros por día. (Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia, 2024)

La pirolisis no catalítica no es algo nuevo en Bolivia, el año 2020 ante las costosas importaciones de combustible líquido por parte de Bolivia, se instaló una planta piloto en Tarija que mediante el proceso denominado pirolisis, obtiene diésel y gasolina de residuos plásticos a cargo de la empresa Efficient Energy y que conquistó resultados alentadores gestionando eficientemente los restos de polímero. La pirolisis es una técnica de reciclaje en la que se produce la descomposición térmica de los polímeros (plásticos) en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, normalmente a temperaturas entre 300 y 900°C., en otras palabras, es un procedimiento de destilación que permite transformar residuos plásticos en carburante. (ENERGIA BOLIVIA, 2020).

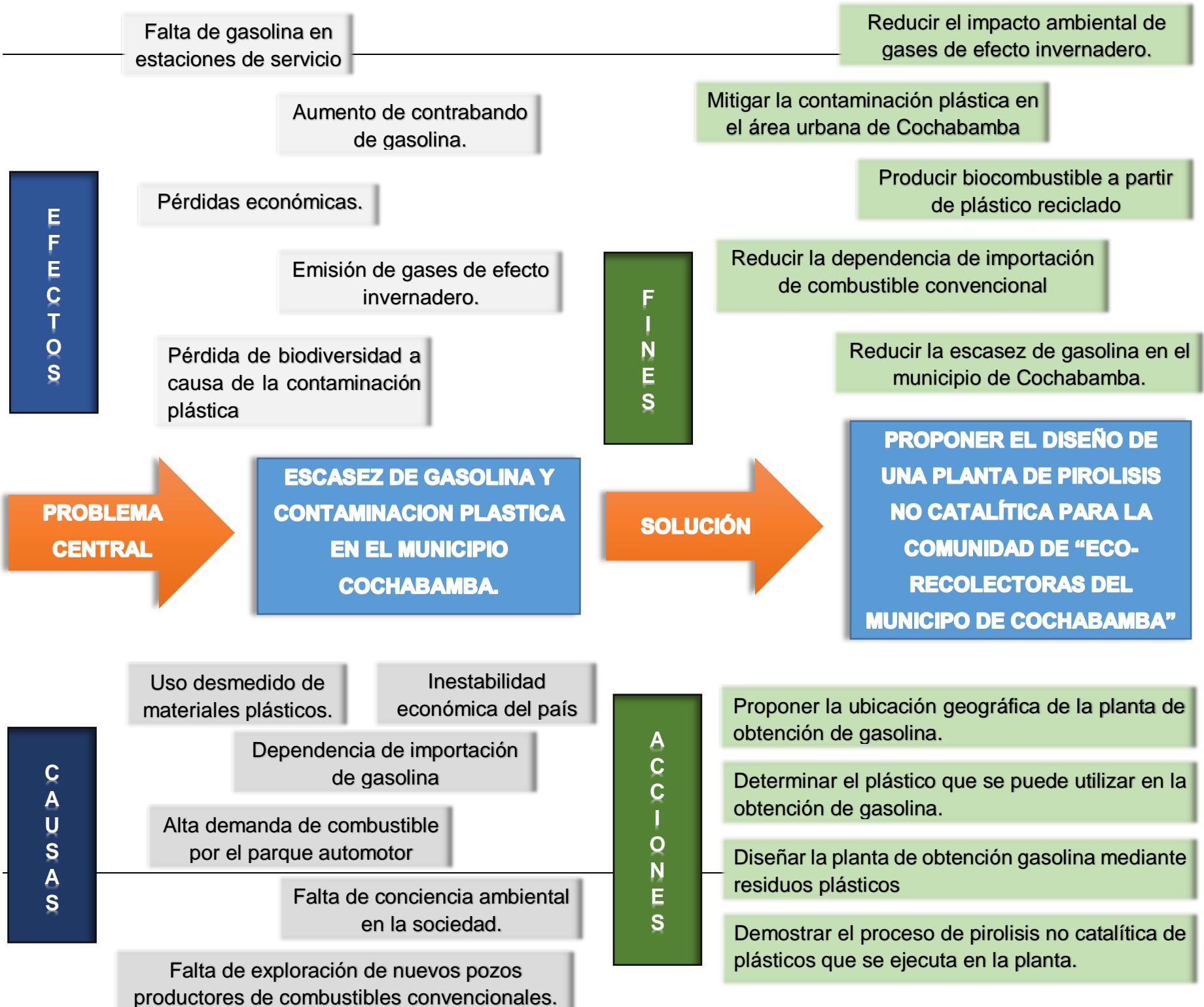
1.2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.

1.2.1 Situación problemática.

La situación hidrocarburifera de Bolivia al paso de los años ha ido decayendo tanto con la falta de descubrimiento de nuevos pozos hidrocarburíferos, como también con la recurrente escasez de gasolina. Esta escasez de gasolina en Bolivia tiene un impacto tanto social como económico, ya que el estado boliviano subvenciona los combustibles líquidos a nivel nacional.

Por otra parte, la situación problemática actual se origina debido a una mezcla de factores que incluyen la dependencia de la importación de combustibles, la inestabilidad socio-política y la falta del dolar.

A continuación, se presenta un árbol de problemas:



1.2.2 Objeto de estudio.

El diseño de una Planta de Pirolisis no Catalítica ayuda en varios aspectos a el municipio de Cochabamba, ya que actualmente no cuenta con un eficiente manejo de los residuos plásticos, lo cual se puede evidenciar en el centro de la ciudad. Con este proyecto se pretende reducir esta contaminación. Esta planta utiliza el plástico desechado y lo convierte en un biocombustible que puede ser empleado en cualquier tipo de motorizado sin ningún problema.

También se pretende promocionar una Economía Circular ya que fomenta a cambiar la mentalidad de la sociedad y dejar de ver a los residuos plásticos como desechos, sino como recursos valiosos.

La construcción de una Planta de Pirolisis no Catalítica a partir del plástico es importante para hacer frente a los desafíos ambientales, económicos y energéticos que enfrenta el municipio de Cochabamba, como también ofrece una solución innovadora y sostenible para el manejo de los residuos plásticos y la producción de gasolina.

1.2.3 Pregunta de investigación.

¿Con el diseño de una planta de pirolisis no catalítica en la comunidad de “Eco – Recolectoras” de Cochabamba se podrá reducir significativamente el desabastecimiento de gasolina y al mismo tiempo minimizar la contaminación de residuos plásticos?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.**1.3.1 Objetivo general.**

- ❖ Proponer el diseño de una planta de obtención de gasolina con especificaciones técnicas de octanaje de la Agencia Nacional de Hidrocarburos a través del plástico reciclado, mediante el proceso de pirolisis no catalítica para la comunidad de “Eco-Recolectoras” del municipio de Cochabamba.

1.3.2 Objetivos específicos.

- ❖ Proponer la ubicación geográfica de la planta de obtención de gasolina
- ❖ Determinar el plástico que se puede utilizar en la obtención de gasolina
- ❖ Diseñar la planta para de obtención de gasolina mediante residuos plásticos
- ❖ Demostrar el proceso de pirolisis no catalítica de plásticos que se ejecuta en la planta.

TABLA 1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

OBJETIVOS ESPECIFICOS.	ACCIONES DE LA INVESTIGACION.
PROPONER LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PLANTA DE OBTENCIÓN DE GASOLINA.	<ul style="list-style-type: none">• Seleccionar la ubicación considerando los factores ambientales.• Presentar la zona dentro del terreno de acopio donde se planea diseñar la planta de pirolisis no catalítica.• Analizar la infraestructura del centro de acopio de plásticos.

<p>DETERMINAR EL PLÁSTICO QUE SE PUEDE UTILIZAR EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE GASOLINA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar los tipos de plásticos reciclables • Evaluar la calidad del plástico reciclado • Limpiar y separar los plásticos reciclados para eliminar las impurezas • Triturar el plástico reciclado para facilitar su procesamiento.
<p>DISEÑAR LA PLANTA DE OBTENCIÓN DE GASOLINA MEDIANTE RESIDUOS PLÁSTICOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar el tipo de horno para el proceso de pirolisis no catalítica. • Calcular los tamaños de los equipos empleados en la planta. • Presentar la propuesta de diseño final de la planta de pirolisis no catalítica
<p>DEMOSTRAR EL PROCESO DE PIROLISIS NO CATALÍTICA DE PLÁSTICOS QUE SE EJECUTA EN LA PLANTA.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar las variables de presión y temperatura del reactor principal. • Mostrar el proceso de despolimerización que sufre la materia prima. • Evidenciar los productos resultantes del proceso de pirolisis no catalítica.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

1.4 DELIMITACIÓN.**TABLA 2 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO.**

LÍMITES	JUSTIFICACIÓN
Este proyecto se plantea implementar en la comunidad de “Eco-Recolectoras” del “Municipio de Cochabamba”	La propuesta de diseño de una planta de pirolisis no catalítica en la comunidad de “Eco-Recolectoras” en el municipio de Cochabamba se basa en la problemática que sufre el municipio con la falta de gasolina en las estaciones de servicio y como también con la acumulación de desechos plásticos. Primero se pretende adaptar a nivel municipal y si existen buenos resultados, emplear esta planta a nivel departamental o nacional en otros proyectos a futuro.
Reducir la demanda de gasolina en el municipio, mediante la recolección de plásticos coadyuvando a minimizar el impacto ambiental.	Diseñando una planta de Pirolisis no Catalítica en la comunidad de “Eco-Recolectoras” en el municipio de Cochabamba, se producirá biocombustibles que se pueden emplear en los automotores, ayudando al medio ambiente disminuyendo la contaminación que producen los desechos plásticos.
Proponer el diseño de una planta piloto de Pirolisis no Catalítica en la	El diseño será de una planta piloto que pueda demostrar resultados

Comunidad de “Eco-Recolectoras” del municipio de Cochabamba.	favorables para la sociedad y el municipio, debido a factores económicos y sociales, solo se presentará el proyecto investigativo.
--	--

Fuente: elaboración propia, 2024.

1.4.1 Limitaciones.

- No se realiza trabajos de laboratorio.
- Solo se desarrollara un software de diseño (Sketchup)

1.4.2 Límite temporal.

La propuesta de este proyecto de implementación de una planta de pirolisis no catalítica se desarrolla en un lapso total de 6 meses, desglosado en 2 meses (MDG 1) donde se plantearán los objetivos del proyecto y acciones que se desarrollan en los restantes 4 meses (MDG 2) dentro de la gestión 2024.

1.4.3 Limite temático.

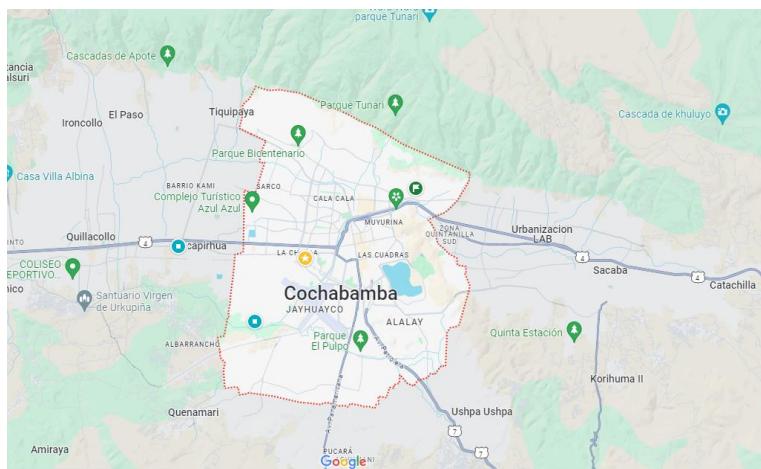
El presente proyecto es desarrollado en base a conocimientos adquiridos en las siguientes materias:

- Técnicas de investigación.
- Termodinámica.
- Ingeniería económica.
- Medio ambiente y desarrollo sostenible.
- Seguridad e higiene ocupacional.
- Petroquímica y polímeros (electiva).
- Evaluación de impacto ambiental.
- Medio ambiente en la industria petrolera.

1.4.4 Límite geográfico.

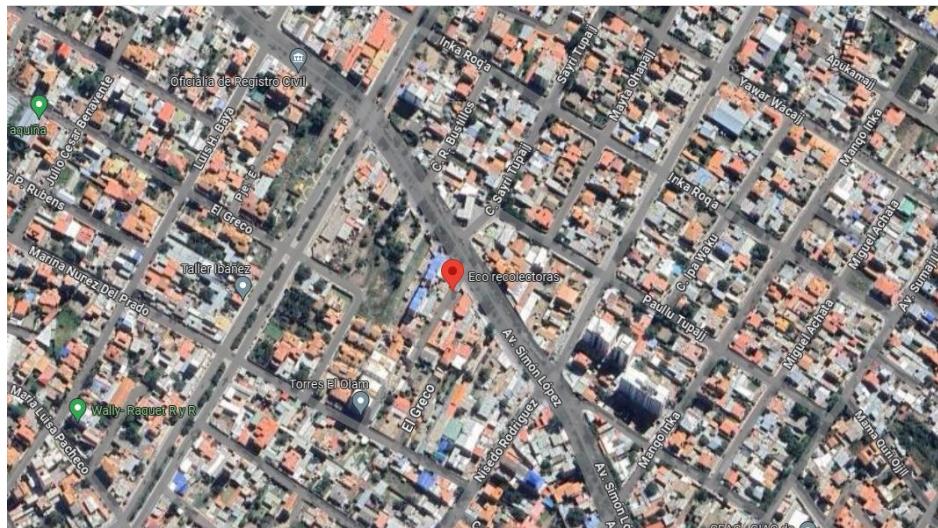
En la ilustración N°2 se presenta el límite geográfico donde se pretende desarrollar la propuesta del diseño de esta planta de pirolisis no catalítica en el municipio de Cochabamba.

ILUSTRACIÓN 2 MUNICIPIO DE COCHABAMBA.



Fuente: google maps, 2024.

En la ilustración N°3 se muestra la ubicación geográfica de un punto de acopio de plásticos de la comunidad de “Eco-Recolectoras” en el municipio de Cochabamba donde se pretende diseñar la planta de pirolisis no catalítica.

ILUSTRACIÓN 3 UBICACIÓN GEOGRAFÍA DE UN CENTRO DE ACOPIO DE PLÁSTICOS DE LA COMUNIDAD DE "ECO-RECOLECTORAS".

Fuente: google maps, 2024.

1.5 JUSTIFICACIÓN.

1.5.1 Justificación técnica.

El diseño de una planta de pirólisis no catalítica en el municipio de Cochabamba es una solución técnica, viable y sostenible para la gestión de residuos plásticos. Esta tecnología eficaz y comprobada permite la conversión de residuos plásticos en biocombustibles, como la gasolina, que son útiles para la sociedad. En varios países del mundo, este método de producción de biocombustibles se está adoptando cada vez más. La planta tiene la capacidad de adaptarse a diversos tipos de plásticos, como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y polietilentereftalato (PET), entre otros, lo que garantiza su versatilidad y eficiencia.

Además de ser versátil con todo tipo de plásticos, esta planta contribuye a la reducción de la contaminación ambiental en la ciudad. El diseño de la planta incluye métodos de control de emisiones durante la producción de biocombustibles, implementando tecnologías avanzadas de control de emisiones y sistemas de

purificación de gases. Todo esto se realiza con el fin de garantizar un proceso de producción ambientalmente responsable.

1.5.2 Justificación económica.

Implementar una planta de pirólisis no catalítica en el municipio de Cercado ofrece varios beneficios económicos. En primer lugar, reduce los costos de manejo de residuos, ya que estos deben ser recolectados, transportados y tratados para su eliminación, lo que implica un gasto económico significativo que se pretende disminuir mediante la generación de biocombustible.

Los ingresos provienen de la venta de este biocombustible, un producto de alto valor en el mercado, lo cual abre oportunidades de comercialización a nivel nacional. En Bolivia, se importan grandes cantidades de combustibles líquidos a diario, generando un gasto económico considerable debido a la subvención existente en el país. La producción de este biocombustible contribuirá a reducir dichos gastos.

1.5.3 Justificación social.

El proyecto de una planta de pirolisis no catalítica para la comunidad de “Eco-Recolectoras” en el municipio de Cochabamba no solo aborda temas ambientales, técnicos y económicos. También ofrece una serie de beneficios sociales que contribuyen al bienestar de la sociedad cochabambina reduciendo la contaminación ambiental y mejorando la calidad de vida. Todo esto a partir de una educación ambiental y sensibilizando a la sociedad sobre la importancia del reciclaje, como también con la generación de empleos no solo para la comunidad de “Eco-Recolectoras”, sino que también para la sociedad en general mejorando la economía local.

1.5.4 Justificación académica.

Esta propuesta de diseño de una planta de pirolisis no catalítica para la comunidad de Eco-Recolectoras” del municipio de Cochabamba es realizada en base a

conocimientos adquiridos durante la formación académica en la Universidad Privada Domingo Savio, permitiendo planificar, diseñar, verificar datos y calcular los costos estimados de esta planta. Todo esto con el fin de no solo concientizar a la sociedad universitaria, sino a toda la sociedad en general en cuanto a la generación de biocombustibles demostrando la importancia del cuidado del medio ambiente y que se puede emplear la ingeniería para solucionar problemas ambientales a través del diseño de plantas que procesen estos desechos convirtiéndolos en productos aprovechables para la sociedad.

1.5.5 Justificación ambiental.

La pirolisis no catalítica es un proceso químico que consiste convertir el plástico desecharo por el municipio en biocombustibles aprovechables para la sociedad, los cuales se producen sin generar emisiones significativas de gases de efecto invernadero, como también al producir la gasolina, obtiene un alto octanaje lo cual ayuda al medio ambiente reduciendo las emisiones de CO₂ (Dióxido de Carbono). Además, al producir combustibles a partir de plásticos desecharos se reduce un poco la dependencia de los combustibles convencionales y los tipos de contaminación que producen a la hora de su producción.

Todo este proceso ayuda bastante a reducir la cantidad de plásticos desecharos que existen en los vertederos, ríos, lagunas y calles del municipio contribuyendo a disminuir la contaminación del suelo y agua ya que los mismos tardan millones de años en degradarse causando un daño al medio ambiente.

1.6 TIPOLOGÍA DE PROYECTO.**TABLA 3 TIPOLOGÍA DEL PROYECTO.**

ALCANCES	JUSTIFICACIÓN.
ANALÍTICO	El alcance analítico que tiene el presente proyecto de diseño de una planta de pirolisis, abarca desde las evaluaciones de materia prima, la evaluación técnica del diseño de la planta y también la viabilidad económica.
DESCRIPTIVO.	Este proyecto se basa en describir todos los detalles sobre el objetivo general, centrándose en una ubicación y contexto se describe los tipos de materia prima junto con su disponibilidad y la tecnología empleada en la planta.

Fuente: elaboración propia, 2024.

1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

La metodología de investigación del proyecto se define como una cuantitativa.

1.7.1 Metodología cuantitativa.

La metodología de investigación cuantitativa en este proyecto ayuda a tener un enfoque estructurado en cuanto en todo lo relacionado a lo cuantitativo, ya que se siguen varios pasos investigativos para poder desarrollar este proyecto, ya sea recolectando datos, analizando la viabilidad técnica y económica, diseñando el

proyecto, realizando el plan de implementación, haciendo el monitoreo y control de la planta. Todos estos pasos investigativos se realizan a partir de herramientas cuantitativas adecuadas.

1.8 FUENTES DE INFORMACIÓN.

Las fuentes de información que se emplean en este proyecto provienen de dos fuentes principales que son:

1.8.1 Fuentes primarias.

1. **Libros-**. Proporciona todo lo teórico que conlleva el proyecto desde los conceptos básicos de pirolisis hasta el diseño de la planta.
2. **Agencia nacional de hidrocarburos (ANH)-**. Acerca de los parámetros de que debe cumplir el biocombustible obtenido por la planta de pirolisis no catalítica.
3. **Alcaldía del municipio-**. Obtención de información, desde la gestión que tienen con la materia prima hasta las cantidades producidas diariamente en el municipio.

1.8.2 Fuentes secundarias.

1. **Informes municipales-**. Publicaciones relacionadas con políticas de gestión de residuos, regulaciones ambientales y normativas específicas para el manejo de residuos plásticos.
2. **Investigaciones académicas-**. Investigaciones académicas sobre la pirolisis no catalítica realizadas en Bolivia o en otros países abordando los temas de pirolisis, calidades de productos y aspectos económicos.
3. **Estadísticas y datos demográficos publicados en internet-**. Obtener datos sobre cantidades y composiciones de los residuos plásticos generados en el municipio, como también la información demográfica que influya en el diseño y operación de la planta de pirolisis no catalítica.

1.9 TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.

TABLA 4 DECLARACIÓN DE USO DE INSTRUMENTOS.

TIPO	INSTRUMENTO	¿A QUIEN O A QUE?	¿PARA QUE?
TEORICO	Datos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).	Al proyecto a partir de fichas técnicas que especifican las calidades de octanaje de los biocombustibles en Bolivia.	Comparar el producto obtenido por la planta y verificar su calidad con los datos.
	Documentación	Al proyecto en general para establecer todas las normas y reglamentaciones técnicas.	Para requerimientos legales.
MATEMATICO	Ingeniería del proyecto	Cálculos matemáticos.	Para determinar parámetros de operación y producción de la planta.

Fuente: elaboración propia, 2024.

1.10 POBLACIÓN Y MUESTRA.

El tamaño de la población del presente proyecto solo abarcara todo el municipio de Cochabamba de la provincia de Cercado.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN

TEÓRICA.

2.1 PETRÓLEO.

El petróleo es un aceite mineral de color negro, menos denso que el agua. Está compuesto principalmente por carbono e hidrógeno, junto con cantidades variables de azufre, oxígeno y nitrógeno. (FORO NUCLEAR, 2024)

Las propiedades físicas del petróleo (color, densidad) pueden ser diversas, dependiendo de la concentración de los hidrocarburos que tenga, los cuales son:

- Parafinas (hidrocarburos saturados).
- Olefinas (hidrocarburos etilénicos que contienen un doble enlace carbono-carbono).
- Hidrocarburos acetilénicos (contienen un triple enlace carbono-carbono).
- Hidrocarburos cíclicos o ciclánicos.
- Hidrocarburos bencénicos o aromáticos.
- Compuestos oxigenados (derivados de hidrocarburos etilénicos por oxidación y polimerización).
- Compuestos sulfurados.
- Compuestos nitrogenados cíclicos.
- Contenido disuelto de nitrógeno, azufre, oxígeno, colesterina, porfirinas y trazas de níquel, vanadio, níquel, cobalto y molibdeno.

La compleja composición química del petróleo lo convierte en un recurso natural no renovable, ampliamente utilizado como materia prima en diversos sectores industriales y para la generación de energía.

2.1.1 Origen del petróleo.

El petróleo es considerado un hidrocarburo fósil debido a que su producción se debe a la acumulación de grandes cantidades de materia orgánica las cuales son:

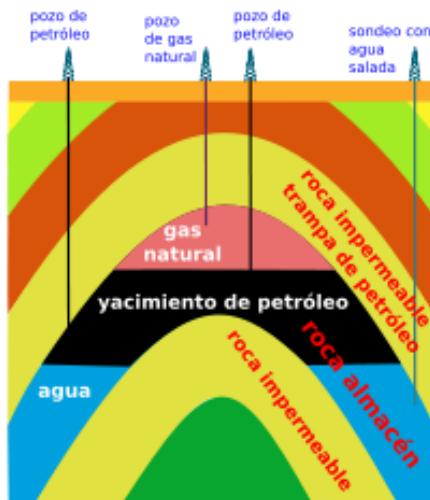
- Zooplancton (plancton de origen animal que se alimenta de materia orgánica elaborada)
- Algas provenientes de regiones lacustres (lagos o reservorios de agua dulce) desecadas con el pasar de los siglos, cuyos fondos anóxicos (sin oxígeno) fueron enterrados bajo capas de sedimentos.

Estas materias orgánicas enterradas bajo la superficie, sometidas a una presión y temperatura se originan procesos químicos y físicos de transformación produciendo betún, gases naturales e hidrocarburos como el petróleo.

2.1.2 Proceso de formación del petróleo.

El proceso químico de formación del petróleo es muy complejo. Las materias orgánicas mencionadas anteriormente, al ser enterradas, son sometidas a altas presiones y temperaturas, lo que genera este hidrocarburo. Posteriormente, el petróleo migra hacia trampas geológicas donde se acumula, sin posibilidad de escapar debido a los poros de la roca madre o roca almacén.

ILUSTRACIÓN 4 TRAMPA GEOLÓGICA (ANTICLINAL).



Fuente: Wikipedia, 2024.

Esta materia orgánica enterrada hace millones de años pasa las siguientes fases antes de ser un hidrocarburo:

2.1.2.1 Diagénesis (descomposición anaerobia).

A cierta profundidad en el subsuelo el oxígeno es escaso, lo cual las bacterias anaerobias son las que descomponen estas materias hasta transformarla en querógeno (mezcla de compuestos orgánicos presente en las rocas sedimentarias

2.1.2.2 Catagénesis (transformación del querógeno en combustible fósil)

El querógeno es un producto intermedio entre la materia orgánica y un combustible fósil. Debido a la catagénesis, el querógeno se puede convertir en antraceno y compuestos equivalentes, o en metano y compuestos similares. Así, a altas temperaturas se transforma en hidrocarburos líquidos y gas.

2.1.2.3 Metagénesis

Es el proceso en el que se forman gases debido a altas temperaturas.

2.1.3 Propiedades y usos del petróleo.

El petróleo es un líquido con una alta densidad y viscosidad lo cual tiene un gran poder calorífico ($11.000 \frac{Kcal}{Kg}$) que dependerá de las propiedades base que tengan, ya sea parafina (fluidos), asfáltica (viscosos) y a base mixta.

Los usos del petróleo son variados, pero en cuanto a combustibles, si se calienta progresivamente entre 20 °C a 400 °C el petróleo se separa en las siguientes fases:

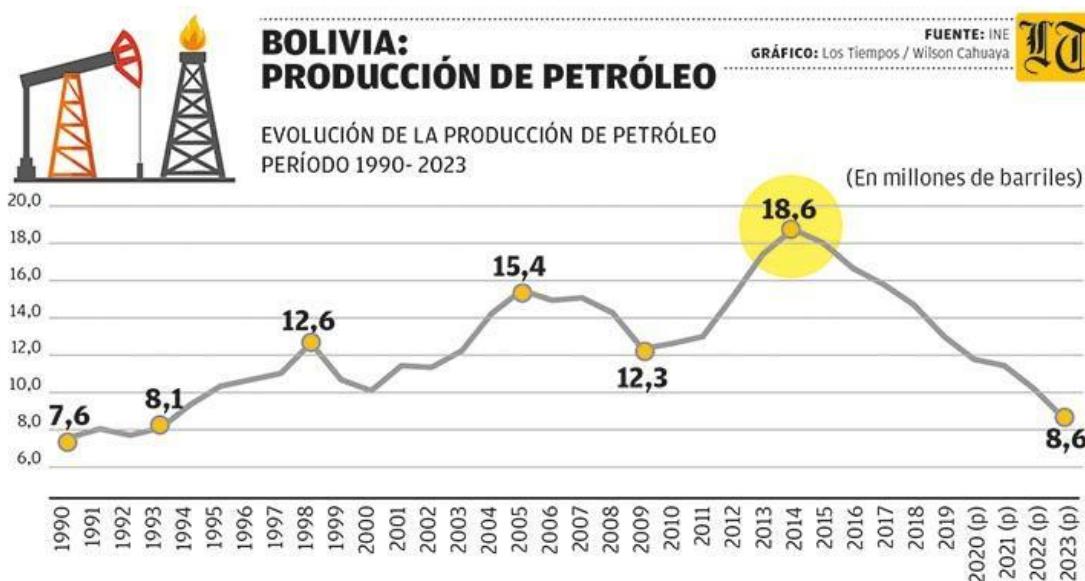
- **Gas natural 20 °C.**- Gases combustibles como el etano, propano y butano (gases licuados de petróleo).
- **Gasolina 200 °C.**- combustible generado para motores de combustión interna, varia en rango de acuerdo a su octanaje (pureza).

- **Keroseno 300 °C.**- Combustible de baja pureza y rendimiento, empleado como solvente o base para pesticidas.
- **Gasóleo (diésel) 370 °C.**- Combustible compuesto por parafinas, lo cual es ideal para calefacciones y motores de borda (motores de diésel).
- **Fueloil 400 °C.**- El combustible derivado más pesado que se puede derivar a presión atmosférica, el cual es empleado para obtener asfaltos, lubricantes y otras sustancias. (Editorial Etecé, 2021)

2.1.4 El petróleo en Bolivia.

En el año 2023 según un reporte del Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE), con base en datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) Bolivia produjo 8.6 millones de barriles de petróleo (Bbls).

ILUSTRACIÓN 5 EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN BOLIVIA DESDE 1990 HASTA EL AÑO 2023.



Fuente: INE-Los Tiempos, 2024.

En el año 2014 hubo una producción de 18 millones de barriles, lo cual a partir del año siguiente hubo una caída de producción debido a un agotamiento de estos pozos por la sobreproducción realizada ese año.

Esta baja producción de petróleo empuja a Bolivia a importar barriles de petróleo, por lo cual el presidente de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) en una entrevista anuncia la importación de 1.6 millones de barriles de petróleo para la gestión 2024 que serán procesados en las refinerías Guillermo Elder Bell de Santa Cruz y Gualberto Villarroel de Cochabamba. (Los Tiempos, 2024)

2.2 REFINACIÓN.

La refinación es el proceso de conversión del petróleo en productos intermedios o finales de uso directo, todo esto a través de operaciones físico químicas a las que se somete el petróleo para obtener sus derivados. (PDVSA, 2024)

2.2.1 Procesos de refinación.

Las unidades o plantas de refinación constituyen un tren de procesos de alta tecnología para obtener productos terminados. Sus procesos son físico-químicos de conversión térmica o catalítica los cuales son:

2.2.1.1 Destilación fraccionada

La destilación fraccionada es un proceso utilizado para separar mezclas complejas en sus componentes individuales, aprovechando las diferencias en sus puntos de ebullición. Este proceso es especialmente útil en la industria petroquímica y en la producción de combustibles, ya que permite obtener fracciones específicas como gasolina, kerosene y diésel a partir de mezclas como el petróleo crudo o el aceite pirolítico. (QuimicaFacil, 2020).

- **Principios Básicos de la Destilación Fraccionada**

1. **Diferencia en los Puntos de Ebullición:** La destilación fraccionada se basa en que los componentes de una mezcla tienen diferentes puntos de ebullición. Al calentar la mezcla, los componentes con puntos de ebullición más bajos se evaporan primero y pueden ser separados.
2. **Torre de Fraccionamiento:** La destilación fraccionada se lleva a cabo en una columna o torre de fraccionamiento, que está equipada con múltiples platos o bandejas que facilitan la separación de los componentes. Cada plato actúa como una mini etapa de destilación.
3. **Reflujo:** El vapor sube a través de la columna y se condensa en cada plato, mientras que el líquido en cada plato se recalienta y se vuelve a vaporizar. Este ciclo continuo de condensación y vaporización, conocido como reflujo, mejora la separación de los componentes.

2.2.1.2 Destilación al vacío

Se utiliza con la finalidad de recuperar lo destilado anteriormente con la destilación atmosférica, se utiliza cuando la producción de aceite lubricante o para las unidades de conversión.

2.2.1.3 Coquización

Es un proceso térmico de craqueo del carbón, se utiliza principalmente como pretratamiento de los residuos de la destilación al vacío para preparar corrientes de gasóleo o nafta.

2.2.1.4 Reformado catalítico

El objetivo principal de la reformación catalítica es de aumentar el octanaje de la gasolina.

2.2.1.5 Isomerización

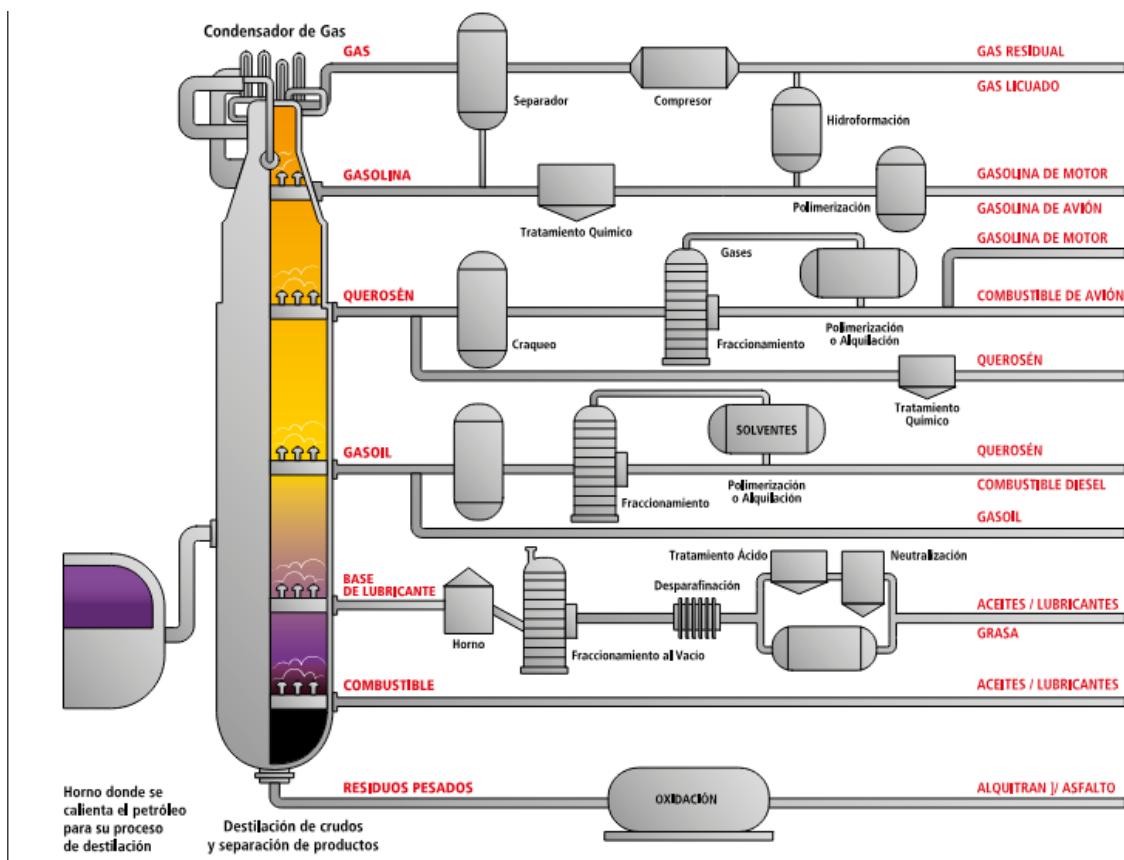
Persigue el mismo objetivo del reformado catalítico debido a que los motores de los autos requieren altos voltajes. La isomerización mejora el octanaje de la gasolina ligera convirtiendo las parafinas en isómeros

2.2.1.6 Cracking catalítico

Trata cargas cuyos puntos de ebullición están entre 300º y 500ºC es decir su procedencia proviene de los anteriores destiladores o reformadores empleados. Se realiza en base a vapor con una temperatura de 500ºC y una presión un poco mayor a la atmosférica, empleando catalizadores. Se obtiene gasolina ligera y residuos que recirculan.

Este proceso es uno de los más importantes de refinación ya que convierte aceites pesados en gasolinas y productos más ligeros. (Gallego, 2024)

ILUSTRACIÓN 6 ESQUEMA DEL PROCESO DE REFINACIÓN DE PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS.



Fuente: PDVSA, 2024.

2.2.2 Principales derivados el petróleo.

TABLA 5 PRINCIPALES PRODUCTOS DE LA REFINACIÓN PETROLERA (SE INDICA ENTRE PARÉNTESIS EL NÚMERO DE ÁTOMOS DE CARBONO DE LOS HIDROCARBUROS COMPONENTES).

DERIVADOS	DESCRIPCIÓN	USOS PRINCIPALES
GAS DE REFINERÍA (C1-C2)	Mezcla de metano (CH ₄) y etano (C ₂ H ₄)	Combustible para hornos o calderas y garrafas de uso doméstico
GAS LICUADO (C3-C4)	Mezcla de propano (C ₃ H ₈) y butano	Combustible de uso doméstico.

	(C ₄ H ₁₀); generalmente se comprime para ser manejado como líquido.	
GASOLINA DE MOTOR (C₄-C₁₀)	Líquido de composición variable según su intervalo de destilación.	Combustible para motores de combustión interna.
KEROSENE (C₉-C₁₇)	Líquido de color amarillento que se obtiene por el proceso primario de destilación con una gran estabilidad térmica.	Iluminación, calefacción, cocina y combustible para aviones con turbina.
GASOLINA DE AVIACIÓN O JET FUEL (C₈-C₁₆)	Líquido obtenido del querosén o las mezclas de querosén con nafta.	Combustible para aviones.
DIÉSEL (C₁₆-C₂₂)	Líquido con propiedades variables según las características del crudo utilizado.	Combustible utilizado en motores de combustión interna con encendido por compresión (camiones) y generación eléctrica.
PARAFINAS Y NAFTENICAS	Lubricantes con alto índice de viscosidad, alta estabilidad contra la oxidación.	Grasas y aceites.
ASFALTO (> C₁₅₀)	Mezcla de fracciones pesadas de petróleo.	Pavimentación e impermeabilización de carreteras.
COQUE	Producto del craqueo térmico de las fracciones más pesadas del crudo	Utilizada en la industria siderúrgica, fundición,

		papel, cemento, cerámica y cal.
PARAFINAS (C₂₀-C₄₀)	Mezcla de hidrocarburos sólidos y semisólidos de estructura cristalina a temperatura ambiente.	Velas, fósforos, productos de limpieza, aglomerados de madera, cauchos y textiles.

Fuente: PDVSA, 2024.

2.3 GASOLINA.

La gasolina es uno de los combustibles con mayor demanda a nivel mundial, este combustible se obtiene a través del proceso de la refinación del petróleo o generalmente se obtiene de la nafta de destilación directa, esta nafta también se obtiene a partir de la conversión de fracciones pesadas del petróleo a través de la destilación al vacío o craqueo catalítico.

La gasolina es una mezcla de varios hidrocarburos desde C₄ (butano) hasta C₁₁.

2.3.1 Composición química de la gasolina.

Generalmente la nafta es fracción del petróleo cuyo punto de ebullición se encuentra aproximadamente entre 28° y 177 °C. Al mismo tiempo, este subproducto se subdivide en nafta ligera (hasta unos 100 °C) y nafta pesada. La nafta ligera es uno de los componentes de la gasolina, con unos números de octano en torno a 70. La nafta pesada no tiene la calidad suficiente como para ser utilizada para ese fin, y su destino es la transformación mediante reformado catalítico, a la vez que se aumenta el octanaje de dicha nafta.

Además de la nafta reformada catalíticamente y la nafta ligera, otros componentes que se usan en la formulación de una gasolina comercial son la nafta ligera isomerizada, la gasolina de pirolisis desbencenizada, butano, butenos y etano.

La nafta ligera isomerizada se obtiene a partir de la nafta ligera de destilación directa, mediante un proceso que usa catalizadores sólidos en base platino/aluminio o zeolíticos. Es un componente libre de azufre, benceno, aromáticos y olefinas, con unos números de octano (MON/RON) en torno a 87/89.

La gasolina de pirolisis desbencenizada se obtiene como subproducto de la fabricación de etileno a partir de nafta ligera. Está compuesta aproximadamente por un 50% de aromáticos (tolueno y xilenos) y un 50% de olefinas (isobuteno, hexenos). Tiene en torno a 200 ppm de azufre. El benceno que contiene en origen suele ser purificado y vendido como materia prima petroquímica. Sus números de octano (MON/RON) están en torno a 85/105. (QUIMICA.ES, 2024).

2.3.2 Gasolina en Bolivia.

La situación actual de la gasolina en Bolivia es un tema delicado porque al ser un país gasífero no abastece la demanda interna de combustibles líquidos ya sea diésel y gasolina.

Bolivia importa estos combustibles principalmente de Estados Unidos y Chile donde estos países venden estos combustibles a precios internacionales, pero Bolivia subvenciona casi el 60% del precio por litro de estos combustibles. Esta subvención forma parte de la problemática de la escasez de combustibles líquidos en Bolivia ya que afecta económicoamente al país, lo cual estos países dejan de vender estos combustibles a Bolivia por falta de pagos. Conjuntamente con estas dificultades económicas que atraviesa el país también se le suman los problemas sociales y políticos, donde la mayoría de estos se realizan con paros y bloqueos, lo cual es perjudicial ya que al haber estos bloqueos de carreteras los camiones cisternas no pueden llegar a sus ciudades de destino y se quedan varados días y semanas en algunos casos. (Agencia de Noticias Fides, 2024).

2.4 ENERGÍAS ALTERNATIVAS.

Las energías alternativas o renovables son aquellas las cuales se obtienen a partir de fuentes naturales (sol, viento, agua o biomasa) las cuales tienen como principal característica que son inagotables y no producen daños ambientales de alto impacto a diferencia de los combustibles fósiles.

Los avances tecnológicos han logrado permitir facilitar los costos de producción y mantenimiento de los centros de manejo de estas energías.

El mundo está en un proceso de transición hacia un modelo energético de bajas emisiones de dióxido de carbono, la eficiencia energética y el uso de las distintas energías alternativas o renovables juegan un papel clave. En conjunto pueden llegar a reducir un 90% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) relacionadas con el uso de energías.

Existen dos tipos de fuentes de energía que son:

2.4.1 Fuentes de energía primaria.

Se entiende por energía primaria a todas las fuentes de energía naturales, en su forma original y sin alteraciones. Es decir, todas las que provee la naturaleza, antes de ser alteradas o transformadas.

En el sector energético las fuentes principales de energía primaria son:

2.4.1.1 Viento

Producido energía eólica que se basa en la energía cinética la cual es generada a partir de las fuertes corrientes de viento y transformarla en electricidad a través de generadores eléctricos. Esta energía es renovable y no llega a ser contaminante.

Existen 2 tipos de energía eólica:

1. **Energía eólica terrestre**, que es producida por un conjunto de aerogeneradores instalados en zonas de alta influencia eólica.

ILUSTRACIÓN 7 AEROGENERADOR EÓLICO TERRESTRE.



Fuente: Repsol,2024

2. **Energía eólica marina**, se produce de la misma forma que la eólica terrestre en cuanto al uso de los aerogeneradores con la diferencia que estos son instalados en medio del océano para aprovechar las altas cantidades de viento que existen en alta mar. (REPSOL, 2024)

ILUSTRACIÓN 8 AEROGENERADORES EÓLICOS MARINOS.



Fuente: Repsol,2024.

2.4.1.2 Sol.

El sol es una fuente principal de energía debido a su radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta) que emite. Esta energía es recolectada a través de paneles solares o colectores, se puede utilizar para obtener energía térmica a través de sistemas foto térmicos o para generar electricidad a través de sistemas fotovoltaicos.

La energía solar es uno de los principales tipos de energía renovable porque ayuda a impulsar economías más limpias que protejan el medio ambiente. La tecnología avanzada ha logrado que este tipo de energía renovable sea eficiente y económica.

Entre los tipos de energía solar existentes están:

1. Energía solar fotovoltaica-. Funciona por medio de un sistema fotovoltaico capaz de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Estos sistemas poseen paneles solares donde contienen células fotovoltaicas que al recibir la luz directa del sol se ioniza y libera electrones que interactúan entre si y generan energía eléctrica.

ILUSTRACIÓN 9 PANELES FOTOVOLTAICOS GENERADORES DE ELECTRICIDAD.



Fuente: Repsol, 2024.

2. Energía solar térmica-. Este tipo de energía consiste en usar colectores o captadores solares que transforman la radiación solar en calor, para calentar

el agua que posteriormente puede ser empleada como apoyo a los sistemas de calefacción o agua caliente de uso higiénico, residencial o industrial.

ILUSTRACIÓN 10 COLECTOR O CAPTADOR SOLAR.



Fuente: Repsol,2024.

3. **Energía solar hibrida-**. Es la combinación de la energía solar con la energía eólica para aprovechar al máximo los recursos del sol y el viento en zonas con alta radiación solar y viento. (REPSOL, 2024)

ILUSTRACIÓN 11 SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR HIBRIDA.



Fuente: Repsol, 2024.

2.4.1.3 Agua (Hidráulica).

Este tipo de energía primaria también conocida como hidroeléctrica, aprovecha la fuerza del agua en movimiento para poder producir electricidad. Este tipo de energía consiste en transformar la energía potencial en energía cinética rotacional aplicada a un eje. Esta energía es diferente a la mareomotriz y undimotriz ya que estas son desarrolladas en alta mar por el movimiento de las olas. Las centrales hidroeléctricas se clasifican según su flujo y según su potencia. (REPSOL, 2024).

ILUSTRACIÓN 12 CENTRAL HIDROELÉCTRICA.



Fuente: Repsol, 2024.

2.4.1.4 Calor (Geotérmica).

La geotermia es una energía renovable que es producida por el calor interior de la Tierra que está almacenado en las rocas, suelos y aguas subterráneas.

Este recurso está presente en cualquier parte de la Tierra, pero solo puede ser aprovechada en localizaciones con condiciones físicas concretas, es decir, en fuentes termales, géiseres y volcanes. Esta energía primaria renovable es una de las más importantes conjuntamente con la energía solar para lograr la senda a la descarbonización, ya que la misma puede llegar a cubrir grandes partes de demanda eléctrica en todo el mundo ya que una planta geotérmica productora de unos 10.000 MW es capaz de producir anualmente energía aproximadamente para unas 23.000 viviendas y su uso evitaría la emisión de unas 57.000 toneladas de CO_2 cada año.

La energía geotérmica se obtiene debido a que la tierra está formada por capas rocosas desde el centro hasta el exterior. Cuando llueve y el agua penetra la superficie filtrándose en la corteza terrestre, forma mantos, corrientes de aguas

profundas y acuíferos. Al entrar en contacto con las altas temperaturas del subsuelo crean un reservorio geotérmico de agua y vapor a altas temperaturas.

Al encontrar una localización con condiciones físicas se procede con la perforación de 10 a 15 centímetros de diámetro con una profundidad que depende a las condiciones físicas y geológicas de la zona.

ILUSTRACIÓN 13 EQUIPO DE PERFORACIÓN EN UN ÁREA GEOTÉRMICO.



Fuente: Repsol, 2024.

Después de la perforación se procede con la extracción a través de sondas geotérmicas en forma de tuberías. Estas sondas contienen agua o líquido anticongelante que al descender a las zonas profundas de alta temperatura se calienta y vuelve a subir produciendo un intercambio de calor.

ILUSTRACIÓN 14 SONDAS GEOTÉRMICAS.



Fuente: Repsol, 2024

Para transformar esta energía calorífica en electricidad se instala una planta geotérmica que recoge el agua y vapor generado y lo transforma en energía mecánica, mediante el uso de una turbina.

El agua y vapor son separados, el vapor generado es conducido a través de redes de tuberías para producir energía térmica o eléctrica. Por su parte el agua se utiliza de forma directa como agua sanitaria o de calefacción para viviendas en el área de producción, para luego ser reinyectada. (REPSOL, 2024)

2.4.2 Biocombustibles.

Los biocombustibles representan una fuente de energía renovable crucial, extraída de recursos naturales o residuos orgánicos, provenientes tanto de animales como de plantas. Estos constituyen portadores energéticos derivados de la biomasa, abarcando formas líquidas, sólidas y gaseosas, que se emplean para proporcionar servicios energéticos renovables, como calefacción, refrigeración y generación de electricidad.

2.4.2.1 Fuentes de biomasa y tipos de biocombustible.

Existen diversas fuentes de biomasa susceptibles de ser transformadas en biocombustibles mediante procesos termoquímicos, fisicoquímicos y bioquímicos. Entre estas fuentes se destacan los aceites vegetales de primera y segunda generación, entre otras.

Los biocombustibles líquidos se postulan como la opción principal para sustituir eficientemente los combustibles líquidos de origen petrolero empleados en el transporte. Esto se debe a que su adopción implicaría una inversión mínima en infraestructura adicional y ofrecería una vía inmediata para reducir las emisiones de carbono en el sistema de transporte.

No obstante, alternativas como los vehículos eléctricos, el hidrógeno y el biometano comprimido están ganando cada vez más terreno como opciones atractivas frente a los combustibles líquidos convencionales y los motores de combustión interna que predominan en el actual sistema de transporte.

2.4.2.2 Beneficios de los biocombustibles.

Los beneficios de los biocombustibles están estrechamente vinculados a una serie de factores clave, que incluyen la materia prima empleada, los métodos de conversión utilizados y el entorno local en el que se implementan.

El uso de vías de conversión eficientes, en combinación con biomasa proveniente de desechos o cultivos energéticos de alto rendimiento, puede resultar en una reducción significativa tanto de los costos de producción de biocombustibles como de los impactos ambientales asociados.

En comparación con los combustibles derivados del petróleo, los biocombustibles comerciales actuales, tales como el etanol, el biogás y el biodiesel, suelen ofrecer reducciones de las emisiones de carbono en un rango del 30% al 50%, aunque suelen ser ligeramente más costosos.

Los biocombustibles avanzados presentan la promesa de alcanzar mayores eficiencias y reducciones de emisiones de carbono a un costo menor. Sin embargo, su desarrollo requiere de una mayor inversión en investigación y desarrollo antes de poder ser comercializados a gran escala.

Si estos biocombustibles avanzados son desarrollados adecuadamente, tienen el potencial de no solo reducir las emisiones de carbono, sino también de mejorar la seguridad energética, promover la agricultura sostenible y permitir una gestión más eficiente de los recursos naturales. (Gloria Aponte, 2024).

2.5 POLÍMEROS.

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de monómeros, que son moléculas más pequeñas y simples. Estos compuestos tienen una gran variedad de aplicaciones en la vida diaria y en la industria, debido a sus diversas propiedades físicas y químicas.

2.5.1 Clasificación de Polímeros.

2.5.1.1 Segundo su origen.

- Naturales: Como el almidón, la celulosa, el caucho natural y las proteínas.
- Sintéticos: Como el polietileno, el polipropileno, el poliestireno y el PVC.

2.5.1.2 Segundo su estructura.

- Lineales: Las cadenas de monómeros se disponen en una línea recta, como el polietileno.
- Ramificados: Las cadenas tienen ramificaciones, como el glicógeno.
- Reticulados: Las cadenas están entrelazadas formando una red tridimensional, como las resinas epoxi.

2.5.1.3 Según su comportamiento térmico.

- Termoplásticos: Se ablandan al calentarse y pueden moldearse varias veces, como el PVC y el polietileno.
- Termoestables: Una vez moldeados, no pueden volver a ablandarse al calentarse, como las baquelitas y las resinas epoxi.
- Elastómeros: Tienen alta elasticidad, como el caucho.

2.5.1.4 Propiedades de los Polímeros.

- Físicas: Pueden ser duros, flexibles, elásticos, y tienen densidades variadas.
- Químicas: Resistencia a la corrosión, a los productos químicos, y a los disolventes.
- Mecánicas: Varían en resistencia, rigidez, y tenacidad.

2.5.1.5 Aplicaciones de los Polímeros.

- Industria del Empaque: Bolsas, botellas, películas plásticas (polietileno, PET).
- Construcción: Tuberías, recubrimientos, aislantes (PVC, poliestireno expandido).
- Textil: Fibras sintéticas como el nylon y el poliéster.
- Medicina: Prótesis, suturas absorbibles, dispositivos médicos.
- Electrónica: Aislantes, componentes electrónicos (policarbonato, poliimida).

2.5.1.6 Polímeros y Medio Ambiente.

Los polímeros, especialmente los plásticos, presentan desafíos ambientales significativos debido a su durabilidad y resistencia a la degradación. La acumulación de residuos plásticos ha llevado a la contaminación de suelos y océanos. Por esto, se están desarrollando polímeros biodegradables y se promueve el reciclaje de plásticos para mitigar su impacto ambiental.

2.5.2 PLÁSTICO.

Los plásticos son productos sintéticos derivados de reacciones de polimerización que emplean componentes obtenidos del petróleo. Aunque son sintéticos, comparten la categoría de materiales orgánicos con otros productos como la madera, el papel y la lana. Para su fabricación se utilizan materias primas naturales como carbón, gas natural, celulosa, sal y, por supuesto, petróleo.

El origen del término "plástico" se remonta al griego "plastikos", que denota la capacidad de ser moldeado. Esta característica es fundamental de los plásticos, ya que poseen una variedad de propiedades que los hacen maleables y adaptables a una amplia gama de formas y usos.

Según las características de los plásticos existen de dos tipos:

1. **Termoplásticos-**. Los termoplásticos son altamente reciclables debido a su capacidad para fundirse cuando se calientan, lo que les permite ser moldeados repetidamente sin una pérdida significativa de sus propiedades originales. Entre los termoplásticos más reconocidos se encuentran el (PEBD) Polietileno de baja densidad, (PEAD) Polietileno de alta densidad, (PP) Polipropileno, (PET) Polietilenterftalato, (PVC) Policloruro de vinilo, (PS) Poliestireno, (EPS) Poliestireno expandido (también conocido como corcho blanco o poliestireno expandido), (PC) Policarbonato.
2. **Termoestables-**. Los termoestables, a diferencia de los termoplásticos, presentan dificultades significativas en cuanto a su reciclaje debido a que están compuestos por polímeros con cadenas químicas entrecruzadas. Esta característica implica que su estructura molecular debe ser descompuesta para poder fundirlos, lo que conlleva a una considerable alteración de sus propiedades originales. Entre los termoestables se encuentran las resinas fenólicas, resinas ureicas, entre otros.

Los plásticos han desempeñado un papel crucial en la satisfacción de diversas necesidades sociales; no obstante, el rápido crecimiento urbano y demográfico ha incrementado considerablemente la generación de residuos y la demanda de materias primas. Una solución clave radica en aumentar significativamente la integración de material reciclado en los productos finales, al tiempo que se minimizan los residuos industriales y domiciliarios.

La reducción de la generación de residuos conlleva a un aprovechamiento más eficiente de los recursos materiales y energéticos, preservando la sostenibilidad del planeta y manteniendo el equilibrio ambiental. Este enfoque se sustenta en la estrategia de las "RRRR": Reducir, Reutilizar, Reciclar y Recuperar Energéticamente.

Es importante destacar que la producción y procesamiento de plásticos requieren menos energía que otros materiales, y solo una fracción mínima del petróleo extraído se destina a su fabricación. Además, la industria del plástico, siendo relativamente moderna, emplea tecnología de vanguardia y se adhiere a normativas internacionales que promueven la responsabilidad ambiental, llevando a cabo rigurosos controles en el tratamiento de efluentes líquidos y gaseosos.

El uso de plásticos contribuye al ahorro de energía por múltiples razones: los productos plásticos son más ligeros, lo que facilita su transporte; su capacidad aislante reduce el consumo de energía para calefacción y refrigeración; su durabilidad y versatilidad sustituyen a otros materiales, evitando así la deforestación, la contaminación y el impacto negativo en la fauna. (Camara de la Industria de Reciclados Plásticos, 2024)

2.5.2.1 Obtención de los plásticos.

El plástico es un producto que para crearlo conlleva 5 pasos fundamentales que son:

- **Obtención de materia prima.**

Los plásticos tienen su origen principalmente en los hidrocarburos, compuestos orgánicos conformados por átomos de carbono e hidrógeno. La fuente primaria de estos hidrocarburos para la producción de plásticos es el petróleo crudo, extraído de yacimientos subterráneos mediante la perforación de pozos petroleros.

Una vez extraído, el petróleo crudo se somete a un proceso de refinación para obtener los productos químicos básicos requeridos en la fabricación de plásticos. Este proceso, conocido como destilación fraccionada, implica calentar el petróleo y separarlo en distintas fracciones según sus puntos de ebullición. Cada fracción contiene hidrocarburos con propiedades similares, tanto químicas como físicas.

Una fracción esencial obtenida durante la refinación es la nafta, que contiene hidrocarburos como el etileno y el propileno, fundamentales para la elaboración de diversos tipos de plásticos. La nafta se separa y se somete a un proceso denominado craqueo catalítico, donde las moléculas de hidrocarburos más grandes se descomponen en moléculas más pequeñas, como el etileno y el propileno. Estos productos químicos básicos se recogen y se emplean como materias primas en la fabricación de plásticos.

Aparte del petróleo crudo, existen otras fuentes de hidrocarburos utilizadas en la producción de plásticos. Por ejemplo, el gas natural es una fuente importante de etileno, que se puede emplear en la elaboración de polietileno, uno de los plásticos más comunes. Además, el carbón puede ser utilizado como materia prima mediante un proceso llamado gasificación, en el cual se transforma en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, que posteriormente se puede utilizar en la producción de diversos tipos de plásticos.

Polimerización.

Una vez obtenidos los productos químicos básicos, como el etileno o el propileno, se procede al proceso de polimerización para transformar estos monómeros en cadenas largas de polímeros.

Los monómeros son moléculas pequeñas que tienen la capacidad de unirse con otras moléculas similares para formar una cadena más extensa denominada polímero. Podemos visualizar los monómeros como los "ladrillos" individuales y los polímeros como la "pared" que se construye al unir estos ladrillos. Los monómeros se enlanzan mediante enlaces químicos para dar lugar a una estructura más grande y compleja, conocida como polímero. Estos polímeros pueden estar compuestos por miles o incluso millones de monómeros unidos en una cadena larga y repetitiva.

En la fabricación de plásticos, se emplean principalmente dos tipos de polimerización para construir esta "pared" mencionada:

1. **Polimerización por adición-**. La polimerización por adición es el método más frecuente empleado en la fabricación de plásticos. En este proceso, los monómeros se combinan para formar polímeros sin generar subproductos adicionales. La polimerización por adición implica la iniciación y propagación de reacciones químicas.

Para iniciar la reacción, se emplean iniciadores, los cuales pueden ser sustancias químicas o calor. Estos iniciadores actúan rompiendo ciertos enlaces en los monómeros, generando así radicales libres altamente reactivos. Estos radicales libres reaccionan con los monómeros, uniendo las moléculas y formando cadenas de polímero. A medida que los monómeros se añaden a las cadenas de polímero en crecimiento, la reacción se propaga, formando cadenas cada vez más largas.

Este proceso se controla cuidadosamente mediante la manipulación de la temperatura, la presión y el tiempo de reacción, con el fin de obtener el tamaño y la estructura de cadena deseados para el producto final.

2. **Polimerización por condensación-**. En la polimerización por condensación, dos monómeros diferentes reaccionan entre sí, liberando un subproducto como agua o alcohol. Durante este proceso, los monómeros se combinan mediante enlaces químicos, conocidos como enlaces de condensación, para formar cadenas de polímero más extensas.

La polimerización por condensación requiere condiciones específicas, como la presencia de catalizadores y la eliminación del subproducto generado. Este proceso se emplea en la fabricación de plásticos como el poliéster y el nailon, donde la combinación de monómeros a través de enlaces de condensación resulta fundamental para la formación de las cadenas poliméricas deseadas.

- **Agregación de aditivos.**

Sea cual sea el método de polimerización empleado, es posible agregar otros componentes durante el proceso para mejorar o modificar diversas propiedades del plástico resultante, tales como sus propiedades físicas, químicas o estéticas. Estos componentes adicionales, conocidos como aditivos, se integran en distintas etapas del proceso de polimerización con el fin de alcanzar las características deseadas en el plástico final.

Los tipos de aditivos más comunes usados en la fabricación de plásticos son:

1. **Estabilizadores-**. Los estabilizadores se emplean para resguardar el plástico de la degradación provocada por la exposición a factores externos como la luz ultravioleta, el calor o el oxígeno. Su función es prolongar la vida útil del material y preservar sus propiedades originales durante períodos más prolongados.
2. **Pigmentos y Colorantes-**. Estos aditivos se incorporan con el fin de otorgar color al plástico, siendo utilizados en una amplia variedad de aplicaciones donde se requiere un plástico con un color específico. Los

pigmentos y colorantes pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica, y se añaden en cantidades controladas para obtener la tonalidad deseada.

3. **Plastificantes-**. Los plastificantes se emplean con el propósito de mejorar la flexibilidad y maleabilidad del plástico. Estos aditivos se añaden para disminuir la rigidez del polímero y aumentar su capacidad de estiramiento y deformación sin fracturarse. Los plastificantes son comúnmente utilizados en plásticos como el PVC (cloruro de polivinilo).
4. **Retardantes de llama-**. Estos aditivos se incorporan a los plásticos con el fin de disminuir su inflamabilidad y retardar la propagación de llamas en caso de incendio. Los retardantes de llama son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se demanda un elevado nivel de seguridad contra incendios, como en cables eléctricos o en muebles.
5. **Agentes de refuerzo-**. Estos aditivos se emplean con el propósito de mejorar la resistencia mecánica del plástico, y entre los más reconocidos se encuentran las fibras de vidrio o el carbono. Estos materiales se añaden al polímero para incrementar su rigidez, resistencia a la tracción y capacidad de resistencia al impacto.

Una vez concluida la polimerización, se obtiene el polímero en forma de resina, una sustancia viscosa de alta densidad. Esta resina se somete a procesos adicionales, tales como enfriamiento, solidificación y trituración, con el propósito de convertirla en pellets, gránulos o polvos de plástico que son más fáciles de manejar y transportar. Estos materiales procesados se utilizan entonces en la fabricación de productos finales mediante diversos procesos de transformación. (Comunicación Marpa Vacuum, 2024)

2.6 PIROLISIS.

La pirólisis es un proceso termoquímico que implica la descomposición térmica de sustancias orgánicas sin la presencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo. Durante este proceso, los materiales son expuestos a temperaturas

elevadas, típicamente oscilando entre 300°C y 800°C, lo que ocasiona su descomposición en una variedad de productos, incluyendo gases, líquidos y sólidos.

2.6.1 Etapas de la pirolisis.

La pirolisis se realiza en un reactor sellado, dentro del cual los residuos son sometidos a temperaturas controladas sin la presencia de oxígeno. Este proceso se puede dividir en tres etapas fundamentales:

2.6.1.1 Precalentamiento.

En la etapa inicial de precalentamiento, los residuos se calientan de manera gradual hasta que alcanzan la temperatura necesaria para iniciar la reacción. Con el incremento de la temperatura, los compuestos orgánicos presentes en los residuos comienzan a descomponerse en productos volátiles.

2.6.1.2 Descomposición.

Durante esta fase, los productos volátiles resultantes de la descomposición térmica se segregan en distintas fracciones según sus propiedades químicas, tales como gases, líquidos y sólidos. Estas fracciones pueden albergar componentes de valor, como hidrocarburos, gases combustibles y diversos productos químicos.

2.6.1.3 Enfriamiento.

Durante esta etapa, los productos generados se enfrian para facilitar su procesamiento y recuperación posterior. Según las características específicas de dichos productos, se emplean diversas técnicas como separación, extracción y filtración, entre otras, con el fin de obtener productos finales de alta calidad. (AIMPLAS, 2024).

2.6.2 Pirolisis de plásticos.

La descomposición térmica de los materiales plásticos produce principalmente gases sintéticos, aceites y residuos sólidos o carbón, aunque en cantidades que pueden variar considerablemente. Estos productos pueden ser empleados como materias primas para la fabricación de combustibles como aceites, gasolinas y diésel, tras someterlos a una etapa previa de destilación. Los rendimientos obtenidos pueden variar significativamente según los tipos de polímeros o mezclas de polímeros utilizados como materia prima y las condiciones operativas empleadas.

Generalmente, tanto los productos líquidos como los gaseosos resultantes son mezclas que contienen una variedad de compuestos diferentes. El tratamiento termoquímico consiste en la ruptura de polímeros de gran tamaño en hidrocarburos más pequeños con diversos números de carbono y puntos de ebullición, llevado a cabo en un entorno inerte, libre de oxígeno o controlado, a temperaturas elevadas.

Los hidrocarburos con puntos de ebullición entre 35 y 185 °C pueden emplearse como gasolina para motores, mientras que aquellos con puntos de ebullición entre 185 y 290 °C se utilizan como diésel #1. Los hidrocarburos con puntos de ebullición entre 290 y 350 °C se destinan al diésel #2, entre 350 y 538 °C al gasóleo de vacío, y aquellos con puntos de ebullición superiores a 538 °C se consideran residuos.

Los residuos plásticos son procesados de manera continua en una cámara cilíndrica o reactor, y los gases pirolíticos resultantes se condensan mediante un sistema de condensación diseñado específicamente para tal fin.

Por lo tanto, diversos factores, como la composición de los materiales de entrada, el tipo de catalizador utilizado, el tamaño de las partículas, la temperatura de pirólisis y la relación entre el polímero y el catalizador, además del diseño del reactor, influyen en la conversión y la calidad del combustible producido.

2.6.2.1 Temperatura de pirolisis.

El parámetro más crucial a considerar es la temperatura, ya que influye significativamente en la descomposición térmica, así como en la estabilidad tanto de la materia prima como de los productos de reacción. En términos de temperatura requerida, esta puede variar ampliamente, desde 300 hasta 850 °C. Durante el proceso de pirólisis, se pueden identificar distintos niveles de temperatura, presiones, tiempos de reacción, así como la presencia o ausencia de gases reactivos o líquidos, y la utilización de catalizadores.

El craqueo o reacción pirolítica puede llevarse a cabo a temperaturas inferiores a 400 °C, en un rango medio de 400-600 °C, o en temperaturas elevadas superiores a 600 °C. (Prieto., 2024).

2.6.3 Tipos de pirolisis.

El proceso de pirolisis puede tener dos variantes, dependiendo el uso que se le da, existe dos tipos de pirolisis principales que son:

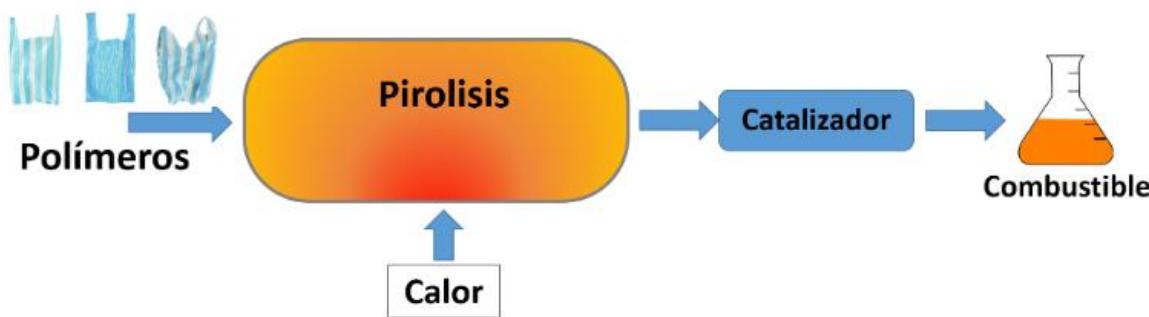
2.6.3.1 Pirolisis catalítica.

La pirolisis catalítica es un proceso termoquímico que ocurre típicamente en un rango de temperatura de 350°C a 850°C. A través de este proceso, se generan diversos productos, incluyendo un residuo sólido carbonizado conocido como coque, así como una fracción volátil que se separa en hidrocarburos condensables, también conocidos como aceite, y no condensables, que se presentan en forma de gases. La composición de estos productos depende tanto de las condiciones de operación como del tipo de materia prima utilizada.

Con el propósito de optimizar el proceso y ejercer un mayor control sobre la composición de los hidrocarburos líquidos resultantes de la pirolisis de polímeros, se ha implementado la técnica de pirolisis catalítica. Esta variante implica la adición de un catalizador al reactor de pirolisis, con el objetivo de mejorar la selectividad

durante la fase de craqueo de los polímeros. Entre los catalizadores empleados para este fin se encuentran sólidos porosos como la alúmina y la sílice, así como materiales mesoporosos como la zeolita. Esta estrategia ofrece la ventaja de facilitar la descomposición controlada de los polímeros, permitiendo obtener una gama más precisa de productos hidrocarbonados líquidos. (Moron, 2024)

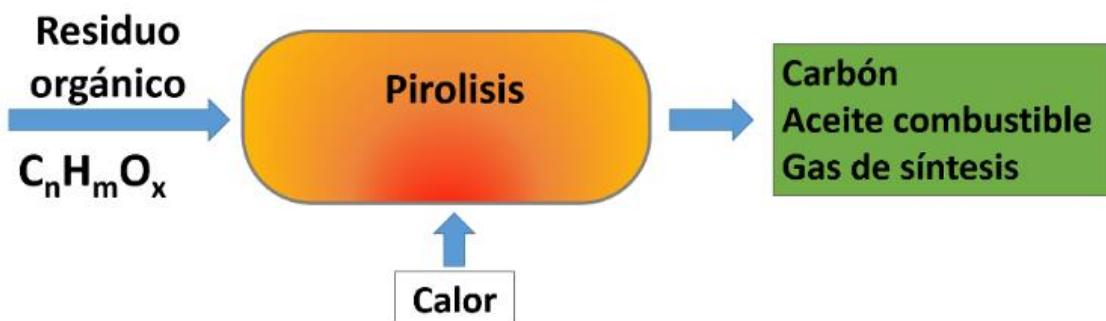
ILUSTRACIÓN 15 ESQUEMA DE UN PROCESO DE PIROLISIS CATALÍTICA.



Fuente: Hive blog, 2024.

2.6.3.2 Pirolisis no catalitica.

La pirolisis no catalitica se emplea ampliamente para transformar los residuos orgánicos en recursos valiosos, como combustibles y productos químicos de gran importancia. Este procedimiento se realiza en ausencia de oxígeno, lo que previene la combustión y facilita la obtención de un producto con alta eficiencia energética. El resultado final es una mezcla compleja de hidrocarburos con un potencial considerable para su uso como combustible. Este proceso se basa básicamente en el uso de un reactor sin el uso de cartuchos de catalizadores donde después de su reacción termoquímica se pasa directamente a los intercambiadores de calor y luego a los colectores para el separado de los distintos combustibles generados.

ILUSTRACIÓN 16 ESQUEMA DEL PROCESO DE PIRÓLISIS NO CATALÍTICA.

Fuente: Hive Blog, 2024.

2.6.4 Países que emplean el proceso de pirolisis para la obtención de biocombustibles.

El proceso de pirolisis para la obtención de biocombustibles ha ido avanzando significativamente en Latinoamérica. Varios países han ido implementando esta tecnología como una solución a la contaminación plástica.

2.6.4.1 Chile.

La empresa ELEMENTUM convierte los residuos plásticos en Eco-Combustibles y solventes orgánicos, ELEMENTUM, que tuvo sus inicios bajo el nombre de EcoFuels, surgió como una idea en 2015 por parte de dos estudiantes de doctorado de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile: Ariel Crespo y José Duguet. Su objetivo era desarrollar un diseño experimental propio que permitiera el procesamiento más eficiente de residuos plásticos en comparación con los métodos ya existentes. (La Tercera, 2024)

ILUSTRACIÓN 17 MUESTRA DE BIOCOMBUSTIBLE ELABORADO POR ELEMENTUM.



Fuente: Knowhub, 2024.

2.6.4.2 Ecuador.

En el año 2019 se instala la primera planta en Sudamérica que produce combustible a base de discos plásticos, la sede se encuentra en Cayambe, ecuador y tiene la capacidad de procesar 7 toneladas diarias de plástico que produce alrededor de 50 mil galones de gasolina al mes.

Según Gonzalo Aguirre, gerente de Sosgia, la tecnología empleada permite la descomposición del plástico en un reactor a temperaturas de hasta 800°C. Posteriormente, el vapor resultante se condensa y, a través de controles precisos de temperatura y composición de gases, se lleva a cabo la destilación del combustible. El proceso inicial produce parafina, seguida de gas licuado de petróleo (GLP), queroseno (que se utiliza en la misma planta) y, por último, gasolina y diésel.

Se asegura que esta tecnología es respetuosa con el medio ambiente, ya que no genera emisiones contaminantes

Esta iniciativa, denominada Plastikgas y basada en la reingeniería inversa, fue presentada en la sede de la Cámara de la Pequeña y Mediana Industria (Capeipi).

ILUSTRACIÓN 18 PLANTA ECUATORIANA DE CONVERSIÓN DE PLÁSTICO EN BIOCOMBUSTIBLE.



Fuente: Forbes Ecuador, 2024.

CAPÍTULO 3

INGENIERÍA DEL

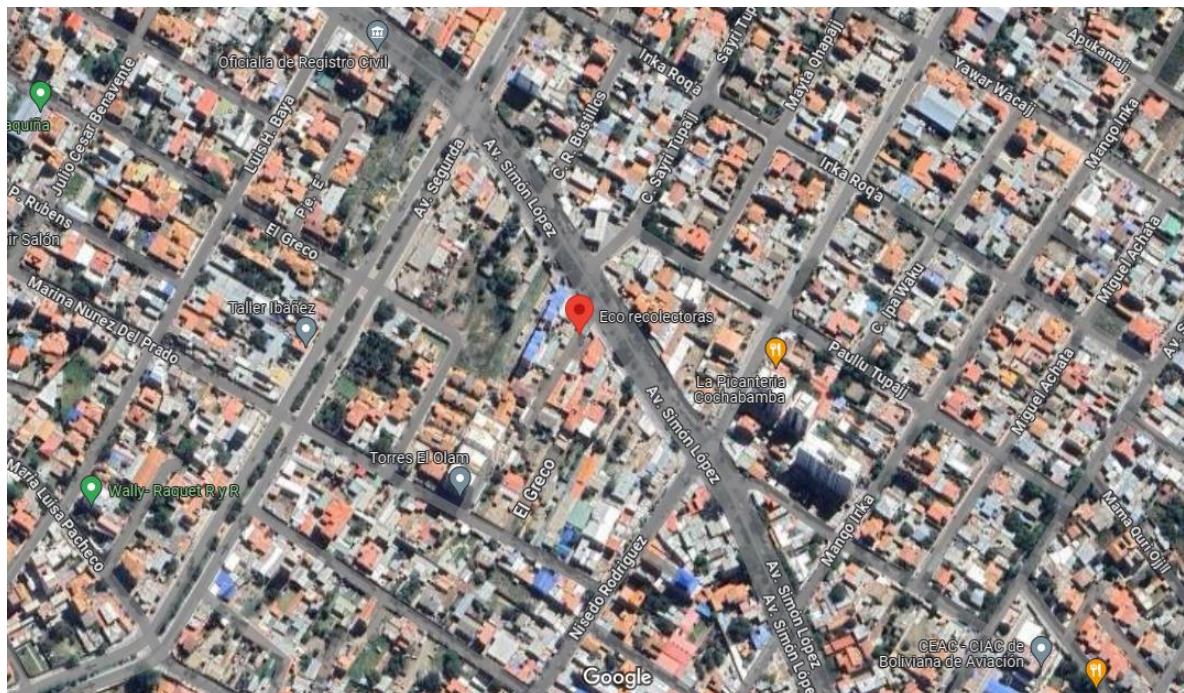
PROYECTO.

3.1 PROPUESTA GEOGRÁFICA DE LA UBICACIÓN DE LA PLANTA DE OBTENCIÓN DE GASOLINA.

3.1.1 Selección de zona geográfica considerando factores ambientales.

El proyecto se encuentra ubicado en el departamento de Cochabamba, provincia Cercado, distrito 2 del municipio de Cochabamba.

ILUSTRACIÓN 19 SELECCION DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.



Fuente: google maps, 2024.

3.1.2 Presentación de la zona dentro del terreno de acopio donde está diseñada la planta de pirolisis no catalítica.

La planta de pirolisis no catalítica está diseñada dentro de un punto de acopio - venta de la comunidad de “Eco-Recolectoras” del municipio de Cochabamba, debido a la alta superficie que tiene el terreno.

ILUSTRACIÓN 20 PRESENTACIÓN DEL TERRENO DONDE SE DISEÑA LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.

fuente: google maps, 2024.

3.2 DETERMINACIÓN DE LOS PLÁSTICOS QUE SE EMPLEAN EN EL PROCESO DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.

El 8,5 por ciento de los residuos sólidos que se generan diariamente en las ciudades de Bolivia corresponde a bolsas plásticas y botellas PET. En Cochabamba, se producen 400 toneladas de basura al día, de las cuales 34 mil kilos son plásticos. (Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2024).

3.2.1 Identificación de tipos de plásticos reciclables en el municipio de Cochabamba.

Los plásticos mayormente usados por el municipio de Cochabamba son:

TABLA 6 TIPOS DE PLÁSTICOS MAYORMENTE UTILIZADOS EN EL MUNICIPIO DE COCHABAMBA.

TIPO DE PLÁSTICO	PRODUCTOS	
POLIETILENO (PE)	Bolsas, cables, tuberías, juguetes, envases de detergentes, etc.	   
POLIPROPILENO (PP)	Vasos de plástico, recipientes de medicina, platos, cubiertos.	  
POLIESTIRENO (PS)	Platos de comida rápida, platoformo	 

TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)	Botellas, lámparas led.	
---	----------------------------	--

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.2.2 Evaluación, separación y limpieza de los plásticos reciclados para su posterior eliminación de impurezas.

En este proceso la mano de obra se encarga de evaluar el tipo de plástico y separarlo según al tipo que pertenece.

ILUSTRACIÓN 21 SEPARACIÓN MANUAL DE LOS TIPOS DE PLÁSTICOS RECICLADOS.



Fuente: Expo plásticos, 2024.

3.2.3 Limpieza y triturado de los plásticos separados.

Al tener los plásticos separados según su tipo se comienza con la trituración de los mismos con una máquina trituradora.

ILUSTRACIÓN 22 MÁQUINA TRITURADORA DE PLÁSTICO.



Fuente: Plastic Recycling Machines, 2024.

Después del triturado por tipo de cada plástico, se procede con la limpieza de los mismos para poder eliminar las impurezas que tienden a existir ya sea de forma manual o con una maquina lavadora de plásticos.

ILUSTRACIÓN 23 MAQUINA LAVADORA DE PLÁSTICO RECICLADO



Fuente: POLISANTAFE, 2024

ILUSTRACIÓN 24 LAVADO DE MANUAL DE RESIDUOS PLÁSTICOS.



Fuente: alamy, 2024.

3.3 DISEÑO DE LA PLANTA DE OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE A TRAVÉS DE PLÁSTICOS RECICLADOS.

3.3.1 Selección y diseño del reactor.

El tipo de reactor empleado en el diseño de esta planta es del tipo Batch debido a la facilidad que ofrece a la hora de procesar la materia prima en grandes cantidades.

ILUSTRACIÓN 25 REACTOR BATCH.



Fuente: Lifeder; 2024.

**3.3.1.1 Calculo del volumen del reactor y diseño en base a la cantidad
proyectada de materia prima recolectada.**

La cantidad de plástico recolectado por una Eco Recolectora en Cochabamba puede variar considerablemente según diversos factores, tales como la ruta de recolección, la eficiencia en la clasificación de residuos y la disponibilidad de materiales reciclables. No obstante, es posible hacer estimaciones basadas en los datos disponibles.

Una Eco Recolectora puede recolectar entre 5 y 8 kilogramos de botellas PET por día, según las actividades diarias y la cantidad de residuos disponibles para recolección. (MONTES, 2024)

Considerando que en la comunidad de Eco-Recolectoras en el municipio de Cochabamba está conformada por aproximadamente 180 familias. Y muy aparte se estima que hay alrededor de 500 recolectores independientes en Cochabamba, y cada uno puede recolectar entre 20 y 30 kilogramos de plástico por día, el total diario de recolección de plástico podría estar entre 10 y 15 toneladas. Esta cantidad depende de factores como la disponibilidad de materiales y la eficiencia de cada recolector. (Claros, 2024)

Por lo cual el diseño del reactor debe ser para procesar 5 toneladas diarias de plástico reciclado.

ILUSTRACIÓN 26 DISEÑO DEL REACTOR DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.



Fuente: Elaboración propia; 2024.

Considerando que se pretende procesar estos polímeros en dos turnos de 8 horas, la masa por turno será de 2.500 Kg.

ECUACIÓN 1 VOLUMEN REQUERIDO PARA PROCESAR LA MATERIA PRIMA.

$$V = \frac{m}{\rho * n}$$

Donde:

V = Volumen (m^3)

m = masa (Kg)

n = eficiencia del reactor (%)

ρ = Densidad de plastico triturado 350 Kg/m^3

Asumiendo que la eficiencia del reactor será del 90%, la densidad del plástico triturado se asume como 350 Kg/m^3 aproximadamente y la masa que ingresa por turno será la mitad de la total; es decir 2.500 Kg.

Datos:

$$V = \text{Volumen (m}^3\text{)}$$

$$m = 2.500 \text{ Kg}$$

$$n = 90\% = 0.9$$

$$\rho = 350 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \frac{2500 \text{ Kg}}{350 \text{ Kg/m}^3 * 0.9} \Rightarrow V = 7,94 \text{ m}^3$$

El volumen requerido para procesar 2.500 Kg de plástico triturado es de $7,94 \text{ m}^3$.

Para el dimensionamiento del reactor se emplea la siguiente formula:

ECUACIÓN 2 VOLUMEN DEL REACTOR CILÍNDRICO.

$$V = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * H$$

Donde:

$$V = \text{Volumen (m}^3\text{)}$$

$$D = \text{Diametro (m)}$$

$$H = \text{Altura (m)}$$

Asumiendo que la altura del reactor es 2 veces su diámetro: $H = 2 * D$

$$V = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * (2 * D) \Rightarrow V = \frac{\pi * D^3}{2}$$

Remplazando con el dato de volumen obtenido anteriormente $7,94 m^3$ y despejando el diámetro (D)

ECUACIÓN 3 DIÁMETRO EXTERNO DEL REACTOR PIROLÍTICO.

$$D^3 = \frac{2 * V}{\pi}$$

$$D^3 = \frac{2 * 7,94m^3}{\pi} \quad \Rightarrow \quad D^3 = \sqrt[3]{5,06}$$

$$De = 1,72m.$$

Asumiendo que el material es acero inoxidable y el espesor será de 15mm. El diámetro interno se calcula:

ECUACIÓN 4 DIÁMETRO INTERNO DEL REACTOR PIROLÍTICO.

$$Di = De - 2 * espesor$$

$$Di = 1,72m - 2 * 0.015m. \Rightarrow Di = 1,69m.$$

La altura es el doble del diámetro externo, es decir:

ECUACIÓN 5 ALTURA DEL REACTOR PIROLÍTICO.

$$H = 2 * De$$

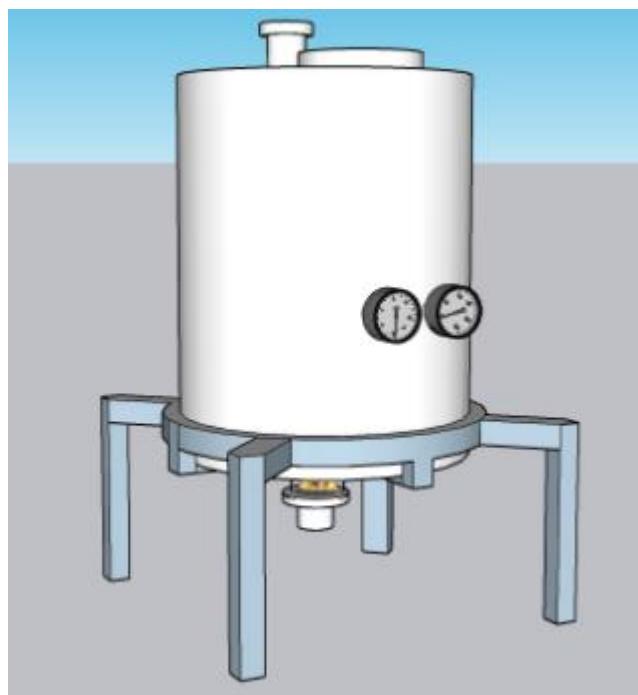
$$H = 2 * 1,72m \quad \Rightarrow \quad H = 3,44 m.$$

Estas dimensiones aseguran que el reactor tenga la capacidad necesaria y la resistencia adecuada para operar a las temperaturas y condiciones especificadas.

3.3.1.2 Medidores de temperatura y presión de trabajo del reactor.

Se instala dos medidores de temperatura y presión en el reactor para poder evidenciar las variables de trabajo.

ILUSTRACIÓN 27 DISEÑO DE ACOPLAMIENTO DE MEDIDORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA EN EL REACTOR.



Fuente: elaboración propia; 2024.

3.3.2 Selección de tuberías y su diseño.

Se pretende emplear tuberías de acero inoxidable debido a diversas características que poseen las mismas, ya sea:

Son resistentes a la corrosión y se utilizan para transportar fluidos corrosivos o en ambientes donde la corrosión es un problema significativo.

Se emplean en aplicaciones que involucran altas temperaturas y sustancias químicas agresivas.

ILUSTRACIÓN 28 TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.

Fuente: Huijian Metal; 2024.

3.3.2.1 Calculo del peso de la tubería en base a la densidad, tamaño, diámetro y espesor.

La densidad de la tubería de acero inoxidable es de 7.85 g/cm^3 conjuntamente el espesor es de 2 mm . y el diámetro de 54 mm .

ECUACIÓN 6 PESO DE LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.

$$P = A * \rho * \theta * L$$

Donde:

P = Peso (Kg)

A = Espesor (m.)

ρ = Densidad (g/cm^3)

θ = Diámetro (m.)

L = Longitud (m.)

Asumiendo una longitud de 10 mts. como ejemplo:

Datos:

$$P = (\text{Kg})$$

$$A = 0.002 \text{ (m.)}$$

$$\rho = 7.85 \text{ (g/cm}^3\text{)} = 7850 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\theta = 0.054 \text{ (m.)}$$

$$L = 10 \text{ (m.)}$$

$$P = 0.002m * 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.054 \text{ m} * 10 \text{ m}$$

$$\boxed{P = 8,48 \text{ Kg.}}$$

Para hallar el diámetro interno de la tubería se emplea la siguiente ecuación:

ECUACIÓN 7 CÁLCULO DEL DIÁMETRO INTERNO DE LAS TUBERÍAS.

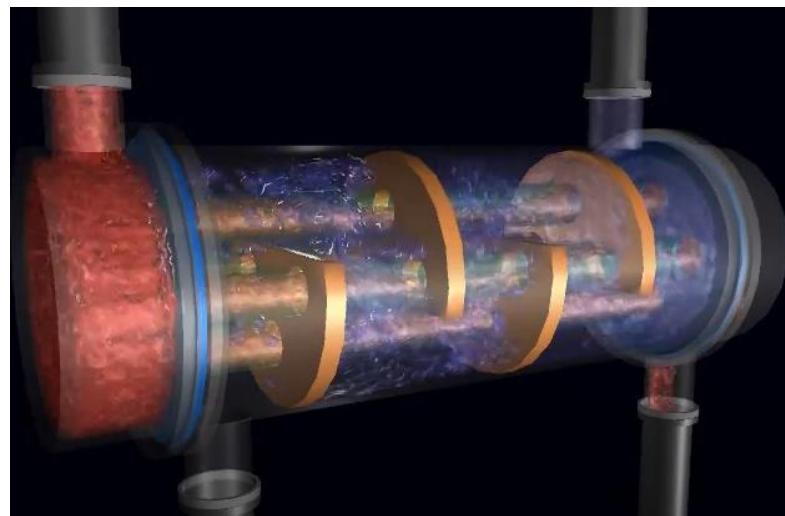
$$D_{\text{interior}} = D_{\text{exterior}} - 2 * \text{espesor}$$

$$D_{\text{interior}} = 0.054m - 2 * 0.002m \quad \Rightarrow \quad \boxed{D_{\text{interior}} = 0.050m.}$$

3.3.3 Diseño del intercambiador de calor.

Se emplea un intercambiador de calor tubular debido a las altas presiones y temperaturas de trabajo que posee.

ILUSTRACIÓN 29 INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBULAR.



Fuente: Barriquand; 2024

3.3.4 Tanques de almacenamiento.

Se emplean 4 tanques de almacenamiento de los cuales el primero es el de almacenamiento del aceite pirolítico y los restantes 3 son empleados para el almacenamiento del combustible (kerosene, diésel y gasolina).

3.3.4.1 Diseño del primer tanque de almacenamiento.

El primer tanque de almacenamiento alberga el líquido condensado anteriormente por los intercambiadores de calor. Su tamaño es mayor al de los otros tanques debido a la mayor cantidad de líquido que recauda el tanque.

ILUSTRACIÓN 30 TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

Fuente: Elaboración propia; 2024.

Para el diseño del primer tanque de almacenamiento donde se almacena el aceite pirolítico después de haber pasado por el intercambiador de temperatura se toma en cuenta los siguientes datos:

- La producción diaria de aceite de pirolisis estimada es de $5 m^3$.
- El factor de seguridad que se agrega es del 20% adicional al total para evitar derrames en caso de llenar el tanque.

ECUACIÓN 8 VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO N°1

$$V = \text{Producción diaria} * \text{factor de seguridad}$$

$$V = 5m^3 * 1.2 \quad => \quad V = 6m^3$$

Para el diseño del tanque se emplea la siguiente formula:

ECUACIÓN 9 DISEÑO DE LA ALTURA DEL TANQUE.

$$V = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * H \quad => \quad H = \frac{V}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Donde:

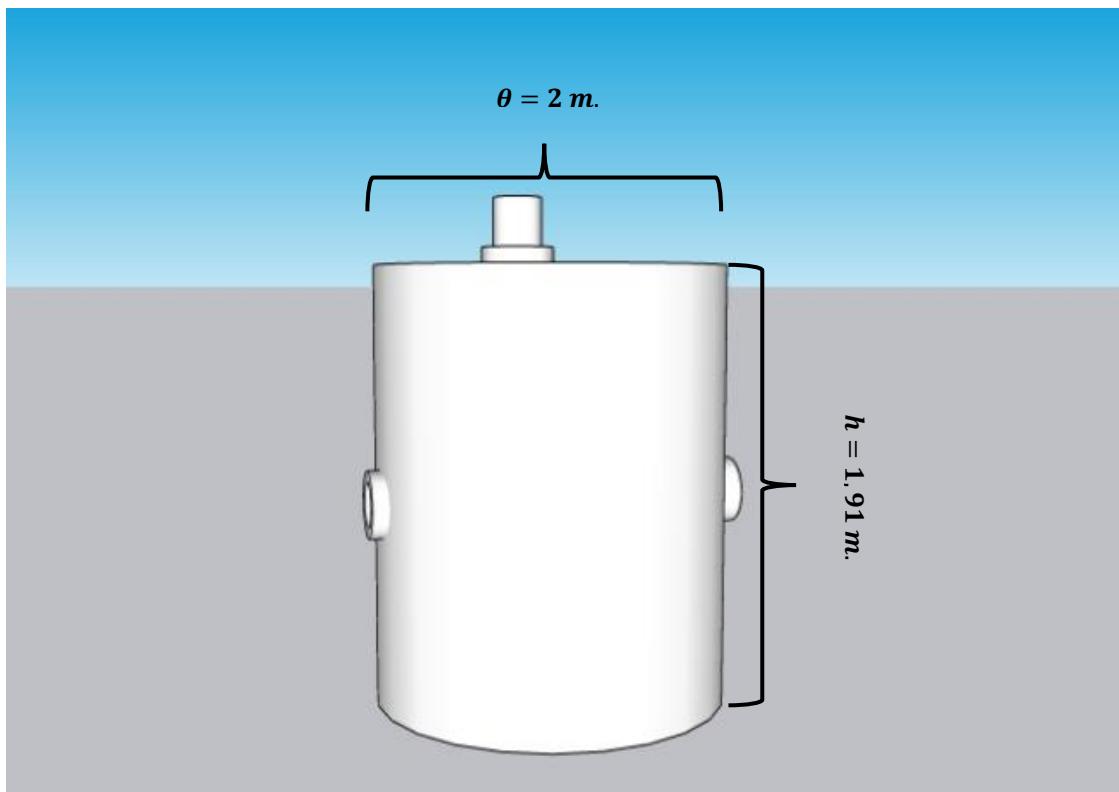
V = Volumen (m^3)

D = Diametro (m)

H = Altura (m)

Entonces asumiendo un diámetro de 2 m. el cálculo de la altura del tanque de almacenamiento es de la siguiente manera:

$$H = \frac{6m^3}{\pi * \left(\frac{2}{2}\right)^2} \quad => \quad \boxed{H = 1,91 \text{ m.}}$$



3.3.4.2 Diseño del tanque de almacenamiento de kerosene.

Los tanques utilizados en esta parte de la planta de pirolisis no catalítica son cilíndricos verticales.

ILUSTRACIÓN 31 DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE KEROSENE.



Fuente: Elaboración Propia; 2024.

Para un volumen de $5 m^3$ de producción diaria de aceite pirolítico se prevee que un 14 % de este volumen será kerosene. Es decir:

ECUACIÓN 10 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE KEROSENE.

$$V_{kerosene} = V_t * 14\% * \text{Factor de seguridad}$$

Asumiendo que el factor de seguridad es el aumento del 20% del volumen total obtenido, entonces:

$$V_{kerosene} = 5m^3 * 0.14 * 1.20 \quad \Rightarrow \quad V_{kerosene} = 0,84 m^3$$

Por lo cual el cálculo de la altura del tanque será:

ECUACIÓN 11 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE DE KEROSENE.

$$H = \frac{V}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Asumiendo un diámetro de 1m.:

$$H = \frac{0.84m^3}{\pi * \left(\frac{1m}{2}\right)^2} \quad \Rightarrow \quad H = 1,07 m.$$

3.3.4.3 Diseño del tanque de almacenamiento de diésel.

Para un volumen de $5 m^3$ de producción diaria de aceite pirolítico se prevé que un 30 % de este volumen será diésel. Es decir:

ECUACIÓN 12 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL.

$$V_{diesel} = V_t * 30\% * Factor\ de\ seguridad$$

Asumiendo que el factor de seguridad es el aumento del 20% del volumen total obtenido, entonces:

$$V_{diesel} = 5m^3 * 0.30 * 1.20 \Rightarrow V_{diesel} = 1,8 m^3$$

Por lo cual el cálculo de la altura del tanque será:

ECUACIÓN 13 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE DE DIÉSEL.

$$H = \frac{V}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Asumiendo un diámetro de 1,2 m.:

$$H = \frac{1.8m^3}{\pi * \left(\frac{1.2m}{2}\right)^2} \Rightarrow H = 1,59 m.$$

ILUSTRACIÓN 32 DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL.



Fuente: Elaboración propia; 2024.

3.3.4.4 Diseño del tanque de gasolina.

Para un volumen de $5 m^3$ de producción diaria de aceite pirolítico se prevee que un 50 % de este volumen será gasolina. Es decir:

ECUACIÓN 14 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASOLINA.

$$V_{gasolina} = V_t * 50\% * \text{Factor de seguridad}$$

Asumiendo que el factor de seguridad es el aumento del 20% del volumen total obtenido, entonces:

$$V_{gasolina} = 5m^3 * 0.50 * 1.20 \quad \Rightarrow \quad V_{gasolina} = 3 m^3$$

Por lo cual el cálculo de la altura del tanque será:

ECUACIÓN 15 CÁLCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE DE GASOLINA.

$$H = \frac{V}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Asumiendo un diámetro de 1,5 m.:

$$H = \frac{3m^3}{\pi * \left(\frac{1.5m}{2}\right)^2} \quad \Rightarrow \quad H = 1,70 m.$$

ILUSTRACIÓN 33 DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASOLINA.

Fuente: Elaboración Propia; 2024.

3.3.5 Diseño de la torre de destilación de combustibles.

Una vez obtenido el aceite del proceso pirolítico, es transportado a una torre de destilación para poder separar en kerosene, diésel, gasolina y glp. Donde el glp es reinyectado a la torre de destilación.

Se pretende destilar $2.5m^3$ de aceite pirolítico por cada turno de 8 hrs. programado en la planta. Promediando que la torre de destilación procesará el destilamiento del aceite pirolítico en 3 hrs. Donde el 50% será gasolina, 30% diésel, 14% kerosene y 6% gas que será reinyectado a la torre para su auto funcionamiento.

3.3.5.1 Calculo de número de placas necesarias en la torre de destilación.

En el contexto de la destilación de aceite pirolítico basado en plástico reciclado, la destilación fraccionada sería adecuada para separar los diferentes hidrocarburos presentes en el aceite pirolítico (como gasolina, diésel, queroseno, etc.) en

fracciones puras. Dado que estos componentes tienen diferentes puntos de ebullición, una columna de destilación fraccionada puede separarlos de manera efectiva utilizando múltiples platos o placas para incrementar la pureza de cada fracción.

Por lo cual para saber el número de placas necesarias se usa la ecuación de Fenske:

ECUACIÓN 16 NUMERO MÍNIMO DE PLACAS SEGÚN FENSKE

$$N_{min} = \frac{\log\left(\frac{x_D(1-x_B)}{x_B(1-x_D)}\right)}{\log(\alpha)}$$

Donde:

N_{min} = Número mínimo de platos.

x_D = Fracción molar del componente más volátil en la parte superior de la columna

x_B = Fracción molar del componente más volátil en la parte inferior de la columna

α = Coeficiente de volatilidad relativa (1.4)

Asumiendo a la gasolina como el componente más volátil de la parte superior de la torre de destilación.

ECUACIÓN 17 CÁLCULO DE FRACCIÓN MOLAR DE LA GASOLINA

$x_{gasolina}$

$$= \frac{\rho_{gasolina} * 0.50 * V}{M_{gasolina}} + \frac{\rho_{diesel} * 0.30 * V}{M_{diesel}} + \frac{\rho_{kerosene} * 0.14 * V}{M_{kerosene}} + \frac{\rho_{gas natural} * 0.06 * V}{M_{gas natural}}$$

Donde:

$\rho_{gasolina}$ = densidad de la gasolina Kg/m^3

ρ_{diesel} = densidad del diesel Kg/m^3

$\rho_{kerosene}$ = densidad del kerosene Kg/m^3

$\rho_{gas natural}$ = densidad del gas natural Kg/m^3

$M_{gasolina}$ = peso molecular de la gasolina g/mol

M_{diesel} = peso molecular del diesel g/mol

$M_{kerosene}$ = peso molecular del kerosene g/mol

$M_{gas\ natural}$ = peso molecular del gas natural g/mol

V = Volumen m^3

Asumiendo datos promedio que poseen estos combustibles:

Datos:

$$\rho_{gasolina} = 750 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{diesel} = 835 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{kerosene} = 795 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{gas\ natural} = 0.7 \text{ Kg/m}^3$$

$$M_{gasolina} = 0,114 \text{ kg/mol}$$

$$M_{diesel} = 0,200 \text{ kg/mol}$$

$$M_{kerosene} = 0,170 \text{ kg/mol}$$

$$M_{gas\ natural} = 0,016 \text{ kg/mol}$$

$$V = 5 \text{ m}^3$$

$$x_{gasolina}$$

$$= \frac{\frac{750 \text{ Kg/m}^3 * 0.50 * 5 \text{ m}^3}{0,114 \text{ Kg/mol}}}{\frac{750 \text{ Kg/m}^3 * 0.50 * 5 \text{ m}^3}{0,114 \text{ Kg/mol}} + \frac{835 \text{ Kg/m}^3 * 0.30 * 5 \text{ m}^3}{0,200 \text{ Kg/mol}} + \frac{795 \text{ Kg/m}^3 * 0.14 * 5 \text{ m}^3}{0,170 \text{ Kg/mol}} + \frac{0.7 \text{ Kg/m}^3 * 0.06 * 5 \text{ m}^3}{0,016 \text{ Kg/mol}}}$$

$$x_{gasolina} = \frac{16.447,37 \text{ mol}}{16.447,37 \text{ mol} + 6.262,5 \text{ mol} + 3.273,53 \text{ mol} + 13,125 \text{ mol}}$$

$$x_{gasolina} = 0.63 = 63\%$$

Asumiendo el diésel como el componente más volátil de la parte inferior de la torre de destilación

ECUACIÓN 18 CÁLCULO DE FRACCIÓN MOLAR DEL DIÉSEL

x_{diesel}

$$= \frac{\frac{\rho_{diesel} * 0.30 * V}{M_{diesel}}}{\frac{\rho_{diesel} * 0.30 * V}{M_{diesel}} + \frac{\rho_{gasolina} * 0.50 * V}{M_{gasolina}} + \frac{\rho_{kerosene} * 0.14 * V}{M_{kerosene}} + \frac{\rho_{gas natural} * 0.06 * V}{M_{gas natural}}}$$

Donde:

$\rho_{gasolina}$ = densidad de la gasolina Kg/m^3

ρ_{diesel} = densidad del diesel Kg/m^3

$\rho_{kerosene}$ = densidad del kerosene Kg/m^3

$\rho_{gas natural}$ = densidad del gas natural Kg/m^3

$M_{gasolina}$ = peso molecular de la gasolina g/mol

M_{diesel} = peso molecular del diesel g/mol

$M_{kerosene}$ = peso molecular del kerosene g/mol

$M_{gas natural}$ = peso molecular del gas natural g/mol

V = Volumen m^3

Asumiendo datos promedio que poseen estos combustibles:

Datos:

$\rho_{gasolina} = 750 Kg/m^3$

$\rho_{diesel} = 835 Kg/m^3$

$\rho_{kerosene} = 795 Kg/m^3$

$\rho_{gas natural} = 0.7 Kg/m^3$

$M_{gasolina} = 0,114 kg/mol$

$M_{diesel} = 0,200 kg/mol$

$M_{kerosene} = 0,170 kg/mol$

$M_{gas natural} = 0,016 kg/mol$

$V = 5 m^3$

x_{diesel}

$$= \frac{\frac{835 Kg/m^3 * 0.30 * 5m^3}{0,200 Kg/mol}}{\frac{835 Kg/m^3 * 0.30 * 5m^3}{0,200 Kg/mol} + \frac{750 Kg/m^3 * 0.50 * 5m^3}{0,114 Kg/mol} + \frac{795 Kg/m^3 * 0.14 * 5m^3}{0,170 Kg/mol} + \frac{0.7 Kg/m^3 * 0.06 * 5m^3}{0,016 Kg/mol}}$$

$$x_{diesel} = \frac{6.262,5 \text{ mol}}{6.262,5 \text{ mol} + 16.447,37 \text{ mol} + 3.273,53 \text{ mol} + 13.125 \text{ mol}}$$

$$x_{diesel} = 0.24 = 24\%$$

Reemplazando en la fórmula de Fenske:

$$N_{min} = \frac{\log\left(\frac{x_D(1-x_B)}{x_B(1-x_D)}\right)}{\log(\alpha)}$$

Datos:

N_{min} = Número mínimo de platos.

x_D = 0.63

x_B = 0.23

α = Coeficiente de volatilidad relativa (1.4)

$$N_{min} = \frac{\log\left(\frac{0,63(1-0,24)}{0,24(1-0,63)}\right)}{\log(1.4)} \Rightarrow N_{min} = 5,01 \Rightarrow 6$$

Por lo tanto, el número mínimo de platos teóricos necesarios es aproximadamente 5.01. En la práctica, se redondea al siguiente número entero, por lo cual se precisa una cantidad de **6 placas** para realizar una buena destilación. (Kister, 1992).

3.3.5.2 Altura ocupada de las placas dentro de la torre.

ECUACIÓN 19 CALCULO DE ALTURA OCUPADA DE LAS PLACAS DENTRO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN.

$$H_{placas} = (n - 1) * S$$

Donde:

H_{placas} = Altura ocupada por las placas

S = Separación entre las placas

n = Número de platos

Remplazando:

Una altura típica para cada plato en una torre de destilación oscila entre 0.5 y 0.75 metros. Tomando un valor promedio de 0.6 metros por plato:

$$H_{placas} = (6 - 1) * 0.6 \quad \Rightarrow \quad H_{placas} = 3 \text{ m.}$$

Generalmente se considera un margen de seguridad para el espacio por encima y por debajo de los platos para la entrada y salida de los vapores y productos.

3.3.5.3 Determinación de la altura de la torre de destilación.

Supongamos una altura adicional 2 mts para el sistema de entrada, salida y factor de seguridad:

ECUACIÓN 20 CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA TORRE DE DESTILACIÓN

$$H = H_{placas} + H_{adicional}$$

$$H = 3m + 2m \quad \Rightarrow \quad H = 5m.$$

3.3.5.4 Determinación del diámetro de la torre de destilación.

Para hallar el diámetro de la torre de destilación se emplea la siguiente formula:

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * H \quad \Rightarrow$$

ECUACIÓN 21 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN.

$$d = 2 * \sqrt{\frac{V}{\pi * H}}$$

Donde:

d = Diametro (m)

H = Altura de torre de destilación (m)

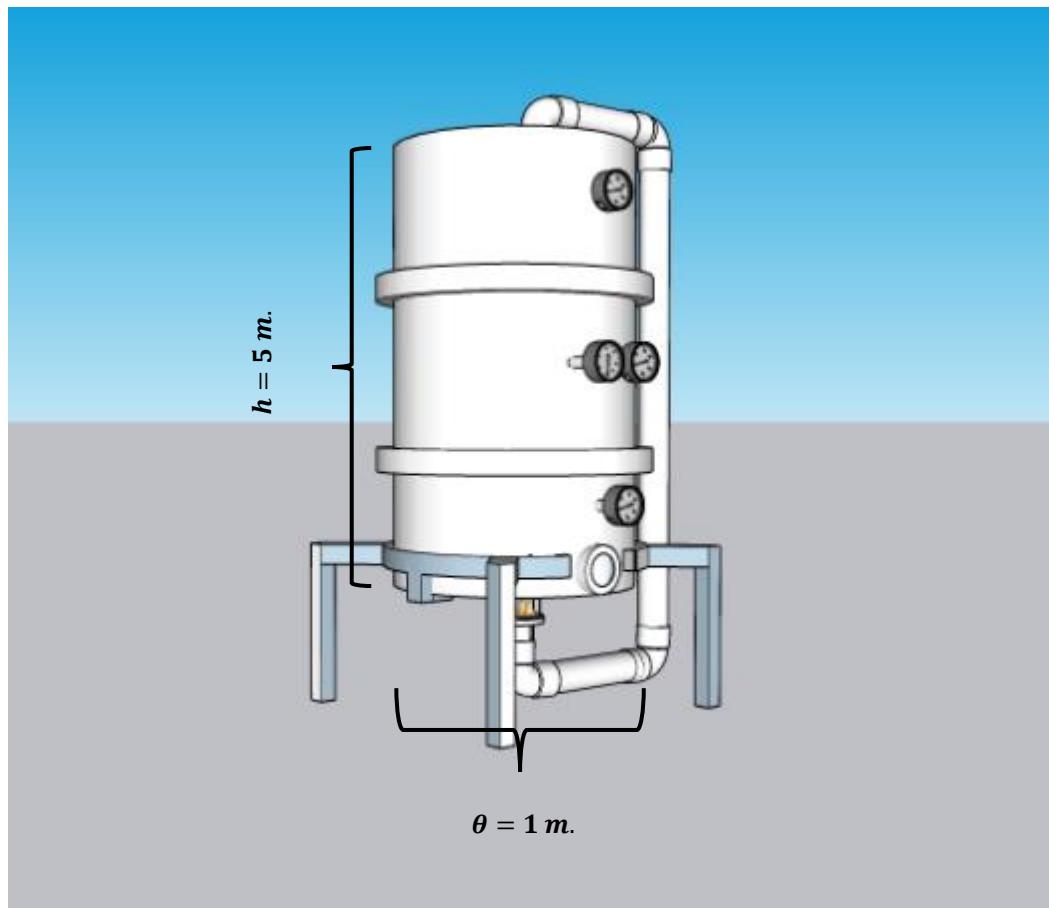
V = Volumen de aceite procesado.

Reemplazando:

Tomando en cuenta el volumen de 4 m^3 teniendo en cuenta un factor de seguridad de 1 m^3 .

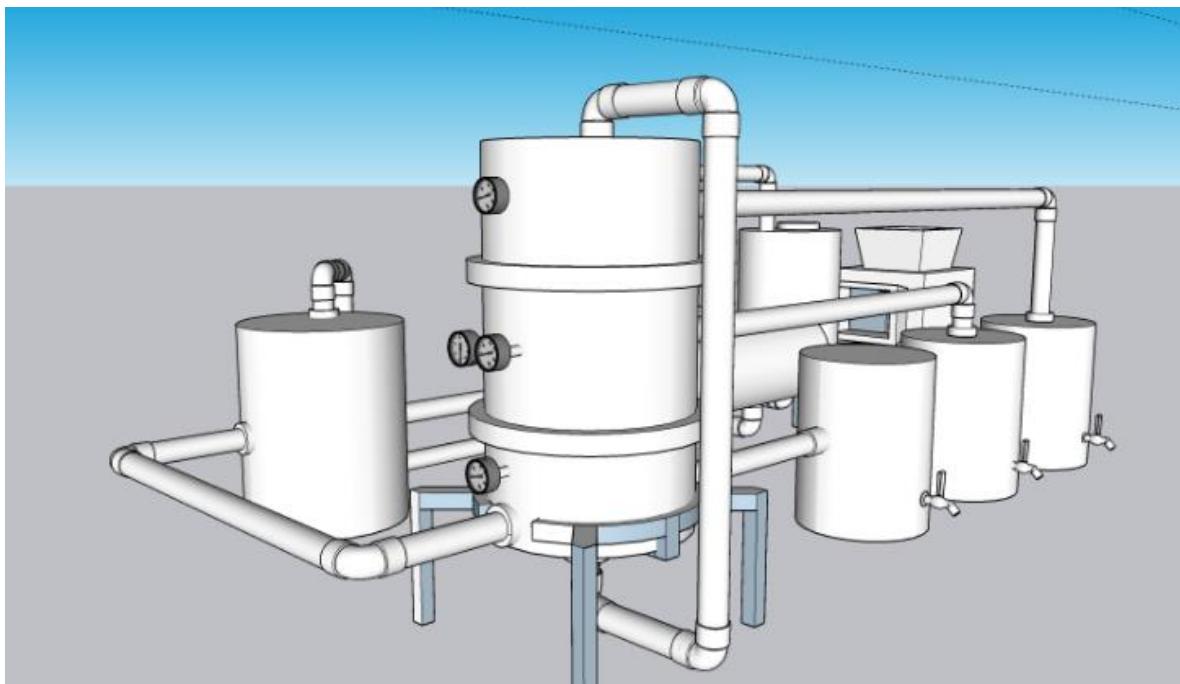
$$d = 2 * \sqrt{\frac{4\text{m}^3}{\pi * 5\text{m}}} \Rightarrow d = 1 \text{ m.}$$

ILUSTRACIÓN 34 DISEÑO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN DE COMBUSTIBLE.



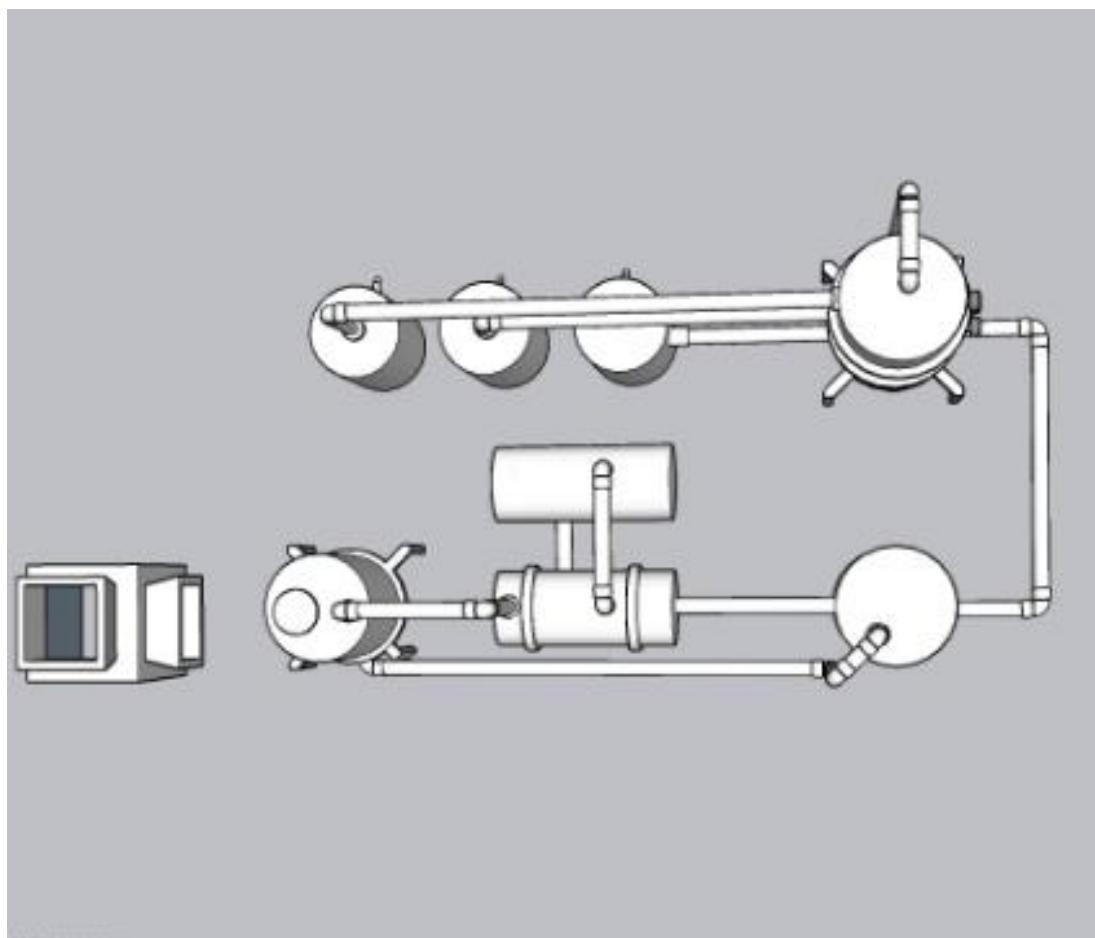
3.3.6 Propuesta de diseño final de la Planta de Pirolisis no Catalítica en la comunidad de “Eco-Recolectoras”.

ILUSTRACIÓN 35 VISTA LATERAL DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.

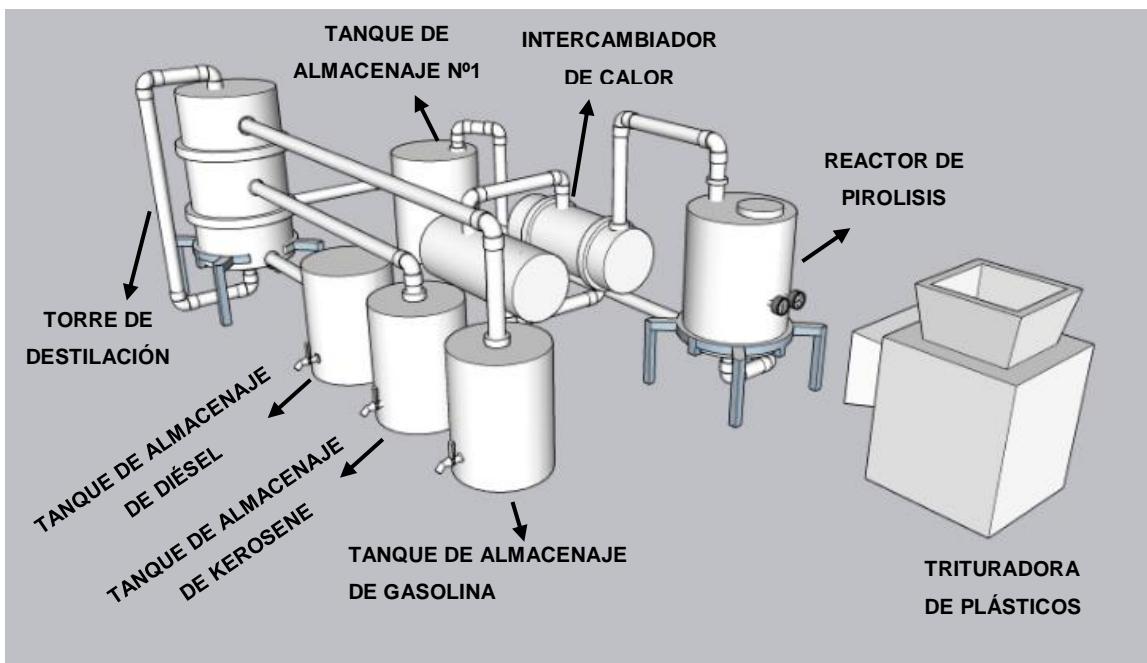


Fuente: elaboración propia; 2024

ILUSTRACIÓN 36 VISTA AÉREA DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.



Fuente: Elaboración propia; 2024

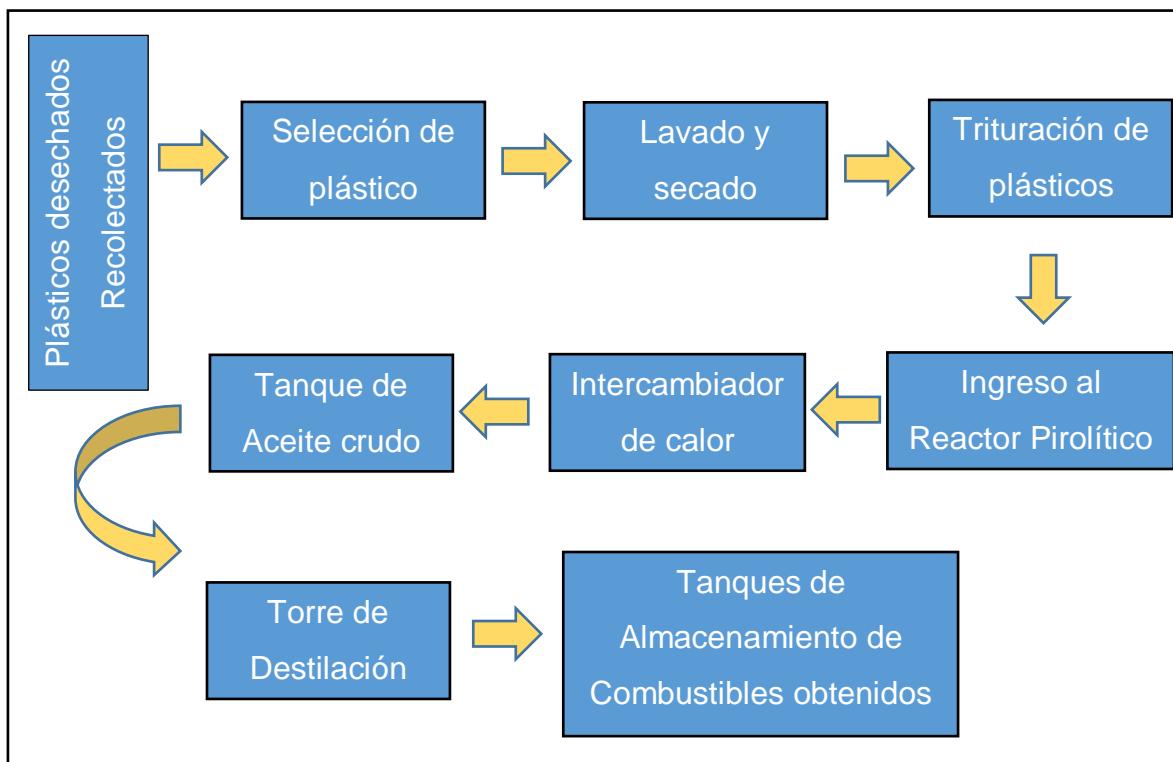
ILUSTRACIÓN 37 VISTA GENERAL DE LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.

Fuente: elaboración propia; 2024

3.4 PROCESO DE PIROLISIS NO CATALITICA QUE ES EJECUTADA EN LA PLANTA.

Para una mejor comprensión del proceso de la pirolisis no catalitica en la siguiente ilustración se demuestra grandes rasgos el proceso a través de un diagrama de bloques.

ILUSTRACIÓN 38 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PIROLISIS NO CATALÍTICA EN LA COMUNIDAD DE “ECO-RECOLECTORAS” DEL MUNICIPIO DE COCHABAMBA.



Fuente: Elaboración propia; 2024.

3.4.1 Proceso de recolección de plásticos desechados.

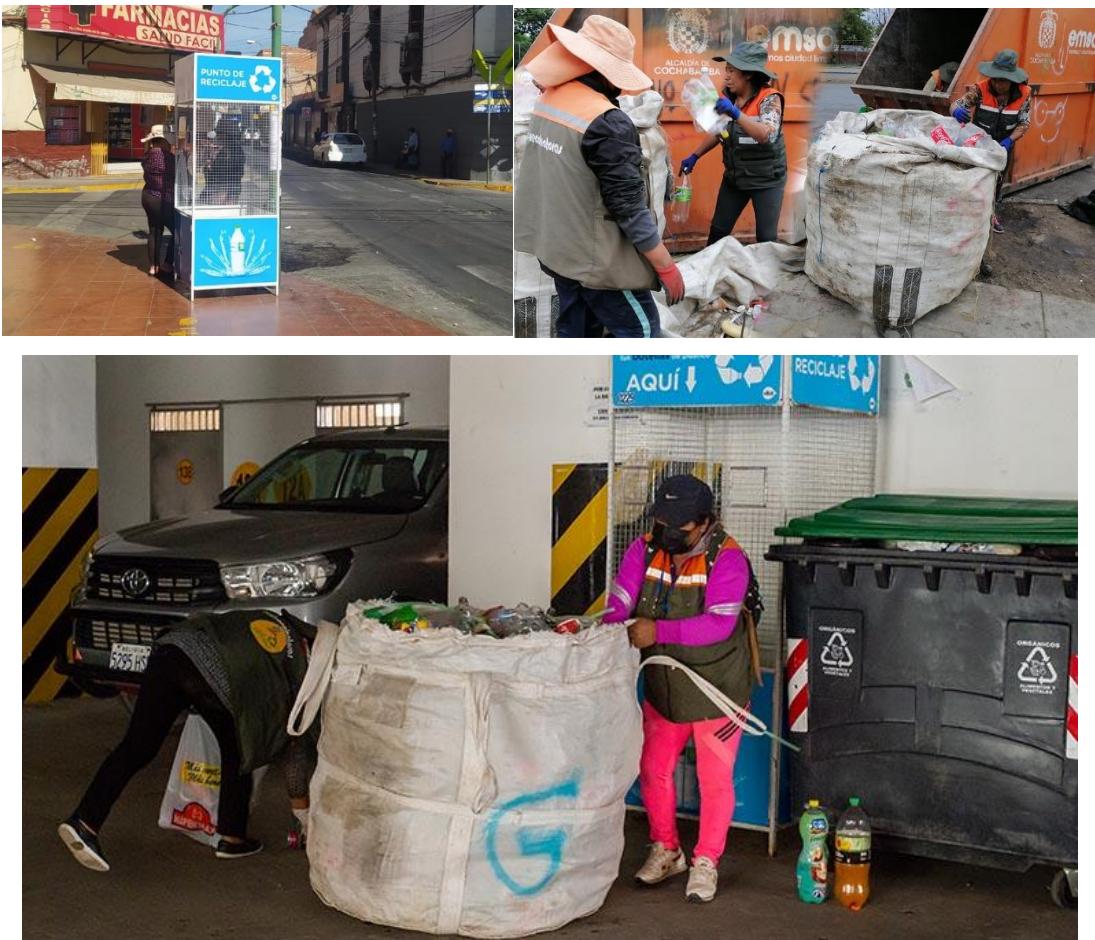
La recolección y reciclado de los plásticos está a cargo de la comunidad de “Eco-Recolectoras” del municipio de Cochabamba, a través de contenedores municipales de acopio de plástico y personas independientes que se dedican a la recolección de todo tipo de plásticos.

ILUSTRACIÓN 39 COMUNIDAD DE "ECO-RECOLECTORAS" ACOPIANDO BOTELLAS (PET)



Fuente: Elaboracion propia; 2024

ILUSTRACIÓN 40 PUNTOS DE ACOPIO Y CONTENEDORES MUNICIPALES DE PLÁSTICOS.



Fuente: Periódico los Tiempos; 2024.

En Cochabamba acerca de 2.274 personas se dedican a tiempo completo a trabajar con residuos reciclables, ya sea recolectando en las calles, contenedores municipales o botaderos. (Valeria Peredo, 2024)

La comunidad de “Eco-Recolectoras” está conformada por más de 150 mujeres que se dedican a la recolección de todo tipo de plásticos. (Vargas, 2024).

Conjuntamente con la comunidad de “Eco-Recolectoras” la planta de Planta de Pirolisis no Catalítica está diseñada para poder procesar alrededor de 5 toneladas de plástico reciclado limpio, seco y triturado por día.

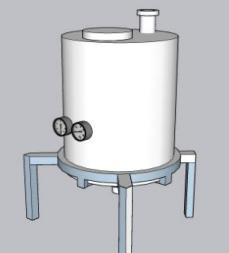
3.4.2 Calculo de variables de trabajo en el reactor pirolítico.

El reactor pirolítico procesa estas 5 toneladas diarias de plásticos reciclados en 2 tandas de 2.5 toneladas.

Cada tanda tiene un tiempo estimado de 6 a 8 horas de procesamiento.

Los polímeros mayormente usados y recolectados en el municipio de Cochabamba son el Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET).

TABLA 7 ESPECIFICACIONES DEL REACTOR DISEÑADO.

REACTOR	DESCRIPCIÓN	MEDIDAS (m)
	Diámetro externo (OD)	1,72 m.
	Diámetro interno (ID)	1,69 m.
	Altura	3,44 m.
	Volumen	7,94 m ³

Fuente: Elaboración Propia; 2024.

Al ingresar la materia prima triturada en el reactor principal de pirolisis, se procede a sellar de tal forma de que este quede sin oxígeno y se comienza a calentar el reactor. La temperatura de trabajo del reactor es medida a través de un termómetro instalado, va indicando gradualmente una subida de temperatura como también la presión que comienzan a ejercer los gases.

Los polímeros o plásticos poseen una temperatura de fusión y una temperatura de degradación. (Roberto Scaffaro, 2019).

TABLA 8 PUNTOS DE FUSIÓN Y DEGRADACIÓN DE LOS POLÍMEROS.

POLÍMERO	PUNTO DE FUSIÓN (°C)	PUNTO DE DEGRADACIÓN (°C)
Polietileno (PE)	115-135	335-450
Polipropileno (PP)	130-171	350-450
Poliestireno (PS)	210-250	300-350
Polietilentereftalato (PET)	250-260	350-500

Fuente: MDPI; 2024.

3.4.2.1 Simulación teórica de la primera tanda del proceso de pirolisis dentro del reactor con los polímeros Polietileno (PE) y Polipropileno (PP).

Asumiendo teóricamente que la primera tanda de plásticos reciclados que ingresa al reactor solo está compuesta por polietileno y polipropileno.

- Para poder crear una tabla de comportamiento de los 2 polímeros seleccionados se toma en cuenta los datos siguientes:

$$P_i = 1 \text{ atm}$$

$$T_i = 21^\circ\text{C} \Rightarrow 294 \text{ }^\circ\text{k (condiciones normales)}$$

$$T_f = 500^\circ\text{C} \Rightarrow 773 \text{ }^\circ\text{k}$$

Para hallar la presión final se emplea la ley de gases ideales donde:

ECUACIÓN 22 CALCULO DE LA PRESIÓN FINAL SEGÚN LA LEY DE LOS GASES IDEALES.

$$\frac{P_f}{P_i} = \frac{T_f}{T_i} \quad \Rightarrow \quad P_f = P_i * \frac{T_f}{T_i}$$

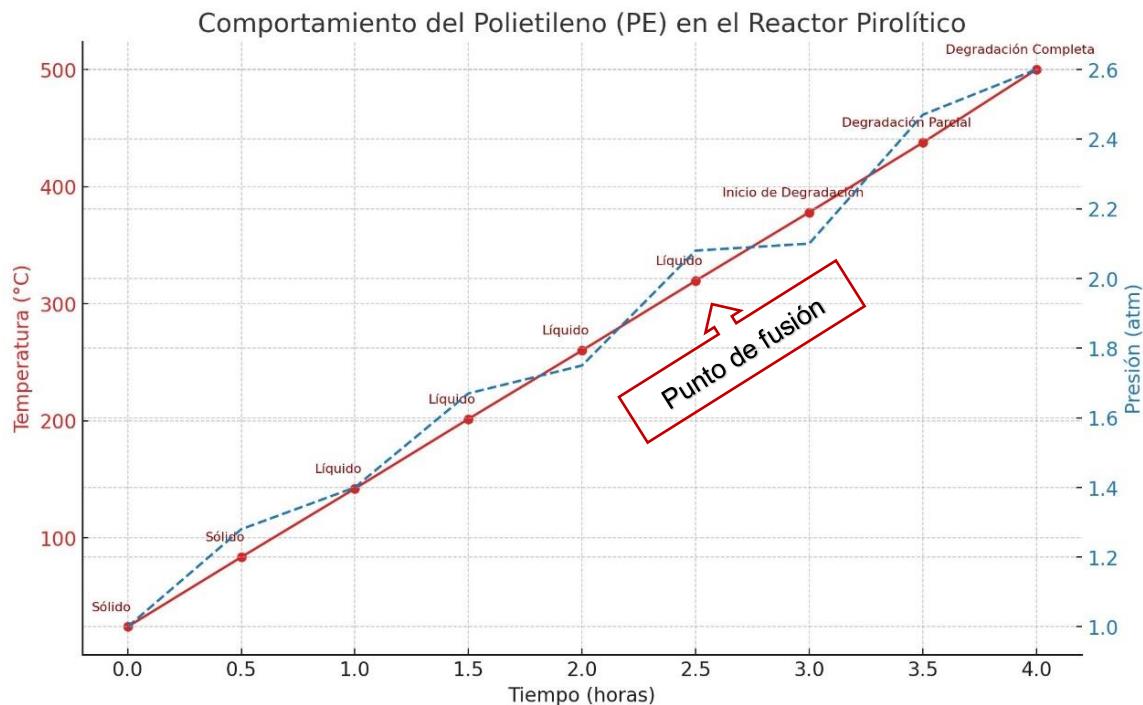
Remplazando los datos:

$$P_f = 1 \text{ atm} * \frac{773 \text{ }^{\circ}\text{k}}{294 \text{ }^{\circ}\text{k}} \Rightarrow P_f = 2,60 \text{ atm.}$$

TABLA 9 COMPORTAMIENTO DEL POLIETILENO Y POLIPROPILENO DENTRO DEL REACTOR

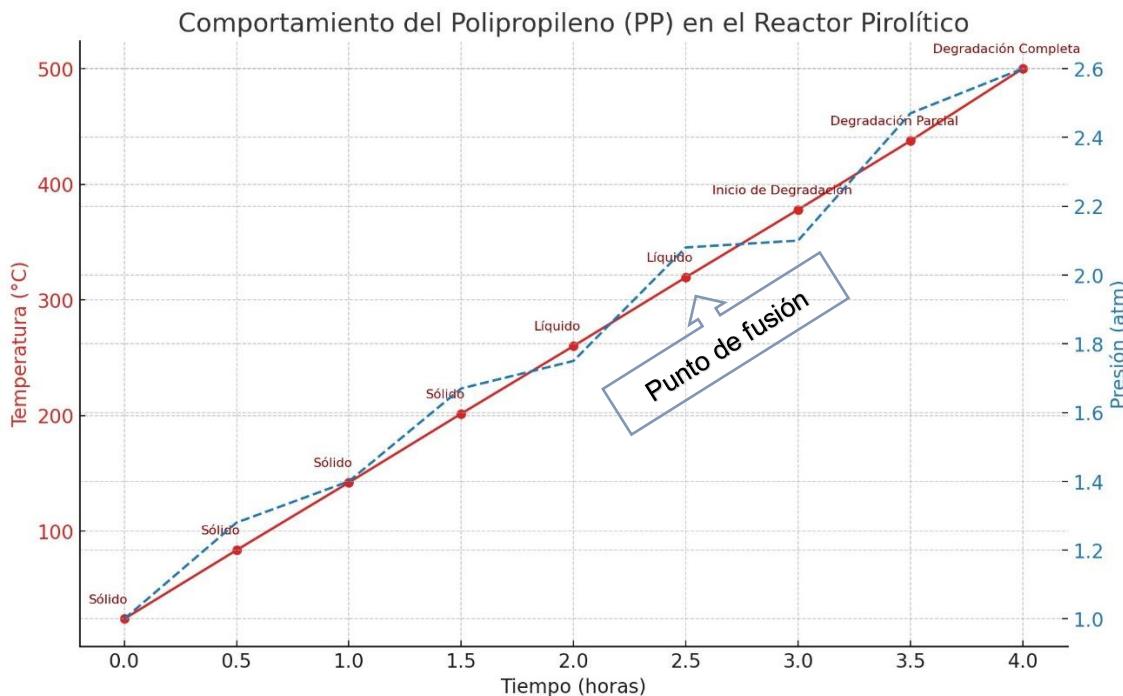
Tiempo (hrs)	Temperatura (°C)	Polietileno (Fusión)	PE Y PP (Degradación)	Polipropileno (Fusión)	Presión (atm)
0	24	Solido	No	Solido	1
0,5	83,5	Solido	No	Solido	1,28
1	142	Líquido	No	Solido	1,40
1,5	201,5	Líquido	No	Solido	1,67
2	260	Líquido	No	Líquido	1,75
2,5	319,5	Líquido	No	Líquido	2,08
3	378	Líquido	Inicio degradación	Líquido	2,10
3,5	437,5	Líquido	Degradación	Líquido	2,47
4	500	Líquido	Degradación completa	Líquido	2,60

Fuente: elaboración propia; 2024

ILUSTRACIÓN 41 COMPORTAMIENTO DEL POLIETILENO (PE) EN EL REACTOR PIROLÍTICO

Fuente: Elaboración Propia; 2024.

ILUSTRACIÓN 42 COMPORTAMIENTO DEL POLIPROPILENO (PP) EN EL REACTOR PIROLÍTICO



Fuente: Elaboracion propia; 2024

- **Se procede a calcular el poder calorífico que precisa la materia prima para llegar a su punto de degradación en un tiempo estimado de 4 hrs.**

El calor específico del polietileno en baja densidad típicamente es de $2300\text{J/kg} * ^\circ\text{C}$, del polietileno de alta densidad es de $2200\text{J/kg} * ^\circ\text{C}$ y del polipropileno típicamente es de $1920\text{J/kg} * ^\circ\text{C}$ (MatWeb, 2024)

Teniendo el calor específico que suelen presentar típicamente estos tipos de polímeros se saca el promedio de estos calores específicos.

ECUACIÓN 23 PROMEDIO DE CALOR ESPECIFICO ENTRE EL POLIETILENO Y POLIPROPILENO PARA LA PRIMERA TANDA.

$$cp = \frac{cp_{PE(LDPE)} + cp_{PE(HDPE)} + cp_{PP}}{3}$$

Remplazando:

$$cp = \frac{2300 J/kg * {}^{\circ}C + 2200 J/kg * {}^{\circ}C + 1920 J/kg * {}^{\circ}C}{3} \Rightarrow cp = 2140 J/kg * {}^{\circ}C$$

El calor necesario para elevar la temperatura del material se calcula mediante la ecuación:

ECUACIÓN 24 CALCULO DE CALOR NECESARIO.

$$Q = m * cp * \Delta T$$

Donde:

Q = Calor (J)

m = Masa (Kg)

cp = Calor específico ($J/kg * {}^{\circ}C$)

ΔT = Cambio de temperatura (${}^{\circ}C$)

Remplazando con los datos anteriores:

Q = Calor (J)

m = 2.500 (Kg)

cp = 2.140 ($J/kg * {}^{\circ}C$)

ΔT = 500 – 24 (${}^{\circ}C$)

$$Q = 2.500 \text{ Kg} * 2.140 \text{ J/kg} * {}^{\circ}C * (500 {}^{\circ}C - 24 {}^{\circ}C) \Rightarrow Q = 2,55 * 10^9 \text{ J}$$

Teniendo el calor necesario se procede a calcular el poder calorífico necesario:

ECUACIÓN 25 CALCULO DEL PODER CALORÍFICO.

$$P = \frac{Q}{t}$$

Donde:

P = Poder calorífico (kW)

Q = Calor necesario (J)

t = Tiempo (s)

Remplazando:

$$P = \frac{2,55 \times 10^9 J}{14.400 s} \Rightarrow P = 177.083 W \Rightarrow 177.08 kW$$

Para llevar un reactor con 2500 kg de polietileno y polipropileno de 24°C a 500°C en un lapso de 4 horas, se requiere un poder calorífico aproximado de 177,08 kW.

- **Composición del aceite pirolítico resultante del Polietileno (PE) y Polipropileno (PP).**

El aceite pirolítico resultante de la pirólisis de polietileno (PE) y polipropileno (PP) es una mezcla compleja de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos. Los componentes específicos pueden variar dependiendo de las condiciones del proceso de pirólisis, como la temperatura y el tiempo de residencia. (Qureshi, 2021) Sin embargo, algunos componentes comunes del aceite pirolítico resultante de la pirólisis de PE y PP incluyen:

- **Componentes del Aceite Pirolítico de Polietileno (PE).**
 1. Alcanos: pentano, hexano, heptano y octano.
 2. Alquenos: Penteno, Hexeno, Hepteno y Octeno.
 3. Dienos: Isopreno.
 4. Aromáticos: Benceno, Tolueno y Xileno.
 5. Ceras: Parafinas de larga cadena. (Xunrui Wang, 2022)
- **Componentes del Aceite Pirolítico de Polipropileno (PP).**
 1. Alcanos: pentano, hexano, heptano y octano.
 2. Alquenos: Propileno, Buteno, Penteno y Hexeno.
 3. Dienos: Isopreno.
 4. Aromáticos: Benceno, Tolueno y Xileno.
 5. Ceras: Parafinas de larga cadena.

TABLA 10 REPRESENTACIÓN APROXIMADA DE LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE PIROLÍTICO DE PE Y PP

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Alcanos	30 – 50
Alquenos	20 – 40
Aromáticos	10 – 20
Ceras/parafinas	5 – 15

Fuente: Elaboración propia; 2024.

3.4.2.2 Simulación teórica de la segunda tanda del proceso de pirolisis dentro del reactor con los polímeros Poliestireno (PS) y Polietileno Tereftalato (PET).

Asumiendo teóricamente que la segunda tanda de plásticos reciclados que ingresa al reactor solo está compuesta por poliestireno y Polietileno Tereftalato.

- **Para poder crear una tabla de comportamiento de los 2 polímeros seleccionados se toma en cuenta los datos siguientes:**

$$P_i = 1 \text{ atm}$$

$$T_i = 24^\circ\text{C} \Rightarrow 294 \text{ }^\circ\text{k} \text{ (condiciones normales)}$$

$$T_f = 500^\circ\text{C} \Rightarrow 773 \text{ }^\circ\text{k}$$

Para hallar la presión final se emplea la ley de gases ideales donde:

ECUACIÓN 26 CALCULO DE LA PRESIÓN FINAL SEGÚN LA LEY DE LOS GASES IDEALES.

$$\frac{P_f}{P_i} = \frac{T_f}{T_i} \quad \Rightarrow \quad P_f = P_i * \frac{T_f}{T_i}$$

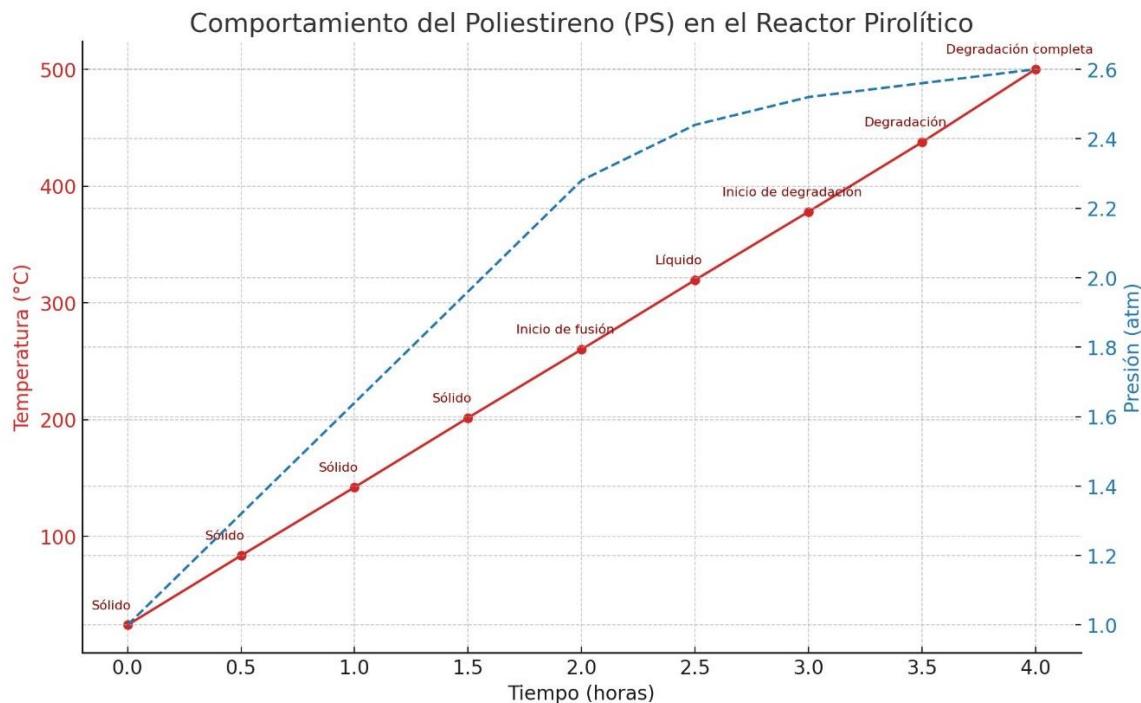
Remplazando los datos:

$$P_f = 1 \text{ atm} * \frac{773 \text{ }^{\circ}\text{k}}{294 \text{ }^{\circ}\text{k}} \Rightarrow P_f = 2,60 \text{ atm.}$$

**TABLA 11 COMPORTAMIENTO DEL POLIESTIRENO Y
POLIETILENTEREFTALATO DENTRO DEL REACTOR**

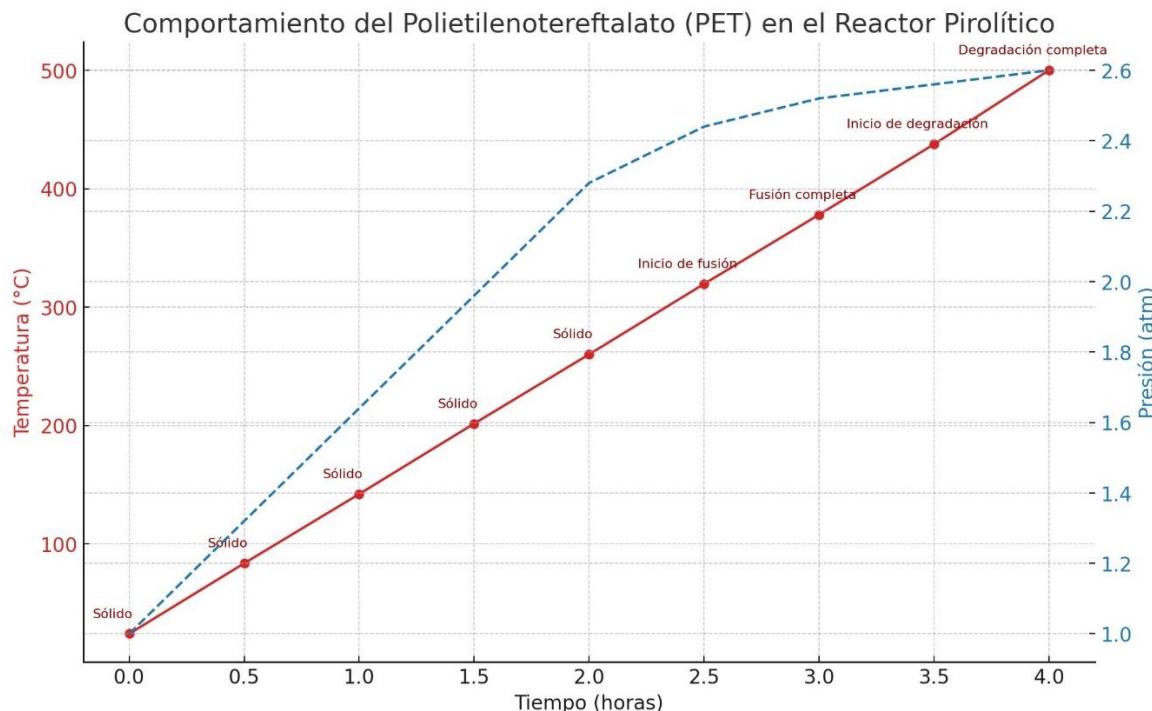
Tiempo (hrs)	Temperatura (°C)	Poliestireno (PS)	Polietilentereftalato (PET)	Presión (atm)
0	24	Solido	Solido	1
0,5	83,5	Solido	Solido	1,32
1	142	Solido	Solido	1,64
1,5	201,5	Solido	Solido	1,96
2	260	Inicio de fusión	Solido	2,28
2,5	319,5	Líquido	Inicio de fusión	2,44
3	378	Inicio de degradación.	Fusión completa	2,52
3,5	437,5	Degradoación	Inicio de degradación	2,56
4	500	Degradoación completa	Degradoación completa	2,60

Fuente: elaboración propia; 2024

ILUSTRACIÓN 43 COMPORTAMIENTO DEL POLIETILENO (PE) EN EL REACTOR PIROLÍTICO

Fuente: Elaboración Propia; 2024.

ILUSTRACIÓN 44 COMPORTAMIENTO DEL POLIPROPILENO (PP) EN EL REACTOR PIROLÍTICO



Fuente: Elaboracion propia; 2024.

- Se procede a calcular el poder calorífico que precisa la materia prima para llegar a su punto de degradación en un tiempo estimado de 4 hrs.

El calor específico del Poliestireno típicamente es de $1.250\text{J/kg} * ^\circ\text{C}$ y del Polietilenteretralato típicamente es de $1.000\text{J/kg} * ^\circ\text{C}$. (MATMAKE, 2024)

Teniendo el calor específico que suelen presentar típicamente estos tipos de polímeros se saca el promedio de estos calores específicos.

ECUACIÓN 27 PROMEDIO DE CALOR ESPECIFICO ENTRE EL POLIETILENO Y POLIPROPILENO PARA LA PRIMERA TANDA.

$$cp = \frac{cp_{PS} + cp_{PET}}{2}$$

Remplazando:

$$cp = \frac{1.250 J/kg * {}^{\circ}C + 1.000 J/kg * {}^{\circ}C}{2} \Rightarrow \boxed{cp = 1.125 J/kg * {}^{\circ}C}$$

El calor necesario para elevar la temperatura del material se calcula mediante la ecuación:

ECUACIÓN 28 CALCULO DE CALOR NECESARIO.

$$Q = m * cp * \Delta T$$

Donde:

Q = Calor (J)

m = Masa (Kg)

cp = Calor específico ($J/kg * {}^{\circ}C$)

ΔT = Cambio de temperatura (${}^{\circ}C$)

Remplazando con los datos anteriores:

Q = Calor (J)

m = 2.500 (Kg)

cp = 1.125 ($J/kg * {}^{\circ}C$)

ΔT = 500 – 24 (${}^{\circ}C$)

$$Q = 2.500 \text{ Kg} * 1.125 \text{ J/kg * } {}^{\circ}\text{C} * (500{}^{\circ}\text{C} - 24{}^{\circ}\text{C}) \Rightarrow \boxed{Q = 1,34 * 10^9 \text{ J}}$$

Teniendo el calor necesario se procede a calcular el poder calorífico necesario:

ECUACIÓN 29 CALCULO DEL PODER CALORÍFICO.

$$P = \frac{Q}{t}$$

Donde:

P = Poder calorífico (kW)

Q = Calor necesario (J)

t = Tiempo (s)

Remplazando:

$$P = \frac{1,34 \cdot 10^9 J}{14.400 s} \Rightarrow P = 93.055 W \Rightarrow 93,06 kW$$

Para llevar un reactor con 2.500 kg de Poliestireno y Polietilentereftalato de 24°C a 500°C en un lapso de 4 horas, se requiere un poder calorífico aproximado de 93,06 kW.

- **Composición del aceite pirolítico resultante del Poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET).**

La composición del aceite pirolítico resultante de la pirolisis de poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET) puede variar dependiendo de las condiciones del proceso, como la temperatura y el tiempo de residencia. Sin embargo, podemos describir algunas de las fracciones y compuestos típicos presentes en estos aceites.

- **Componentes del Aceite Pirolítico de Poliestireno (PS).**

El aceite pirolítico derivado del poliestireno es rico en compuestos aromáticos debido a la estructura del PS. Aquí están algunos de los componentes comunes:

1. Hidrocarburos Aromáticos: Estireno, Etilbenceno, Tolueno, Benceno y Xileno
2. Hidrocarburos ligeros: Metano, Etano, Propano y Butano.

- **Componentes del Aceite Pirolítico de Polipropileno (PP).**

El aceite pirolítico derivado del PET generalmente contiene una mezcla de compuestos aromáticos y oxigenados debido a la estructura del PET y la presencia de grupos éster en su estructura. Algunos componentes típicos incluyen:

1. Hidrocarburos Aromáticos: Benceno, Tolueno y Xileno. (Budsareechai, 2024)

3.4.3 Cálculo del flujo saliente del reactor pirolítico de la primera tanda polietileno y polipropileno.

Asumiendo que la primera tanda de materia prima (2.500 Kg.) está compuesta por 50% de polietileno y el otro 50% de polipropileno.

3.4.3.1 Masa molar del Polietileno (PE) y Polipropileno (PP)

Para calcular la masa molar de estos polímeros se considera las unidades repetitivas de sus estructuras poliméricas, es decir:

- **Polietileno ($C_2H_4)_n$**

$$\text{Carbono (C)} \ 12,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 2 \quad \Rightarrow \quad \text{Carbono (C}_2\text{)} = 24,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Hidrogeno (H)} \ 1,008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 2 \quad \Rightarrow \quad \text{Hidrogeno (H}_4\text{)} = 4,032 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Entonces la masa molar repetitiva del polietileno es:

ECUACIÓN 30 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIETILENO.

$$M_{PE} = \text{Carbono (C}_2\text{)} + \text{Hidrogeno (H}_4\text{)}$$

$$M_{PE} = 24,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 4,032 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad \Rightarrow \quad M_{PE} = 28,05 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

- **Polipropileno ($C_3H_6)_n$**

$$\text{Carbono (C)} \ 12,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 3 \quad \Rightarrow \quad \text{Carbono (C}_3\text{)} = 36,03 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Hidrogeno (H)} \ 1,008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 6 \quad \Rightarrow \quad \text{Hidrogeno (H}_6\text{)} = 6,048 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Entonces la masa molar repetitiva del polipropileno es:

ECUACIÓN 31 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIPROPILENO

$$M_{PE} = \text{Carbono (C}_3\text{)} + \text{Hidrogeno (H}_6\text{)}$$

$$M_{PE} = 36,03 \frac{g}{mol} + 6,048 \frac{g}{mol} \Rightarrow M_{PP} = 42,08 \frac{g}{mol}$$

1.250 Kg pertenecen al polietileno y los otros 1.250 Kg son polipropileno lo cual convirtiendo a gramos sus datos serian:

$$\text{Masa de polietileno} = 1250\text{kg} * 1000\text{g/kg} \Rightarrow \text{Masa de polietileno} = 1.250.000 \text{ g.}$$

$$\text{Masa de propileno} = 1250\text{kg} * 1000\text{g/kg} \Rightarrow \text{Masa de propileno} = 1.250.000 \text{ g.}$$

3.4.3.2 Determinación de la masa de los materiales a moles.

Para calcular los moles de cada material sometido a pirólisis, se emplea la siguiente fórmula:

ECUACIÓN 32 CÁLCULO DE LOS MOLES DEL POLIETILENO Y PROPILENO.

$$n = \frac{m}{M}$$

Donde:

n = numero de moles (mol)

m = masa (g)

M = Masa molar del Polímero ($\frac{g}{mol}$)

Para el polietileno:

$$n_{PE} = \frac{1.250.000 g}{28,05 \frac{g}{mol}} \Rightarrow n_{PE} = 44.556 mol$$

Para el propileno:

$$n_{PE} = \frac{1.250.000 \text{ g}}{42,08 \text{ g/mol}} \Rightarrow n_{PE} = 29.702 \text{ mol}$$

3.4.3.3 Cálculo de los moles de gas utilizando la ley de los gases.

La ley de los gases ideales está determinada por:

ECUACIÓN 33 CALCULO DE LOS MOLES DE GAS SEGÚN LA LEY DE GASES IDEALES,

$$PV = nRT \Rightarrow n = \frac{PV}{RT}$$

Donde:

P = Presión (atm)

V = Volumen (L)

R = Constante de los gases ideales $0,0821 \text{ L} * \text{atm} / \text{mol} * {}^\circ\text{K}$

T = Temperatura (${}^\circ\text{K}$)

Convirtiendo la temperatura inicial y final en ${}^\circ\text{K}$

$$T_i = 24 {}^\circ\text{C} + 273,15 \Rightarrow T_i = 297.15 {}^\circ\text{K}$$

$$T_f = 500 {}^\circ\text{C} + 273,15 \Rightarrow T_f = 773.15 {}^\circ\text{K}$$

Convirtiendo el volumen del tanque en litros:

$$V = 7.94 \text{ m}^3 * 1.000 \text{ L/m}^3 \Rightarrow V = 7.940 \text{ L}$$

- **Moles iniciales a 1 atm y 24 °C**

$$n_i = \frac{1 \text{ atm} * 7.940 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} * \text{atm} / \text{mol} * {}^\circ\text{K} * 297.15 {}^\circ\text{K}} \Rightarrow n_i = 326,1 \text{ mol}$$

- Moles finales a 2,60 atm y 500 °C

$$n_f = \frac{2,60 \text{ atm} * 7.940 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} * \text{atm} / \text{mol} * \text{K} * 773,15 \text{ K}} \Rightarrow n_f = 329,4 \text{ mol}$$

3.4.3.4 Cambio en el número de moles que sufre durante el proceso térmico del reactor.

ECUACIÓN 34 CAMBIO DE NUMERO DE MOLES EN EL REACTOR

$$n_{convertidos} = n_f - n_i$$

$$n_{convertidos} = 329,4 \text{ mol} - 326,1 \text{ mol} \Rightarrow n_{convertidos} = 3,3 \text{ mol.}$$

3.4.3.5 Flujo molar y flujo másico de salida del reactor.

- Flujo molar.

ECUACIÓN 35 CALCULO DEL FLUJO MOLAR DE SALIDA DEL REACTOR.

$$\dot{n} = \frac{\dot{n}_{convertido}}{t}$$

$$\dot{n} = \frac{3,3 \text{ mol}}{14.400 \text{ s}} \Rightarrow \dot{n} = 0,000229 \text{ mol/s}$$

- Flujo másico.

ECUACIÓN 36 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSICO

$$\dot{m} = \dot{n} + M_{promedio}$$

Donde:

$$\dot{m} = \text{Flujo masico} (\text{g/s})$$

$$\dot{n} = \text{Flujo molar} (\text{mol/s})$$

$$M_{promedio} = \text{Masa molar promedio} \text{ g/mol}$$

La masa molar promedio será la suma de las masas molares del polietileno y polipropileno divididas entre 2:

ECUACIÓN 37 MASA MOLAR PROMEDIO.

$$M_{promedio} = \frac{M_{PE} + M_{PP}}{2}$$

$$M_{promedio} = \frac{28,05 \text{ g/mol} + 42,08 \text{ g/mol}}{2} \Rightarrow M_{promedio} = 35,065 \text{ g/mol}$$

Entonces, remplazando en la ecuación 36:

$$\dot{m} = \dot{n} + M_{promedio}$$

$$\dot{m} = 0,000229 \text{ mol/s} * 35,065 \text{ g/mol} \Rightarrow \dot{m} = 0,00803 \text{ g/s}$$

Por lo cual según los cálculos realizados el flujo másico de la primera tanda de Polietileno y Polipropileno de gas o vapor que sale del reactor pirolítico es de 0,00803 g/s.

3.4.4 Cálculo del flujo saliente del reactor pirolítico de la segunda tanda Poliestireno y Polietilentereftalato.

Asumiendo que la segunda tanda de materia prima está compuesta por 50% de Poliestireno y el otro 50% de Polietilentereftalato es decir de los otros 2.500 Kg.

3.4.4.1 Masa molar del Poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET)

Para calcular la masa molar de estos polímeros se considera las unidades repetitivas de sus estructuras poliméricas, es decir:

- **Poliestireno ($C_8H_8)_n$**

$$\text{Carbono (C)} 12,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 8 \Rightarrow \text{Carbono (C}_8\text{)} = 96,08 \text{ g/mol}$$

$$\text{Hidrogeno (H)} \ 1,008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 8 \Rightarrow \text{Hidrogeno (H}_8\text{)} = 8,064 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Entonces la masa molar repetitiva del poliestireno es:

ECUACIÓN 38 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIESTIRENO

$$M_{PS} = \text{Carbono (C}_8\text{)} + \text{Hidrogeno (H}_8\text{)}$$

$$M_{PS} = 96,08 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 8,064 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \Rightarrow M_{PS} = 104,14 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

- **Polietilentereftalato (C₁₀H₈O₄)_n**

$$\text{Carbono (C)} \ 12,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 10 \Rightarrow \text{Carbono (C}_{10}\text{)} = 120,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Hidrogeno (H)} \ 1,008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 8 \Rightarrow \text{Hidrogeno (H}_8\text{)} = 8,064 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Oxigeno (O)} \ 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 4 \Rightarrow \text{Oxigeno (O}_4\text{)} = 64 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Entonces la masa molar repetitiva del Polietilentereftalato es:

ECUACIÓN 39 CALCULO DE LA MASA MOLAR DEL POLIETILENTEREFTALATO.

$$M_{PET} = \text{Carbono (C}_3\text{)} + \text{Hidrogeno (H}_6\text{)} + \text{Oxigeno (O}_4\text{)}$$

$$M_{PET} = 120,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 8,064 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 64 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \Rightarrow M_{PET} = 192,16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

1.250 Kg pertenecen al Poliestireno y los otros 1.250 Kg son Polietilentereftalato lo cual convirtiendo a gramos sus datos serian:

$$\text{Masa de poliestireno} = 1250\text{kg} * 1000\text{g/kg} \Rightarrow \text{Masa de poliestireno} = 1.250.000 \text{ g.}$$

$$\text{Masa del PET} = 1250\text{kg} * 1000\text{g/kg} \Rightarrow \text{Masa de PET} = 1.250.000 \text{ g.}$$

3.4.4.2 Determinación de la masa de los materiales a moles.

Para calcular los moles de cada material sometido a pirólisis, se emplea la siguiente fórmula:

ECUACIÓN 40 CÁLCULO DE LOS MOLES DEL POLIESTIRENO Y POLIETILENTEREFTALATO.

$$n = \frac{m}{M}$$

Donde:

n = numero de moles (mol)

m = masa (g)

M = Masa molar del Polímero (g/mol)

Para el poliestireno:

$$n_{PS} = \frac{1.250.000 \text{ g}}{104,14 \text{ g/mol}} \Rightarrow n_{PS} = 12.000,77 \text{ mol}$$

Para el propileno:

$$n_{PET} = \frac{1.250.000 \text{ g}}{192,16 \text{ g/mol}} \Rightarrow n_{PET} = 6.503,84 \text{ mol}$$

3.4.4.3 Flujo másico de salida del reactor de la segunda tanda de PS y PET.

- Flujo másico.

ECUACIÓN 41 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSICO DE LA SEGUNDA TANDA DE PS Y PET.

$$\dot{m} = \dot{n} * M_{promedio}$$

Donde:

\dot{m} = Flujo masico (g/s)

\dot{n} = Flujo molar (mol/s)

$M_{promedio}$ = Masa molar promedio g/mol

La masa molar promedio será la suma de las masas molares del polietileno y polipropileno divididas entre 2:

ECUACIÓN 42 MASA MOLAR PROMEDIO.

$$M_{promedio} = \frac{M_{PE} + M_{PP}}{2}$$

$$M_{promedio} = \frac{104,14 g/mol + 192,16 g/mol}{2} \Rightarrow M_{promedio} = 148,15 g/mol$$

Entonces, remplazando en la ecuación 36:

$$\dot{m} = \dot{n} * M_{promedio}$$

$$\dot{m} = 0,000229 mol/s * 148,15 g/mol \Rightarrow \dot{m} = 0,0339 g/s$$

Por lo cual según los cálculos realizados el flujo másico de gas o vapor que sale del reactor pirolítico en la segunda tanda es de $0,0339 g/s$.

3.4.5 Cálculo de la velocidad con la que sale el gas hacia el intercambiador de calor en la primera tanda.

Para calcular la velocidad con la que salen los flujos de gas y vapor del reactor se emplea la ecuación de continuidad que relaciona el flujo volumétrico, el área de salida y la velocidad del gas.

3.4.5.1 Flujo volumétrico.

El flujo volumétrico se puede calcular usando la ley de los gases ideales y el flujo molar de gas calculado anteriormente.

ECUACIÓN 43 CÁLCULO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO

$$PV = nRT \quad \Rightarrow \quad \dot{V} = \frac{nRT}{P}$$

Donde:

\dot{V} = Flujo Volumétrico (L/s)

\dot{n} = Flujo Molar (mol/s)

P = Presión (atm)

R = Constante de los gases ideales $0,0821 \frac{L * atm}{mol * ^\circ K}$

T = Temperatura ($^\circ K$)

Empleando la temperatura final, presión final y Flujo molar que se calcularon anteriormente:

$$\dot{V} = \frac{0,000229 \frac{mol}{s} * 0,0821 \frac{L * atm}{mol * ^\circ K} * 773,15 \text{ } ^\circ K}{2,60 \text{ atm}}$$

$$\dot{V} = 0,0056 \frac{L}{s} \Rightarrow 5,10 * 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

3.4.5.2 Calculo de velocidad de salida.

ECUACIÓN 44 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SALIDA DE LOS GASES EN BASE A LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.

$$\dot{V} = A * v \quad \Rightarrow \quad v = \frac{\dot{V}}{A}$$

Donde:

\dot{V} = Flujo Volumétrico (m^3/s)

A = Área de salida (m^2)

v = velocidad de salida (m/s)

- **Determinación del área de salida.**

El gas sale por las tuberías por lo cual se emplea la siguiente fórmula:

ECUACIÓN 45 CÁLCULO DEL ÁREA DE SALIDA DE LOS GASES DEL REACTOR

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

El dato del diámetro será el del diámetro interno de la tubería 0,050 m.

$$A = \pi * \left(\frac{0,050\ m.}{2}\right)^2 \Rightarrow A = 0.001963\ m^2$$

Usando la ecuación de continuidad despejada anteriormente:

$$v = \frac{5,10 \cdot 10^{-6}\ m^3/s}{0,001963\ m^2} \Rightarrow v = 0,0026\ m/s$$

La velocidad con la que salen los flujos de gas y vapor del reactor pirolítico es aproximadamente $0,0026\ m/s$

3.4.6 Proceso del intercambiador de calor con el gas resultante de la primera tanda procesada en el reactor.

Tomando en cuenta los siguientes datos calculados anteriormente:

Flujo Masa de los gases PE y PP (\dot{m}_{gas}) = $0,00803\ g/s \Rightarrow 0,00000803\ Kg/s$

Temperatura de entrada de los gases (T_{in-gas}) = $500^\circ C$

Temperatura de salida de los gases ($T_{out-gas}$) = $100^\circ C$

$$Capacidad Calorifica del gas del PE y PP (c_{p-gas}) = 2.140 \frac{J}{Kg * ^\circ C}$$

$$Capacidad Calorifica del agua de enfriamiento (c_{p-agua}) = 4.180 \frac{J}{Kg * ^\circ C}$$

3.4.6.1 Calor transferido de la primera tanda (Q).

Primero, calculamos el calor transferido por el gas, considerando tanto el calor sensible como el calor de vaporización.

- **Calor sensible**

ECUACIÓN 46 CÁLCULO DEL CALOR SENSIBLE DEL PE y PP.

$$Q_{sensible\ PE-PP} = \dot{m}_{gas} * c_{p-gas} (T_{in-gas} - T_{out-gas})$$

Donde:

$Q_{sensible\ PE-PP}$ = Calor sensible del gas de PE y PP (W)

\dot{m}_{gas} = Flujo Masico del gas (Kg/s)

$T_{out-gas}$ = Temperatura de salida del gas ($^\circ C$)

T_{in-gas} = Temperatura de entrada del gas ($^\circ C$)

$\Delta H_{vaporizacion}$ = calor de vaporizacion del gas $483,63 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \Rightarrow 483.630 \left(\frac{J}{kg} \right)$

$$Q_{sensible} = 0,00000803 \frac{Kg}{s} * 2.140 \frac{J}{Kg * ^\circ C} * (500^\circ C - 100^\circ C)$$

$$\Rightarrow Q_{sensible\ PE-PP} = 6,87 W$$

- **Calor de latente.**

ECUACIÓN 47 CÁLCULO DEL CALOR LATENTE (CONDENSACIÓN DEL GAS)

$$Q_{lat} = \dot{m}_{gas} * \Delta H_{vap}$$

$$Q_{lat} = 0,00000803 \frac{Kg}{s} * 483.630 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \Rightarrow Q_{latente} = 3,88 W$$

Entonces el calor total será la sumatoria del cálculo del calor latente y sensible:

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{lat} \Rightarrow Q_{total} = 6,87 \text{ W} + 3,88 \text{ W}$$

$$\Rightarrow Q_{total} = 10,75 \text{ W}$$

Para calcular el flujo de agua necesario se emplea la anterior ecuación y se despeja el flujo mísico del agua.

ECUACIÓN 48 CÁLCULO DEL FLUJO DE AGUA NECESARIO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

$$Q = \dot{m}_{agua} * (c_{p-agua} * (T_{out-agua} - T_{in-agua})) \Rightarrow \dot{m}_{agua} = \frac{Q_{total}}{c_{p-agua} * (T_{out-agua} - T_{in-agua})}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{10,75 \text{ W}}{4,180 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C} * (60^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C})} \Rightarrow \dot{m}_{agua} = 7,14 * 10^{-5} \text{ kg/s}$$

3.4.6.2 Flujo de salida de los gases condensados y no condensados.

Para determinar el flujo de salida de los gases convertidos en líquido en el intercambiador de calor, debemos considerar la conversión de masa del gas a líquido, teniendo en cuenta el calor de vaporización.

ECUACIÓN 49 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DEL GAS CONDENSADO.

$$\dot{m}_{condensada} = \frac{Q_{latente}}{\Delta H_{vaporizacion}}$$

Donde:

$\dot{m}_{condensada}$ = Masa de gas condensada (kg/s)

$Q_{latente}$ = Calor latente (W)

$\Delta H_{vaporizacion}$ = Calor de vaporizacion de los gases (J/kg)

$$\dot{m}_{condensada} = \frac{3,88 W}{483.630 J/kg} \Rightarrow \dot{m}_{condensada} = 8,02 * 10^{-6} kg/s$$

Para hallar el flujo de masa de gas no condensado se resta el flujo de masa total de gas menos el flujo de masa de gas condensado; es decir:

ECUACIÓN 50 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DE GAS NO CONDENSADO

$$\dot{m}_{no\ condensada} = \dot{m}_{total\ de\ gas} - \dot{m}_{condensada}$$

Reemplazando:

$$\dot{m}_{no\ condensada} = 0,00000803 kg/s - 8,02 * 10^{-6} kg/s$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{no\ condensada} = 1 * 10^{-6} kg/s$$

Es decir que la mayor parte del gas entrante al intercambiador de calor fue convertida en líquido y quedo un pequeño porcentaje que no se condensa.

Este gas no condensado pasa a reinyectarse al generador de calor del reactor para evitar daños ambientales.

3.4.7 Proceso del intercambiador de calor con el gas resultante de la segunda tanda procesada en el reactor.

Tomando en cuenta los siguientes datos calculados anteriormente:

Flujo Masico de los gases PS y PET (\dot{m}_{gas}) = $0,0339 g/s \Rightarrow 0,0000339 Kg/s$

Temperatura de entrada de los gases (T_{in-gas}) = $500^\circ C$

Temperatura de salida de los gases ($T_{out-gas}$) = $100^\circ C$

$$Capacidad Calorifica del gas del PS y PET (c_{p-gas\ PS-PET}) = 1.150 \frac{J}{Kg * ^\circ C}$$

$$Capacidad Calorifica del agua de enfriamiento (c_{p-agua}) = 4.184 \frac{J}{Kg * ^\circ C}$$

3.4.7.1 Calor transferido (Q).

Primero, calculamos el calor transferido por el gas, considerando tanto el calor sensible como el calor de vaporización.

- **Calor sensible**

ECUACIÓN 51 CÁLCULO DEL CALOR SENSIBLE.

$$Q_{sensible} = \dot{m}_{gas} * c_{p-gas} (T_{in-gas} - T_{out-gas})$$

Donde:

$$Q_{sensible} = Calor\ sensible\ (W)$$

$$\dot{m}_{gas} = Flujo\ Masico\ del\ gas\ (\frac{Kg}{s})$$

$$T_{out-gas} = Temperatura\ de\ salida\ del\ gas\ (^^\circ C)$$

$$T_{in-gas} = Temperatura\ de\ entrada\ del\ gas\ (^^\circ C)$$

$$\Delta H_{vaporizacion} = calor\ de\ vaporizacion\ del\ gas\ 483,63\left(\frac{kJ}{kg}\right) \Rightarrow 483.630\left(\frac{J}{kg}\right)$$

$$Q_{sensible} = 0,0000339 \frac{Kg}{s} * 1.150 \frac{J}{Kg * ^\circ C} * (500^\circ C - 100^\circ C)$$

$$\Rightarrow Q_{sensible} = 15,59\ W$$

- **Calor de latente.**

ECUACIÓN 52 CÁLCULO DEL CALOR LATENTE

$$Q_{lat} = \dot{m}_{gas} * \Delta H_{vap}$$

$$Q_{lat} = 0,0000339 \frac{Kg}{s} * 483.630\left(\frac{kJ}{kg}\right) \Rightarrow Q_{latente} = 16,40\ W$$

Entonces el calor total será la sumatoria del cálculo del calor latente y sensible:

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{lat} \Rightarrow Q_{total} = 15,59 \text{ W} + 16,40 \text{ W}$$

$$\Rightarrow Q_{total} = 31,99 \text{ W}$$

Para calcular el flujo de agua necesario se emplea la anterior ecuación y se despeja el flujo mísico del agua.

ECUACIÓN 53 CÁLCULO DEL FLUJO DE AGUA NECESARIO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

$$Q = \dot{m}_{agua} * (c_{p-agua} * (T_{out-agua} - T_{in-agua})) \Rightarrow \dot{m}_{agua} = \frac{Q}{c_{p-agua} * (T_{out-agua} - T_{in-agua})}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{31,90 \text{ W}}{4.180 \text{ J/Kg} * ^\circ \text{C} * (60^\circ \text{C} - 24^\circ \text{C})} \Rightarrow \dot{m}_{agua} = 21,26 * 10^{-5} \text{ kg/s}$$

3.4.7.2 Flujo de salida de los gases condensados y no condensados.

Para determinar el flujo de salida de los gases convertidos en líquido en el intercambiador de calor, debemos considerar la conversión de masa del gas a líquido, teniendo en cuenta el calor de vaporización.

ECUACIÓN 54 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DEL GAS CONDENSADO.

$$\dot{m}_{condensada} = \frac{Q_{latente}}{\Delta H_{vaporizacion}}$$

Donde:

$\dot{m}_{condensada}$ = Masa de gas condensada (kg/s)

$Q_{latente}$ = Calor latente (W)

$\Delta H_{vaporizacion}$ = Calor de vaporización de los gases (J/kg)

$$\dot{m}_{condensada} = \frac{16,40 \text{ W}}{483,630 \text{ J/kg}} \Rightarrow \dot{m}_{condensada} = 33,91 * 10^{-6} \text{ kg/s}$$

Para hallar el flujo de masa de gas no condensado se resta el flujo de masa total de gas menos el flujo de masa de gas condensado; es decir:

ECUACIÓN 55 CÁLCULO DEL FLUJO DE SALIDA DE GAS NO CONDENSADO

$$\dot{m}_{no\ condensada} = \dot{m}_{total\ de\ gas} - \dot{m}_{condensada}$$

Reemplazando:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{no\ condensada} &= 0,0000339 \text{ kg/s} - 33,9 * 10^{-6} \text{ kg/s} \\ &\Rightarrow \dot{m}_{no\ condensada} = 0 \end{aligned}$$

Para esta simulación teórica de la segunda tanda compuesta por Poliestireno y Polietilenteréftalato, no existirá gas no condensable.

3.4.8 Simulación teórica de la composición química del aceite pirolítico resultante de la primera tanda de Polietileno (PE) y Polipropileno.

El proceso de pirolisis de plásticos típicamente produce una mezcla compleja de hidrocarburos que puede incluir parafinas, olefinas, naftenos y compuestos aromáticos mencionados anteriormente. La composición química exacta puede variar generalmente, por lo cual se presenta una composición química típica de un aceite pirolítico obtenido a partir de Polietileno y Polipropileno.

Generalmente de la cantidad total del plástico procesado, entre un 75% y 85% se convierte en aceite pirolítico y entre 25% y 15% se convierte en residuo sólido o gas no condensable.

TABLA 12 PORCENTAJES DE COMPONENTES QUE POSEE EL ACEITE DE LA PRIMERA TANDA DE PE Y PP

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Alcanos (Parafinas)	30 – 50
Alquenos (Olefinas)	20 – 30
Aromáticos	10 – 15
Naftenos (ciclo alcanos)	5 – 15

Fuente: elaboración propia; 2024

Asumiendo que un 85% del peso total de PE y PP produce aceite pirolítico entonces:

ECUACIÓN 56 MASA TOTAL DEL ACEITE PIROLÍTICO OBTENIDO DEL PE Y PP

$$M_{aceite\ pirolitico} = M_{t-PE\ y\ PP} * \%$$

$$M_{aceite\ pirolitico} = 2.500\ kg * 0,85 \Rightarrow M_{aceite\ pirolitico} = 2.125\ kg$$

ECUACIÓN 57 MASA TOTAL DE LOS GASES Y RESIDUOS PIROLÍTICOS OBTENIDO DEL PE Y PP

$$M_{gases\ y\ residuos} = M_{t-PE\ y\ PP} * \%$$

$$M_{gases\ y\ residuos} = 2.500\ kg * 0,15 \Rightarrow M_{gases\ y\ residuos} = 375\ Kg$$

Entonces según la tabla nº 12 se hace un estimado donde:

$$\text{Parafinas (45\%)} = 2.125\ kg * 0.45 \Rightarrow 956,25\ kg$$

$$\text{olefinas (25\%)} = 2.125\ kg * 0.25 \Rightarrow 531,25\ kg$$

*Aromáticos (12.5%) = 2.125 kg * 0.125 => 265,625 kg*

*naftenos (7,5%) = 2.125 kg * 0.075 => 159,375 kg*

*otros compuestos menores (10%) = 2.125 kg * 0.10 => 212,5 kg*

**TABLA 13 MASA DE CADA COMPONENTE DEL ACEITE PIROLÍTICO
RESULTANTE DE PE Y PP**

COMPONENTE	MASA (kg)
Alcanos (Parafinas)	956,25
Alquenos (Olefinas)	531,25
Aromáticos	265,625
Naftenos (ciclo alcanos)	159,375
Otros	212,5

Fuente: Elaboración propia; 2024

3.4.9 Simulación teórica de la composición química del aceite pirolítico resultante de la segunda tanda de Poliestireno (PS) y Polietilentereftalato (PET).

Para realizar la simulación teórica de la composición química de estos polímeros se asume que el 85% de estos es aceite pirolítico y el restante 15% será gases y otros residuos. Es decir:

*Aceite pirolítico = 2.500 kg * 0.85 => 2.125 kg*

Gases y otros residuos => 375 kg

TABLA 14 PORCENTAJES DE COMPONENTES QUE POSEE EL ACEITE DE LA SEGUNDA TANDA DE PS Y PET

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Estireno	30
Tolueno	27,5
Etilbenceno	3,75
Benceno	23,75
Xileno	5
Ácido tereftalico y dietil tereftalato	15
Otros	15

Fuente: Elaboracion propia; 2024

Calculando los porcentajes individuales de cada componente:

$$\text{Estireno} (30\%) = 2.125 \text{ kg} * 0.30 \Rightarrow \mathbf{637,5 \text{ kg}}$$

$$\text{Tolueno} (27,5\%) = 2.125 \text{ kg} * 0.27,5 \Rightarrow \mathbf{584,375 \text{ kg}}$$

$$\text{Etilbenceno} (3.75\%) = 2.125 \text{ kg} * 0,0375 \Rightarrow \mathbf{79,69 \text{ kg}}$$

$$\text{Benceno} (23,75\%) = 2.125 \text{ kg} * 0.2375 \Rightarrow \mathbf{504,69 \text{ kg}}$$

$$\text{Xilenos} (5\%) = 2.125 \text{ kg} * 0.05 \Rightarrow \mathbf{106,25 \text{ kg}}$$

$$\text{Acido tereftalico y dietil} (15\%) = 2.125 \text{ kg} * 0.15 \Rightarrow \mathbf{318,75 \text{ kg}}$$

$$\text{otros compuestos oxigenados} (15\%) = 2.125 \text{ kg} * 0.15 \Rightarrow \mathbf{318,75 \text{ kg}}$$

**TABLA 15 MASA DE CADA COMPONENTE DEL ACEITE PIROLÍTICO
RESULTANTE DEL PS Y PET**

COMPONENTE	MASA (kg)
Estireno	637,5
Tolueno	584,375
Etilbenceno	79,69
Benceno	23,75
Xileno	106,25
Ácido tereftalico y dietil tereftalato	318,75
Otros	318,75

Fuente: Elaboracion propia; 2024

3.4.10 Cantidad de aceite pirolítico almacenado de la primera tanda en el tanque de almacenamiento Nº1.

La cantidad volumétrica almacenada en el tanque de aceite pirolítico se puede calcular de la siguiente manera:

Estimación de la composición típica de los componentes químicos que tiene el aceite pirolítico PE y PP. (PetroWiki, 2024)

Para hallar la cantidad volumétrica del aceite pirolítico obtenido se debe de hallar la densidad, por lo cual se hace un promedio de densidades típicas (Hsu, 2019) de sus componentes químicos.

TABLA 16 DENSIDADES PROMEDIO DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL PE Y PP

COMPONENTE	Densidad (kg/m^3)	PORCENTAJE (%)
Alcanos (Parafinas)	760	45
Alquenos (Olefinas)	735	25
Aromáticos	910	12,5
Naftenos (ciclo alcanos)	845	7,5
Otros	850	10

Fuente: Elaboracion Propia; 2024.

La densidad promedio de este aceite pirolítico será:

ECUACIÓN 58 CÁLCULO DE LA DENSIDAD PROMEDIO DEL ACEITE PIROLÍTICO DE LA PRIMERA TANDA DE PE Y PP

$$\rho_{oil-PE \ y \ PP} = (760 * 0,45) + (735 * 0,25) + (910 * 0,125) + (845 * 0,075) \\ + (850 * 0,10)$$

$$\rho_{oil-PE \ y \ PP} = 787,875 \text{ kg/m}^3$$

Se emplea la fórmula de volumen:

ECUACIÓN 59 VOLUMEN DEL ACEITE DESCARGADO EN LA PRIMERA TANDA

$$V = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}$$

$$V = \frac{2.125 \text{ kg}}{787,875 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V = 2.70 \text{ m}^3$$

3.4.11 Cantidad de aceite pirolítico almacenado de la segunda tanda en el tanque de almacenamiento Nº1.

La cantidad volumétrica almacenada en el tanque de aceite pirolítico se puede calcular de la siguiente manera:

Estimación de la composición típica de los componentes químicos que tiene el aceite pirolítico PS y PET.

Para hallar la cantidad volumétrica del aceite pirolítico obtenido se debe de hallar la densidad, por lo cual se hace un promedio de densidades típicas de sus componentes químicos. (Shanks, 2011)

TABLA 17 DENSIDADES PROMEDIO DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL PS

COMPONENTES (PS)	DENSIDAD (kg/m^3)	PORCENTAJE (%)
Estireno	760	60
Tolueno	870	15
Etilbenceno	867	7.5
Benceno	879	7.5
Xileno	870	10

Fuente: Elaboracion Propia; 2024.

La densidad promedio de este aceite pirolítico será:

ECUACIÓN 60 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL ACEITE PIROLITICO PROMEDIO DEL POLIESTIRENO

$$\rho_{oil-PE \ y \ PP} = (760 * 0,60) + (870 * 0,15) + (867 * 0,075) + (879 * 0,075) \\ + (870 * 0,10)$$

$$\rho_{oil-PS} = 804,45 \text{ kg/m}^3$$

TABLA 18 DENSIDADES PROMEDIO DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL PET

COMPONENTES (PET)	DENSIDAD (kg/m^3)	PORCENTAJE (%)
BTEX	870	40
Ácido tereftalico y dietil tereftalato	890	30
Otros	920	30

Fuente: Elaboracion Propia; 2024.

La densidad promedio de este aceite pirolítico será:

ECUACIÓN 61 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL ACEITE PIROLITICO PROMEDIO DEL POLIETILENTEREFTALATO

$$\rho_{oil-PET} = (870 * 0,40) + (890 * 0,30) + (920 * 0,30)$$

$$\rho_{oil-PET} = 891 \text{ kg/m}^3$$

Promediando la densidad de estos dos polímeros:

$$\rho_{oil-PET \text{ y PS}} = \frac{\rho_{oil-PET} + \rho_{oil-PS}}{2}$$

$$\rho_{oil-PET \text{ y PS}} = \frac{891 \text{ kg/m}^3 + 804,45 \text{ kg/m}^3}{2} \Rightarrow \rho_{oil-PET \text{ y PS}} = 847,725 \text{ kg/m}^3$$

Se emplea la fórmula de volumen:

ECUACIÓN 62 VOLUMEN DEL ACEITE DESCARGADO EN LA SEGUNDA TANDA

$$V = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}$$

$$V = \frac{2.125 \text{ kg}}{847,725 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow \boxed{V = 2.51 \text{ m}^3}$$

3.4.12 Cálculos de balance de materia en el destilador con el aceite pirolítico resultante.

Asumiendo los siguientes datos ya calculados anteriormente:

$$V_{oil-PE \ y \ PP} = 2,7 \text{ m}^3$$

$$V_{oil-PS \ y \ PET} = 2,51 \text{ m}^3$$

$$V_{oil-total} = 5,21 \text{ m}^3$$

Para determinar la composición exacta de los productos obtenidos del aceite pirolítico, normalmente se realizarían análisis detallados como:

- Destilación Fraccionada en Laboratorio: Para separar y medir las fracciones a diferentes puntos de ebullición.

Si no se dispone de esos datos, una manera de obtener una estimación inicial de las fracciones sería referirse a estudios previos o literatura científica sobre pirólisis de plásticos similares.

Teniendo la masa total de aceite pirolítico recaudado en el tanque N° 1, se calcula el volumen real de aceite total destilado:

TABLA 19 DENSIDAD PROMEDIO DEL ACEITE PIROLÍTICO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO N°1

MEZCLA DE POLÍMEROS	DENSIDAD PROMEDIO SEGÚN SUS COMPONENTES (kg/m^3)
1º TANDA (POLIETILENO Y POLIPROPILENO)	787,875
2º TANDA (POLIESTIRENO Y POLIETILENTEREFTALATO)	847,725

Fuente: Elaboracion Propia; 2024.

$$m_{total-oil} = 4.250 \text{ kg}$$

- **Volumen de polietileno y polipropileno:**

$$V_{PE \text{ y } PP} = \frac{2.125 \text{ kg}}{787.875 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V_{PE \text{ y } PP} = 2.7 \text{ m}^3$$

$$V_{PS \text{ y } PET} = \frac{2.125 \text{ kg}}{847.725 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V_{PE \text{ y } PP} = 2.5 \text{ m}^3$$

TABLA 20 VOLUMEN TOTAL DE ACEITE PIROLÍTICO QUE INGRESA AL TANQUE N°1

MEZCLA DE POLÍMEROS	VOLUMEN m^3
1º TANDA (POLIETILENO Y POLIPROPILENO)	2,7
2º TANDA (POLIESTIRENO Y POLIETILENTEREFTALATO)	2,5
TOTAL	5,2

Fuente: elaboración propia; 2024

3.4.13 Cantidades de combustibles estimados que se puede obtener de la primera tanda de aceite pirolítico resultante de PE y PP.

El aceite pirolítico resultante del PE y PP está compuesto por los siguientes hidrocarburos:

Asumiendo el volumen total de 2,7 m^3

TABLA 21 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS HIDROCARBUROS DEL ACEITE PIROLÍTICO RESULTANTE DE PE Y PP

COMPONENTE	Densidad (kg/m^3)	MASA (kg)	VOLUMEN (m^3)	PORCENTAJE (%)
Alcanos (Parafinas)	760	956,25	1,215	45
Alquenos (Olefinas)	735	531,25	0,675	25
Aromáticos	910	265,625	0,3375	12,5
Naftenos (ciclo alcanos)	845	159,375	0,2025	7,5
Otros (Cetonas, Alcoholes y Éteres)	850	212,5	0,27	10

Fuente: Elaboracion propia; 2024.

Para estimar las fracciones de gasolina, diésel, queroseno y GLP, usaremos valores típicos basados en la distribución de estos hidrocarburos en los productos de destilación:

Suposiciones típicas:

- **Gasolina:** Compuesta principalmente por hidrocarburos ligeros (C5-C12), aproximando un 70% de los alkanos, 70% de los alquenos y 50% de los aromáticos.

$$V_{gasolina} = (V_{alcanos} * 70\%) + (V_{alquenos} * 70\%) + (V_{aromaticos} * 50\%)$$

$$V_{gasolina} = (1,215 \text{ m}^3 * 0,70) + (0,675 \text{ m}^3 * 0,70) + (0,3375 \text{ m}^3 * 0,50)$$

$$\Rightarrow V_{gasolina} = 1,49 \text{ m}^3$$

- **Queroseno:** Compuesta por hidrocarburos intermedios (C10-C16), asumiendo un 20% de alkanos, 30% de aromáticos y 50% de naftenos que se destilan como queroseno.

$$V_{queroseno} = (V_{alcanos} * 20\%) + (V_{aromaticos} * 30\%) + (V_{nafteno} * 50\%)$$

$$V_{queroseno} = (1,215 \text{ m}^3 * 0,20) + (0,3375 \text{ m}^3 * 0,30) + (0,2025 \text{ m}^3 * 0,50)$$

$$\Rightarrow V_{queroseno} = 0,44 \text{ m}^3$$

- **Diésel:** Compuesta por hidrocarburos de cadena más larga (C9-C20), aproximando que el 10% de alkanos, 20% de aromáticos y 50% de naftenos.

$$V_{diesel} = (V_{alcanos} * 10\%) + (V_{aromaticos} * 20\%) + (V_{nafteno} * 50\%)$$

$$V_{diesel} = (1,215 \text{ m}^3 * 0,10) + (0,3375 \text{ m}^3 * 0,20) + (0,2025 \text{ m}^3 * 0,50)$$

$$\Rightarrow V_{diesel} = 0,29 \text{ m}^3$$

- **GLP:** Compuesto principalmente por hidrocarburos ligeros como propano y butano (C3-C4), aproximando el 10% de alkanos y 10% de alquenos.

$$V_{GLP} = (V_{alcanos} * 10\%) + (V_{alquenos} * 10\%)$$

$$V_{GLP} = (1,215 \text{ m}^3 * 0,10) + (0,675 \text{ m}^3 * 0,20)$$

$$\Rightarrow V_{GLP} = 0,19 \text{ m}^3$$

3.4.14 Cantidad de combustibles estimados que se puede obtener de la segunda tanda de aceite pirolítico resultante de PS y PET.

El aceite pirolítico resultante del PS y PET está compuesto por los siguientes hidrocarburos:

Asumiendo el volumen total de $2,51 \text{ m}^3$

TABLA 22 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS HIDROCARBUROS DEL ACEITE PIROLÍTICO RESULTANTE DE PE Y PP

COMPONENTES (PS)	DENSIDAD (kg/m^3)	MASA (kg)	PORCENTAJE (%)
Estireno	760	1275	60
Tolueno	870	318,75	15
Etilbenceno	867	159,375	7.5
Benceno	879	159,375	7.5
Xileno	870	212,5	10

Fuente: Elaboracion propia; 2024.

Para estimar las fracciones de gasolina, diésel, queroseno y GLP, usaremos valores típicos basados en la distribución de estos hidrocarburos en los productos de destilación:

Suposiciones típicas:

- **Gasolina:** Compuesta principalmente por el total de los componentes de estireno 50%, benceno y tolueno. La densidad promedio de la gasolina es de 720 kg/m^3

$$m_{\text{gasolina}} = (m_{\text{estireno}} * 50\%) + m_{\text{benceno}} + m_{\text{tolueno}}$$

$$m_{\text{gasolina}} = (1275 \text{ kg} * 0.50) + 159,375 \text{ kg} + 318.75 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow m_{\text{gasolina}} = 1.115,625 \text{ kg}$$

$$V_{\text{gasolina}} = \frac{1.115,625 \text{ kg}}{720 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V_{\text{gasolina}} = 1,55 \text{ m}^3$$

- **Queroseno:** Compuesta principalmente por xileno. La densidad promedio de la queroseno es de 800 kg/m^3

$$\Rightarrow m_{\text{queroseno}} = 212,5 \text{ kg}$$

$$V_{\text{queroseno}} = \frac{212,5 \text{ kg}}{800 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V_{\text{queorseno}} = 0,266 \text{ m}^3$$

- **Diésel:** Compuesta principalmente por Etilbenceno. La densidad promedio de la diésel es de 850 kg/m^3

$$\Rightarrow m_{\text{queroseno}} = 159,375 \text{ kg}$$

$$V_{\text{diesel}} = \frac{159,375 \text{ kg}}{850 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V_{\text{diesel}} = 0,19 \text{ m}^3$$

- **GLP:** En esta tanda existe gas licuado, pero debido a la composición química del aceite hay en muy bajas cantidades por lo cual se asume a 0.

3.4.15 Cantidades estimadas teóricamente de combustibles producidos por la planta de pirolisis no catalítica.

TABLA 23 VOLUMENES DE COMBUSTIBLES OBTENIDOS POR LA SIMULACIÓN TEÓRICA.

COMBUSTIBLE	1º TANDA (PE y PP)	2º TANDA (PS y PET)	TOTAL
GASOLINA	1,49 m ³	1,55 m ³	3,04 m ³
DIÉSEL	0,44 m ³	0,19 m ³	0,63 m ³
KEROSENE	0,29 m ³	0,27 m ³	0,56 m ³
GLP	0,19 m ³	0	0,19 m ³
VOLUMEN TOTAL DE COMBUSTIBLE			4,42 m³

3.4.16 Calculo del octanaje de la gasolina obtenida en la primera tanda de PE y PP.

El índice de octano es una medida de la resistencia de un combustible a la detonación en motores de combustión interna.

Por lo cual, para medir el octanaje de la gasolina, lo más óptimo es a través de pruebas de laboratorio o de un medidor de octanaje. Este proyecto es netamente teórico, por lo cual se hace el cálculo del octanaje de la siguiente forma:

Asumiendo según revisión bibliográfica el RON de los componentes de la gasolina pirolítica resultante de PE y PP. (Flowers, 2024)

**TABLA 24 MEDIDAS DE OCTANAJE DE LOS HIDROCARBUROS
COMPONENTES DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA PRIMERA TANDA.**

COMPONENTE	RON (OCTANAJE)
ALCANOS	90
ALQUENOS	95
AROMATICOS	110

Fuente: Elaboracion Propia; 2024

$$m_{gasolina} = 1.174,56 \text{ kg}$$

Fraccionando los componentes:

- **Alcanos**

$$F_{alcanos} = \frac{m_{alcanos}}{m_{gasolina}} \Rightarrow F_{alcanos} = \frac{669,375 \text{ kg}}{1.174,56 \text{ kg}}$$

$$F_{alcanos} = 0,57$$

- **Alquenos.**

$$F_{alquenos} = \frac{m_{alquenos}}{m_{gasolina}} \Rightarrow F_{alquenos} = \frac{371,875 \text{ kg}}{1.174,56 \text{ kg}}$$

$$F_{alquenos} = 0,317$$

- **Aromáticos.**

$$F_{aromaticos} = \frac{m_{aromaticos}}{m_{gasolina}} \Rightarrow F_{aromaticos} = \frac{133,3125 \text{ kg}}{1.174,56 \text{ kg}}$$

$$F_{aromaticos} = 0,114$$

Calculando el RON ponderado:

ECUACIÓN 63 CÁLCULO DEL RON DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA PRIMERA TANDA

$$RON = (F_{alcanos} * RON_{alcanos}) + (F_{alqueno} * RON_{alqueno}) + (F_{aromatico} * RON_{aromatico})$$

$$RON = (0,57 * 90) + (0,317 * 90) + (0,114 * 110)$$

$$\boxed{RON = 93.955 \Rightarrow 94}$$

3.4.17 Calculo del octanaje de la gasolina obtenida en la segunda tanda de PE y PP.

Primero asumimos según revisión bibliográfica el RON de los componentes de la gasolina pirolítica resultante del PS y PET (EnggCiclopedia, 2024), es decir:

TABLA 25 MEDIDAS DE OCTANAJE DE LOS HIDROCARBUROS COMPONENTES DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA SEGUNDA TANDA.

COMPONENTE	RON (OCTANAJE)
ESTIRENO	107
TOLUENO	120.1
BENCENO	114.8

Fuente: Elaboracion Propia; 2024

$$m_{gasolina} = 1.115,625 \text{ kg}$$

Fraccionando los componentes:

- **Estireno**

$$F_{estireno} = \frac{m_{estireno}}{m_{gasolina}} \Rightarrow F_{estireno} = \frac{637,5 \text{ kg}}{1.115,625 \text{ kg}}$$

$$F_{estreno} = 0,571$$

- **Benceno.**

$$F_{benceno} = \frac{m_{benceno}}{m_{gasolina}} \Rightarrow F_{benceno} = \frac{159,375 \text{ kg}}{1.115,625 \text{ kg}}$$

$$F_{benceno} = 0,143$$

- **Tolueno.**

$$F_{tolueno} = \frac{m_{tolueno}}{m_{gasolina}} \Rightarrow F_{tolueno} = \frac{318,75 \text{ kg}}{1.115,625 \text{ kg}}$$

$$F_{tolueno} = 0,286$$

Calculando el RON ponderado:

ECUACIÓN 64 CÁLCULO DEL RON DE LA GASOLINA RESULTANTE DE LA SEGUNDA TANDA.

$$RON = (F_{estreno} * RON_{estreno}) + (F_{benceno} * RON_{benceno}) + (F_{tolueno} * RON_{tolueno})$$

$$RON = (0,571 * 107) + (0,143 * 114) + (0,286 * 120,1)$$

$$\boxed{RON = 111,8}$$

La gasolina resultante de la segunda tanda de PE y PP posee un octanaje de 111,8. Por lo cual tiende a ser un combustible eficiente ya que la gasolina convencional suele poseer entre 87 – 96 octanos.

3.5 ASPECTOS AMBIENTALES.

La planta de pirolisis no catalítica de polímeros con un circuito cerrado y reutilización de gases sobrantes para generar calor tiene diversos impactos ambientales, tanto positivos como negativos.

3.5.1 Impactos Ambientales Positivos.**3.5.1.1 Reducción de residuos plásticos.**

La pirólisis convierte residuos plásticos en productos útiles como combustibles líquidos, gases y carbón sólido, disminuyendo la cantidad de plásticos en vertederos, calles de la ciudad, lagunas o ríos. Ya que al descomponer 5 toneladas de plástico desecharo se evita una cantidad significativa de residuos termine en el ambiente.

ILUSTRACIÓN 45 PLÁSTICO A COMBUSTIBLE

Fuente: Somos Industria; 2024.

3.5.1.2 Reutilización de gases.

Los gases generados durante la pirólisis se reutilizan para calentar el reactor, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la dependencia de combustibles externos. Esto reduce la huella de carbono al minimizar el requerimiento de fuentes adicionales de energía fósil.

3.5.1.3 Proceso con un circuito cerrado.

Un circuito cerrado minimiza la liberación de contaminantes al aire, ya que los gases son recirculados y reutilizados. Las emisiones de CO₂ y otros contaminantes se reducen y mantienen bajo control.

3.5.1.4 Disminución de la Dependencia de Combustibles Fósiles.

Al convertir residuos plásticos en combustibles líquidos reutilizables, se reduce la demanda de combustibles fósiles tradicionales. La producción de diésel y gasolina a partir de plásticos reciclados puede complementar los volúmenes diarios de oferta diaria de combustibles en el municipio.

3.5.1.5 Fomento de la Economía Circular

La pirólisis promueve la economía circular al reciclar plásticos que de otro modo serían desechados, transformándolos en productos valiosos. La conversión de residuos plásticos en nuevos materiales y energía contribuye a un uso más eficiente y sostenible de los recursos.

3.5.2 Impactos Ambientales Negativos.

3.5.2.1 Emisiones de gases residuales.

A pesar de la reutilización, pueden liberarse compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otros contaminantes si no se gestionan adecuadamente. La solución viable a este impacto es el de implementar sistemas de filtración y tratamiento de gases para capturar contaminantes. Pero generalmente al ser un sistema cerrado las emisiones de compuestos orgánicos volátiles son muy bajas.

3.5.2.2 Gestión de Subproductos Sólidos y Líquidos.

La pirólisis genera cenizas y residuos carbonosos que deben ser manejados para evitar la contaminación del suelo y aguas subterráneas. Por lo cual se prevé una disposición segura de residuos de este tipo.

El carbono residual que queda después del proceso de pirólisis puede tener varios usos valiosos. Este subproducto, a menudo denominado "biochar" o "carbón de pirólisis"

ILUSTRACIÓN 46 CARBÓN RESIDUAL DE PIROLISIS.



Fuente: LivingChar; 2024

Tiene múltiples aplicaciones dependiendo de sus características específicas. Aquí hay algunas de las principales formas en que se puede emplear el carbono residual:

- **Adsorbente para Tratamiento de Aguas.**

Utilizar el carbón activado para adsorber contaminantes y purificar el agua debido a su alta capacidad de adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos y por lo generalmente se usa en filtros para tratamiento de aguas residuales y potables.

3.5.2.3 Impacto en la Calidad del Aire Local

Existe una baja posibilidad que las emisiones de la planta pueden afectar la calidad del aire en el área, pero como se menciona anteriormente al tener un circuito cerrado las emisiones son muy bajas, lo cual no causaría problemas de salud en el área de implementación.

Las soluciones a emplear si ese fuera el caso son monitoreo continuo de la calidad del aire y adopción de medidas correctivas según sea necesario.

3.5.2.4 Riesgo de Incidentes.

La manipulación de materiales a altas temperaturas puede causar incendios, explosiones y derrames, lo cual se prevé tener protocolos de seguridad estrictos y monitoreo constante

CAPÍTULO 4

VIABILIDAD Y COSTOS.

Para realizar las estimaciones económicas del proyecto de pirólisis, se debe de considerar varios factores, incluyendo los costos de inversión inicial, costos operativos, ingresos por la venta de productos, y análisis de rentabilidad.

4.1 COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL.

4.1.1 Equipos y maquinaria.

4.1.1.1 Reactor de pirólisis

Para saber los costos de la construcción del reactor de pirolisis se debe de tomar en cuenta que el tipo de acero es el 403 inoxidable y también los cálculos anteriores de su diseño, es decir:

$$H = 3,44 \text{ m}$$

$$D_{ext} = 1,72 \text{ m}$$

$$D_{int} = 1,69 \text{ m}$$

$$\text{espesor} = 0,015 \text{ m}$$

$$\text{densidad acero inoxidable} = 8.000 \text{ kg/m}^3$$

Calculando el volumen superficial externo del reactor:

ECUACIÓN 65 CÁLCULO DEL VOLUMEN EXTERNO DEL REACTOR.

$$V_{ext} = \pi * \left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^2 * H$$

$$V_{ext} = \pi * \left(\frac{1,72 \text{ m}}{2} \right)^2 * 3,44 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad V_{ext} = 7,945 \text{ m}^3$$

Calculando el volumen interno del reactor:

$$V_{int} = \pi * \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 * H$$

$$V_{int} = \pi * \left(\frac{1,69 \text{ m}}{2} \right)^2 * 3,44 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad V_{int} = 7,643 \text{ m}^3$$

El volumen total de acero será:

ECUACIÓN 66 VOLUMEN TOTAL DE ACERO EN EL REACTOR PIROLÍTICO.

$$V_{acero} = V_{ext} - V_{int}$$

$$V_{acero} = 7,945 \text{ m}^3 - 7,643 \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad V_{acero} = 0,302 \text{ m}^3$$

Por lo cual la masa total de acero necesario será de:

ECUACIÓN 67 MASA TOTAL DE ACERO INOXIDABLE 304 DEL REACTOR PIROLÍTICO.

$$m_{acero} = V_{acero} * \rho_{acero}$$

$$m_{acero} = 0,302 \text{ m}^3 * 8.000 \text{ kg/m}^3 \quad \Rightarrow \quad m_{acero} = 2416 \text{ kg}$$

- **Costo del acero inoxidable 304 por kg. es de 5 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acero} = 2416 \text{ kg} * 5 \text{ USD/kg} \quad \Rightarrow \quad C_{acero} = 12.080 \text{ USD}$$

Otros costos estimados para la construcción del reactor son:

- Fabricación y soldadura 5.000 USD
- Equipos auxiliares y sistemas de control 5000 USD
- Instalación y puesta en marcha 5000 USD

El reactor de pirolisis tiene un costo de:

$$C_{reactor} = 12.080 \text{ USD} + 5.000 \text{ USD} + 5.000 \text{ USD} + 5.000$$

 $C_{reactor} = 27.080 \text{ USD}$

4.1.1.2 Torre de destilación.

Debido a la similitud en forma geométrica con el reactor, los costos de la torre de destilación se pueden calcular de la siguiente forma:

$$\text{Altura} = 5 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro} = 1 \text{ m}$$

$$\text{Número de Platos} = 6$$

$$\text{Temperatura Máxima} = 400^{\circ}\text{C}$$

ECUACIÓN 68 CÁLCULO DEL ÁREA DE LA TORRE DE DESTILACIÓN SIN SUS TAPAS.

$$A_{cilindro} = \pi * \text{diametro} * H$$

$$A_{cilindro} = \pi * 1 \text{ m} * 5 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad A_{cilindro} = 15,71 \text{ m}^2$$

ECUACIÓN 69 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DE LA TORRE DE DESTILACIÓN.

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{1}{2}\right)^2 \quad \Rightarrow \quad A_{tapas} = 1,57 \text{ m}^2$$

Entonces el área superficial total de la torre será de:

$$A_{TORRE} = A_{cilindro} + A_{tapas}$$

$$A_{TORRE} = 15,71 \text{ m}^2 + 1,57 \text{ m}^2 \quad \Rightarrow \quad A_{TORRE} = 17,28 \text{ m}^2$$

El volumen del material se calculará de la siguiente forma:

$$V_{acer} = A_{TORRE} * \text{espesor}$$

$$V_{acero} = 17,28 \text{ m}^2 * 0,01 \text{ m} \Rightarrow V_{acero} = 0,1728 \text{ m}^3$$

Por lo cual el peso del material será de:

$$m_{acero} = V_{acero} * \rho_{acero}$$

$$m_{acero} = 0,1728 \text{ m}^3 * 8.000 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow m_{acero} = 1.382,4 \text{ kg}$$

- **Costo del acero inoxidable 304 por kg. es de 5 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acero} = 1.382,4 \text{ kg} * 5 \text{ USD/kg} \Rightarrow C_{acero} = 6.912 \text{ USD}$$

Otros costos estimados para la construcción de la torre de destilación son:

- Fabricación y soldadura 5.000 USD
- Platos de destilación (6 platos) 3.000 USD
- Equipos auxiliares y sistemas de control 5000 USD
- Instalación y puesta en marcha 5000 USD

La torre de destilación tiene un costo aproximado de:

$$C_{TORRE} = 6.912 \text{ USD} + 5.000 \text{ USD} + 3.000 \text{ USD} + 5.000 \text{ USD} + 5.000$$

$$\boxed{C_{TORRE} = 24.912 \text{ USD}}$$

4.1.1.3 Intercambiador de calor.

Los costos de un intercambiador de calor según revisión bibliográfica (Gavin Towler, 2022) pueden variar según las especificaciones necesarias, lo cual el montaje del intercambiador de calor mediano con características casi similares al de la planta de pirolisis no catalítica tiene un precio entre 15.000 a 25.000 USD, donde para los aspectos económicos se tomara un precio de :

$$C_{int.de calor} = 17.000 \text{ USD}$$

4.1.1.4 Tanque de almacenamiento de aceite pirolítico.

Altura = 1,91 m

Diámetro = 2 m

diametro interno = 1,98

ECUACIÓN 70 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO N° 1, SIN TAPAS.

$$A_{tanque} = \pi * diametro * H$$

$$A_{tanque} = \pi * 2 \text{ m} * 1,91 \text{ m} \Rightarrow A_{tanque} = 12 \text{ m}^2$$

ECUACIÓN 71 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO N°1.

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{2}{2}\right)^2 \Rightarrow A_{tapas} = 6,28 \text{ m}^2$$

Entonces el área superficial total de la torre será de:

$$A_{tanque} = A_{tanque} + A_{tapas}$$

$$A_{tanque} = 12 \text{ m}^2 + 6,28 \text{ m}^2 \Rightarrow A_{tanque} = 18,28 \text{ m}^2$$

El volumen del material se calculará de la siguiente forma:

$$V_{acer} = A_{tanque} * espesor$$

$$V_{acer} = 18,28 \text{ m}^2 * 0,01m \Rightarrow V_{acer} = 0,1828 \text{ m}^3$$

Por lo cual el peso del material será de (densidad del acero al carbono = 7.850 kg/m^3) :

$$m_{acero} = V_{acero} * \rho_{acero}$$

$$m_{acero} = 0,1828 \text{ m}^3 * 7.850 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow m_{acero} = 1.434 \text{ kg}$$

- **Costo del acero al carbono por kg. es de 1,2 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acero} = 1.434 \text{ kg} * 1,2 \text{ USD/kg} \Rightarrow C_{acero} = 1720,8 \text{ USD}$$

Otros costos estimados para la construcción del tanque son:

- Fabricación y soldadura 3.000 USD
- Equipos auxiliares y sistemas de control 2.000 USD
- Instalación y puesta en marcha 2.000 USD

El tanque de almacenamiento de aceite pirolítico tiene un costo aproximado de:

$$C_{tanque} = 1.720,8 \text{ USD} + 3.000 \text{ USD} + 2.000 \text{ USD} + 2.000$$

$$C_{tanque} = 8.720,8 \text{ USD}$$

4.1.1.5 Tanque de almacenamiento de gasolina.

Altura = 1,70 m

Diámetro externo = 1,50 m

diametro interno = 1,48.

ECUACIÓN 72 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASOLINA.

$$A_{tanque} = \pi * diametro * H$$

$$A_{tanque} = \pi * 1,50\ m * 1,70\ m \quad \Rightarrow \quad A_{tanque} = 8,02\ m^2$$

ECUACIÓN 73 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE GASOLINA..

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{1,50\ m}{2}\right)^2 \quad \Rightarrow \quad A_{tapas} = 3,53\ m^2$$

Entonces el área superficial total del tanque será de:

$$A_{tanque} = A_{tanque} + A_{tapas}$$

$$A_{tanque} = 8,02\ m^2 + 3,53\ m^2 \quad \Rightarrow \quad A_{tanque} = 11,55\ m^2$$

El volumen del material se calculará de la siguiente forma:

$$V_{acero} = A_{tanque} * espesor$$

$$V_{acero} = 11,55\ m^2 * 0,01m \Rightarrow V_{acero} = 0,1155\ m^3$$

Por lo cual el peso del material será de (densidad del acero al carbono = $7.850\ kg/m^3$) :

$$m_{acero} = V_{acero} * \rho_{acero}$$

$$m_{acero} = 0,1155\ m^3 * 7.850\ kg/m^3 \quad \Rightarrow \quad m_{acero} = 906,075\ kg$$

- **Costo del acero al carbono por kg. es de 1,2 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acer} = 906,075 \text{ kg} * 1,2 \text{ USD/kg} \Rightarrow C_{acer} = 1.087,29 \text{ USD}$$

Otros costos estimados para la construcción del tanque son:

- Fabricación y soldadura 2.000 USD
- Equipos auxiliares y sistemas de control 1.500 USD
- Instalación y puesta en marcha 1.500 USD

El tanque de almacenamiento de gasolina tiene un costo aproximado de:

$$C_{tanque} = 1.087,29 \text{ USD} + 2.000 \text{ USD} + 1.500 \text{ USD} + 1.500$$

$$C_{tanque-gasolina} = 6.087,29 \text{ USD}$$

4.1.1.6 Tanque de almacenamiento de diésel.

Altura = 1,59 m

Diámetro externo = 1,20 m

diametro interno = 1,18.

ECUACIÓN 74 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL.

$$A_{tanque} = \pi * diametro * H$$

$$A_{tanque} = \pi * 1,20 \text{ m} * 1,59 \text{ m} \Rightarrow A_{tanque} = 6 \text{ m}^2$$

ECUACIÓN 75 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE DIÉSEL.

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{1,20\ m}{2}\right)^2 \Rightarrow A_{tapas} = 2,26\ m^2$$

Entonces el área superficial total del tanque será de:

$$A_{tanque} = A_{tanque} + A_{tapas}$$

$$A_{tanque} = 6\ m^2 + 2,26\ m^2 \Rightarrow A_{tanque} = 8,26\ m^2$$

El volumen del material se calculará de la siguiente forma:

$$V_{acer} = A_{tanque} * \text{espesor}$$

$$V_{acer} = 8,26\ m^2 * 0,01m \Rightarrow V_{acer} = 0,0826\ m^3$$

Por lo cual el peso del material será de (densidad del acero al carbono = $7.850\ kg/m^3$):

$$m_{acer} = V_{acer} * \rho_{acer}$$

$$m_{acer} = 0,0826\ m^3 * 7.850\ kg/m^3 \Rightarrow m_{acer} = 648,41\ kg$$

- **Costo del acero al carbono por kg. es de 1,2 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acer} = 648,41\ kg * 1,2\ USD/kg \Rightarrow C_{acer} = 778,09\ USD$$

Otros costos estimados para la construcción del tanque son:

- Fabricación y soldadura 2.000 USD
- Equipos auxiliares y sistemas de control 1.500 USD
- Instalación y puesta en marcha 1.500 USD

El tanque de almacenamiento de diésel tiene un costo aproximado de:

$$C_{tanque} = 778,09 \text{ USD} + 2.000 \text{ USD} + 1.500 \text{ USD} + 1.500$$

$$C_{tanque-gasolina} = 5.778,09 \text{ USD}$$

4.1.1.7 Tanque de almacenamiento del kerosene.

$$\text{Altura} = 1,07 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo} = 1 \text{ m}$$

$$\text{diametro interno} = 0,98.$$

ECUACIÓN 76 CÁLCULO DEL ÁREA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE KEROSENE.

$$A_{tanque} = \pi * \text{diametro} * H$$

$$A_{tanque} = \pi * 1 \text{ m} * 1,07 \text{ m} \Rightarrow A_{tanque} = 3,36 \text{ m}^2$$

ECUACIÓN 77 CALCULO DEL ÁREA DE LAS TAPAS DEL TANQUE DE KEROSENE.

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_{tapas} = 2 * \pi * \left(\frac{1m}{2}\right)^2 \Rightarrow A_{tapas} = 1,57 \text{ m}^2$$

Entonces el área superficial total del tanque será de:

$$A_{tanque} = A_{tanque} + A_{tapas}$$

$$A_{tanque} = 3,36 \text{ } m^2 + 1,57 \text{ } m^2 \quad \Rightarrow \quad A_{tanque} = 4,93 \text{ } m^2$$

El volumen del material se calculará de la siguiente forma:

$$V_{acero} = A_{tanque} * \text{espesor}$$

$$V_{acero} = 4,93 \text{ } m^2 * 0,01m \quad \Rightarrow \quad V_{acero} = 0,0493 \text{ } m^3$$

Por lo cual el peso del material será de (densidad del acero al carbono = 7.850 kg/m^3):

$$m_{acero} = V_{acero} * \rho_{acero}$$

$$m_{acero} = 0,0493 \text{ } m^3 * 7.850 \text{ kg/m}^3 \quad \Rightarrow \quad m_{acero} = 387,905 \text{ kg}$$

- **Costo del acero al carbono por kg. es de 1,2 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acero} = 387,905 \text{ kg} * 1,2 \text{ USD/kg} \quad \Rightarrow \quad C_{acero} = 465,49 \text{ USD}$$

Otros costos estimados para la construcción del tanque son:

- Fabricación y soldadura 2.000 USD
- Equipos auxiliares y sistemas de control 1.500 USD
- Instalación y puesta en marcha 1.500 USD

El tanque de almacenamiento de kerosene tiene un costo aproximado de:

$$C_{tanque} = 465,49 \text{ USD} + 1.500 \text{ USD} + 1.000 \text{ USD} + 1.000$$

$$C_{tanque-gasolina} = \mathbf{3.965,49 \text{ USD}}$$

4.1.1.8 Costo de tuberías de la planta.

Para calcular el costo estimado de las tuberías de acero inoxidable en la planta de pirólisis, primero calcularemos el volumen de material necesario, luego el peso, y finalmente el costo total basado en referencias bibliográficas (Thompson, 2007)

$$\text{densidad del acero} = 7.850 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{espesor de la tubería} = 0,002 \text{ m}$$

$$\text{diametro externo} = 0,054 \text{ m}$$

$$\text{diametro interno} = 0,050 \text{ m}$$

$$\text{longitud total} = 35 \text{ m}$$

- **Calculo del volumen del material.**

$$A_{externa} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_{externa} = 2 * \pi * \left(\frac{0,054 \text{ m}}{2}\right)^2 \Rightarrow A_{externa} = \mathbf{0.000229 \text{ m}^2}$$

$$A_{interna} = 2 * \pi * \left(\frac{0,050 \text{ m}}{2}\right)^2 \Rightarrow A_{interna} = \mathbf{0.000196 \text{ m}^2}$$

$$A_{total} = A_{externa} - A_{interna}$$

$$A_{total} = 0,000229 \text{ m}^2 - 0,000196 \text{ m}^2 \Rightarrow A_{total} = \mathbf{0,00033 \text{ m}^2}$$

El volumen del material se calculará de la siguiente forma:

$$V_{material} = A_{total} * longitud$$

$$V_{material} = 0,00033 \text{ m}^2 * 35 \text{ m} \Rightarrow V_{material} = \mathbf{0,01155 \text{ m}^3}$$

Por lo cual el peso del material será de (densidad del acero al carbono = 7.850 kg/m^3) :

$$m_{acero} = V_{acero} * \rho_{acero}$$

$$m_{tuberia} = 0,01155 \text{ m}^3 * 7.850 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow m_{acero} = 90,68 \text{ kg}$$

- Costo del acero inoxidable al carbono por kg. es de 5 USD/kg.**

Por lo cual el costo total del material de acero será de:

$$C_{acero} = 90,68 \text{ kg} * 5 \text{ USD/kg} \Rightarrow C_{acero} = 453,4 \text{ USD}$$

Otros costos estimados para el tendido de las tuberías son:

- Instalación, accesorios y soldadura 1.000 USD

La instalación de tuberías tiene un costo aproximado de:

$$C_{tuberias} = 453,4 \text{ USD} + 1.000$$

$$C_{tuberias} = 1.453,4 \text{ USD}$$

4.1.1.9 Empresas constructoras de equipos de la planta de pirolisis no catalítica.

TABLA 26 EMPRESAS CONSTRUCTORAS DE EQUIPOS INDUSTRIALES.

EQUIPO	EMPRESAS	
Reactor	Tecna Bolivia: Grupo especializado en tecnología, ingeniería, construcción, puesta en	
Tanques de almacenamiento		
Torre de destilación		



	<p>marcha, operación y mantenimiento de proyectos en el sector Oil & Gas. Ofrecen plantas llave en mano y plantas modulares.</p> <p>Tritec Bolivia: provisión de equipos y servicios industriales con más de 30 años de experiencia en el rubro tecnológico e industrial a nivel nacional.</p> <p>Carlos Caballero SRL: empresa líder en la fabricación de equipos metálicos, estructuras y proyectos de ingeniería en Bolivia. Tienen experiencia en el sector energético, petrolero, minero e industrial.</p>	
Intercambiador de calor	<p>Carlos Caballero SRL: Proyectos de ingeniería, fabricación de equipos metálicos e intercambiadores de calor.</p>	

Fuente: Elaboracion propia en base a la investigación; 2024.

4.1.2 Instalaciones.

El lugar donde se pretende diseñar esta planta es en un centro de acopio de la comunidad de “Eco-Recolectoras” el cual debido a su gran extensión del lugar es adecuada para su construcción, solo se debe de adecuar los sistemas eléctricos, plomería e infraestructura de seguridad que tendría un costo aproximado de:

$$C_{instalaciones} = 10.000 \text{ USD}$$

4.1.3 Gastos pre - operación.

Los gastos pre-operación son más para la ingeniería y diseño de la planta; y los estudios de factibilidad donde dándoles un costo estimado:

$$C_{pre-operacion} = 20.000 \text{ USD}$$

4.1.3.1 Permisos y licencias ambientales.

En Bolivia Las tarifas y requisitos pueden variar considerablemente según el departamento y el municipio específico. Se tiene un estimado promedio según revisión bibliográfica acerca de los permisos y licencias que debería de poseer la planta de pirolisis no catalítica que son:

- Permiso de Construcción.**

Permiso necesario para la construcción de la planta, incluye la revisión de planos y cumplimiento de normas de construcción municipales.

$$C_{permiso-construcion} = 2.500 \text{ USD}$$

- Licencia ambiental.**

Evaluación de impacto ambiental y permisos relacionados con las emisiones y la gestión de residuos. Puede incluir la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

$$C_{Licencia\ ambiental} = \mathbf{3.000\ USD}$$

- **Permiso de operación.**

Licencia para la operación de la planta, que incluye revisiones de seguridad y cumplimiento de regulaciones operativas.

$$C_{permiso\ de\ operacion} = \mathbf{1.000\ USD}$$

- **Permiso de uso de suelo.**

Autorización para el uso del terreno en la construcción y operación de una planta industrial.

$$C_{permiso\ de\ suelo} = \mathbf{500\ USD}$$

- **Permisos de salud y seguridad.**

Permisos relacionados con la seguridad laboral y la salud pública, otorgados por el Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social.

$$C_{permiso\ de\ salud\ y\ seguridad} = \mathbf{1.000\ USD}$$

- **Permisos de Almacenamiento y Manejo de Materiales Peligrosos.**

Autorizaciones para el almacenamiento y manejo seguro de productos químicos y materiales peligrosos utilizados o producidos en la planta.

$$C_{permiso\ de\ almacenamiento} = \mathbf{1.000\ USD}$$

- **Permisos de Agua y Saneamiento**

Permisos para el uso de agua y la disposición de aguas residuales, otorgados por la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS).

$$C_{permiso\ de\ agua\ y\ saneamiento} = \mathbf{1.000\ USD}$$

Por lo cual un total estimado entre todos los permisos y licencias se tiene un total de:

$$C_{total\ de\ permisos\ y\ licencias} = \mathbf{10.000\ USD}$$

4.1.3.2 Capacitación de personal.

Las capacitaciones constaran de varios puntos como:

- Cursos de Seguridad y Manejo de Materiales Peligrosos
- Capacitación Técnica en Operación de Equipos
- Entrenamiento en Mantenimiento de Equipos
- Capacitación en Primeros Auxilios y Respuesta a Emergencias
- Capacitación en Procedimientos Operativos y Control de Calidad

Por lo tanto, el costo total estimado para la capacitación del personal de una planta de pirólisis tendría un costo de:

$$C_{capacitacion\ de\ personal} = \mathbf{5.000\ USD}$$

4.2 COSTOS DE OPERACIÓN.

4.2.1 Materia prima.

El costo de la materia prima (polímeros) en general su precio es de 1,50 Bs el kilogramo, por lo cual, asumiendo las 5 toneladas proyectadas anteriormente, el costo de la materia prima por día es:

$$C_{materia\ prima} = 7.500 \text{ Bs/dia}$$

4.2.2 Energía y utilidades.

Los costos de energía y utilidades se pueden calcular a través de las tarifas por KW de electricidad y metro cubico de agua. En Cochabamba el rango en electricidad es el siguiente:

- De 21 a 120 kWh: 0,73 Bs/kWh
- De 121 a 300 kWh: 0,98 Bs/kWh
- De 300 a 500 kWh: 0.986 Bs/kWh
- De 500 a 1.000 kWh: 1,002 Bs/kWh
- Más de 1.000 kWh: 1,043 Bs/kWh

Y en cuanto al consumo de agua es el siguiente:

- Uso doméstico: 1,5 - 2.0 Bs/m³
- Uso industrial: 5 - 7 Bs/m³

Los combustibles auxiliares:

- Gas Natural: 1,7 - 2.0 Bs/m³
- Diésel: 3,72 Bs/litro

Por lo cual haciendo una estimación de uso de la planta:

- Electricidad: 1500 kWh/mes
- Agua: 200 m³/mes (industrial)
- Diésel: 100 litros/mes

$$C_{electricidad} = 1500 \frac{kWh}{mes} * 1,043 \frac{Bs}{kWh} \Rightarrow C_{electricidad} = 1564,5 \text{ Bs}$$

$$C_{agua} = 200 \text{ m}^3 * 6 \frac{\text{Bs}}{\text{m}^3} \Rightarrow C_{electricidad} = 1200 \text{ Bs}$$

$$C_{diesel} = 100 \text{ L} * 3,72 \frac{\text{Bs}}{\text{L}} \Rightarrow C_{electricidad} = 372 \text{ Bs}$$

$$C_{ENERGIA Y UTILIDADES} = 3136,5 \text{ Bs/mes}$$

4.2.3 Mano de obra.

Asumiendo que la planta posee en el personal operativo a 7 personas, 2 técnicos de mantenimiento, 1 gerente y 2 personas administrativas. Por lo tanto, el costo total estimado para salarios y beneficios del personal operativo y administrativo en una planta de pirólisis en Cochabamba estaría en el rango de

$$C_{personal operativo} = 7 * 2.500 \text{ Bs} * 130\% \Rightarrow C_{personal operativo} = 22.750 \text{ Bs}$$

$$C_{tecnicos} = 2 * 5.000 \text{ Bs} * 130\% \Rightarrow C_{tecnicos} = 13.000 \text{ Bs}$$

$$C_{gerente} = 1 * 7.000 \text{ Bs} * 130\% \Rightarrow C_{gerente} = 9.100 \text{ Bs}$$

$$C_{administrativo} = 2 * 4.000 \text{ Bs} * 130\% \Rightarrow C_{administrativo} = 10.400 \text{ Bs}$$

$$C_{mano de obra} = 55.250 \text{ Bs}$$

4.2.4 Mantenimiento y reparaciones.

Los costos de mantenimiento y reparaciones pueden variar ampliamente dependiendo de varios factores, como el tamaño de la planta, la complejidad de los equipos y la frecuencia del mantenimiento requerido.

4.2.4.1 Mantenimiento Regular y Preventivo

El mantenimiento regular incluye actividades programadas para mantener el equipo en buen estado y prevenir fallos. Generalmente, se estima que el costo de mantenimiento regular es del 2% al 4% del costo total de capital por año. Asumiendo un capital de 100.000 USD al año.

$$C_{mantenimientos-preventivo} = 100.000 \text{ USD} * 0.03$$

$$C_{mantenimientos-preventivo} = 3.000 \text{ USD/año} \Rightarrow 20.700 \text{ Bs/año}$$

4.2.4.2 Reparaciones correctivas.

Las reparaciones correctivas se realizan cuando ocurre un fallo no previsto. Estos costos pueden ser del 1% al 3% del costo total de capital por año.

$$C_{mantenimientos-correctivos} = 100.000 \text{ USD} * 0.02$$

$$C_{mantenimientos-correctivo} = 2.000 \text{ USD/año} \Rightarrow 13.800 \text{ Bs/año}$$

El total de los costos de mantenimientos preventivos y correctivos será de:

$$C_{mantenimientos y reparaciones} = 34.500 \text{ Bs/año}$$

4.3 INGRESOS ECONÓMICOS.

4.3.1 Venta de productos.

Asumiendo que solo se comercializa los combustibles líquidos y el gas es reinyectado al sistema de pirolisis para generar más calor. Se tiene un estimado de costos generales por litro de la gasolina, diésel y kerosene.

TABLA 27 COSTOS Y VOLUMEN DE LOS COMBUSTIBLES PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.

COMBUSTIBLE	PRECIO (Bs/L)	VOLUMEN PRODUCIDO POR LA PLANTA (L)
-------------	-------------------	-------------------------------------

GASOLINA (ALTO OCTANAJE)	4,50	3.040
DIÉSEL	3.72	480
KEROSENE	3.50	706

Fuente: Elaboracion Propia; 2024.

Entonces los ingresos por los combustibles serán:

$$I_{gasolina} = 3.040 \text{ L} * 4,50 \text{ Bs/L} \Rightarrow I_{gasolina} = \mathbf{13.680 \text{ Bs}}$$

$$I_{kerosene} = 706 \text{ L} * 3,50 \text{ Bs/L} \Rightarrow I_{kerosene} = \mathbf{2.471 \text{ Bs}}$$

$$I_{diesel} = 480 \text{ L} * 3,72 \text{ Bs/L} \Rightarrow I_{diesel} = \mathbf{1.785 \text{ Bs}}$$

$$I_{TOTAL} = \mathbf{17.936,6 \text{ Bs/dia}} \Rightarrow \mathbf{538.098 \text{ Bs/mes}}$$

4.3.2 Venta de subproductos y residuos.

4.3.2.1 Carbón (Biochar)

Asumiendo que de las 5 toneladas de plástico procesado el 10% del mismo se obtiene unos 500 kg de carbón o biochar, el cual su precio en el mercado es de 1 USD/kg , entonces:

$$I_{carbon-biochar} = 500 \text{ USD/dia} \Rightarrow 3.450 \text{ Bs/dia} \Rightarrow 103.500 \text{ Bs/mes}$$

4.3.2.2 Aceites pesados.

Asumiendo que de la producción diaria un 5% se quedan como aceites pesados que no se pueden destilar.

$$m_{aceite\ pesado} = 5000 \text{ kg} * 0.05 \Rightarrow m_{aceite\ pesado} = 250 \text{ kg/dia}$$

Los precios en el mercado de estos aceites pesados están entre 0,50 – 1 USD:

$$I_{ACEITES\ PESADOS} = 250 \text{ kg/dia} * 0.50 \text{ USD/kg} \Rightarrow$$

$$I_{ACEITES\ PESADOS} = 187,5 \text{ USD/dia} \Rightarrow 1293,75 \text{ Bs/dia} \Rightarrow 38.812,5 \text{ Bs/mes}$$

Por lo cual una estimación total de los ingresos mensuales por la venta de productos y residuos es de:

$$I_{TOTAL} = 680.410,5 \text{ Bs/mes}$$

4.4 FACTIBILIDAD ECONOMICA.

4.4.1 Costos de inversión inicial.

TABLA 28 COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL.

CONCEPTO	COSTO (USD)
Reactor de pirólisis	\$ 27.080,00
Torre de destilación	\$ 24.912,00
Sistemas de almacenamiento	\$ 24.550,87
Sistemas de alimentación y manejo de materiales	\$ 17.000,00
Tuberías de la planta	\$ 1.453,40
Construcción, eléctricos, plomería, seguridad	\$ 10.000,00
Ingeniería y diseño, estudios de factibilidad	\$ 20.000,00
Permisos y licencias	\$ 10.000,00
Capacitación del personal	\$ 5.000,00
TOTAL	\$ 139.996,27

Fuente: Elaboracion propia; 2024.

Haciendo la sumatoria de los costos iniciales de inversión se deduce que el total de inversión necesario es de: **139.996,27 USD.**

4.4.2 Costos Operativos Anuales.

TABLA 29 COSTOS OPERATIVOS ANUALES.

CONCEPTO	COSTO ANUAL (BS.)	COSTO ANUAL (USD)
Materias Primas	Bs 2.737.500,00	\$ 396.164,98
Energía y Utilidades	Bs 37.638,00	\$ 5.446,89
Mano de Obra	Bs 663.000,00	\$ 95.947,90
Mantenimiento y Reparaciones	Bs 34.500,00	\$ 4.992,76
TOTAL	Bs 3.472.638,00	\$ 502.552,53

Fuente: elaboración propia; 2024

La sumatoria de los costos operativos anuales es de **502.552,53 USD**

4.4.3 Ingresos anuales.

TABLA 30 INGRESOS ANUALES DE VENTA DE COMBUSTIBLES.

CONCEPTO	INGRESOS ANUALES (BS.)	INGRESOS ANUALES (USD)
Venta de Kerosene	Bs 901.915,00	\$ 130.523,15

Venta de Diésel	Bs	651.525,00	\$	94.287,26
Venta de Gasolina	Bs	4.994.400,00	\$	722.778,58
TOTAL	Bs	6.547.840,00	\$	947.589,00

Fuente: Elaboracion propia; 2024.

4.4.4 Resumen financiero.

TABLA 31 RESUMEN FINANCIERO DEL PROYECTO.

CONCEPTO	VALOR (USD)	
Total Inversión Inicial	\$	-139.996,27
Total Costos Operativos Anuales	\$	-502.552,53
Total Ingresos Anuales	\$	947.589,00
FLUJO DE CAJA ANUAL	\$	445.036,47

Fuente: Elaboracion propia; 2024.

El flujo de caja anual **de 445.036,47 USD** representa el dinero que la planta generaría cada año después de cubrir todos los costos operativos. Este flujo de caja se utilizaría para recuperar la inversión inicial y posteriormente para generar beneficios.

Estos indicadores financieros muestran que el proyecto de pirólisis es económicamente viable y prometedor, generando flujos de caja sustanciales que justifican la inversión inicial y operativa.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN Y

RECOMENDACIONES

5. Conclusión.

La propuesta de diseño de una planta de obtención de biocombustible mediante la pirólisis no catalítica de plásticos reciclados en la comunidad de "Eco-Recolectoras" del municipio de Cochabamba presenta una solución técnica, económica y ambientalmente viable para abordar la problemática de la acumulación de residuos plásticos y la escasez de combustibles en la región.

- Viabilidad Técnica:**

El proceso de pirólisis no catalítica es adecuado para convertir diversos tipos de plásticos, incluidos PE, PP, PS y PET, en biocombustibles. El diseño del reactor y la planta en general garantiza un rendimiento eficiente y sostenible, utilizando tecnologías avanzadas para controlar emisiones y maximizar la producción de combustibles líquidos de alta calidad.

- Impacto Ambiental:**

La implementación de esta planta contribuirá significativamente a la reducción de residuos plásticos, minimizando su presencia en vertederos, ríos y calles. Además, la producción de biocombustibles a partir de plásticos reciclados disminuirá la dependencia de combustibles fósiles y reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero. El uso de un circuito cerrado y la reutilización de gases mejorarán la eficiencia energética y reducirán la huella de carbono.

- Beneficios Económicos:**

El proyecto es económicamente viable, generando ingresos a través de la venta de biocombustibles de alto valor en el mercado. La reducción de los costos de manejo de residuos y la creación de nuevas oportunidades de comercialización a nivel nacional son aspectos clave que justifican la inversión inicial y operativa. Además, se espera un flujo de caja anual significativo, lo que demuestra la rentabilidad del proyecto.

- **Impacto Social:**

El proyecto no solo aborda cuestiones ambientales y económicas, sino que también proporciona beneficios sociales importantes. La generación de empleo para la comunidad de "Eco-Recolectoras" y la mejora de la calidad de vida mediante la reducción de la contaminación plástica son impactos positivos que fortalecerán la economía local y promoverán una mayor conciencia ambiental en la sociedad.

6. RECOMENDACIONES.

- Monitoreo Continuo:**

Implementar un sistema de monitoreo continuo de las emisiones y la calidad del aire para garantizar que se mantengan bajo control y se minimicen los impactos ambientales negativos.

- Educación y Sensibilización:**

Promover programas de educación y sensibilización sobre la importancia del reciclaje y la gestión adecuada de residuos plásticos, involucrando a la comunidad y a la sociedad en general.

- Mejoras Tecnológicas:**

Continuar investigando y adoptando mejoras tecnológicas en el proceso de pirólisis para aumentar la eficiencia y reducir aún más las emisiones y los residuos.

- Expansión del Proyecto:**

Considerar la posibilidad de expandir el proyecto a otras regiones y municipios, adaptando el diseño de la planta según las necesidades y características específicas de cada localidad.

- Colaboración con Instituciones:**

Fomentar la colaboración con instituciones académicas, gubernamentales y organizaciones no gubernamentales para apoyar la investigación, el desarrollo y la implementación de tecnologías sostenibles para la gestión de residuos plásticos y la producción de biocombustibles.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Noticias Fides. (4 de Mayo de 2024). *noticiasfides.com*. Obtenido de noticiasfides.com: <https://www.noticiasfides.com/economia/experto-advierte-que-causa-real-de-escasez-de-combustible-es-por-falta-de-pago-a-proveedores#:~:text=Experto%20advierte%20que%20causa%20real,Agencia%20de%20Noticias%20Fides%20Bolivia>

AIMPLAS. (16 de Mayo de 2024). *aimplas.org*. Obtenido de [aimplas.org](https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/): <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>

Budsareechai, S. (3 de Julio de 2024). *The Royal Society of Chemistry*. Obtenido de The Royal Society of Chemistry: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ra/c8ra10058f>

Camara de la Industria de Reciclados Plasticos. (15 de Mayo de 2024). *cairplas.org*. Obtenido de [cairplas.org](https://cairplas.org.ar/plasticos/): <https://cairplas.org.ar/plasticos/>

Claros, L. (27 de Junio de 2024). *Los Tiempos*. Obtenido de Los Tiempos: <https://www.lostiemplos.com/actualidad/cochabamba/20230309/180-familias-ecorrecolectoras-reciclan-plasticos-basura-electronica>

Comunicación Marpa Vacuum. (15 de Mayo de 2024). *marpavacuum*. Obtenido de marpavacuum: <https://marpavacuum.com/como-se-fabrica-el-plastico-5-pasos/#:~:text=Los%20pl%C3%A1sticos%20se%20derivan%20principalmente,la%20perforaci%C3%B3n%20de%20pozos%20petroleros.>

Economy. (12 de Mayo de 2023). *Economy.com*. Obtenido de Economy.com: <https://www.economy.com.bo/articulo/economia/diesel-gasolina-encabezan-lista-productos-que-mas-importa-bolivia/20230512142858009856.html#:~:text=Gasolina%3A%20El%20segu>

ndo%20producto%20m%C3%A1s,seguido%20de%20Argentina%20y%20S
uiza.

Editorial Etecé. (15 de Julio de 2021). *concepto.de*. Obtenido de *concepto.de*:
<https://concepto.de/petroleo/>

ENERGIA BOLIVIA. (12 de Junio de 2020). *energiabolivia.com*. Obtenido de *energiabolivia.com*:
https://www.energiabolivia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8380:instalan-planta-piloto-en-tarija-para-obtencion-de-diesel-y-gasolina-del-plastico&catid=54&Itemid=172

FORO NUCLEAR. (24 de Abril de 2024). *foronuclear.org*. Obtenido de *foronuclear.org*:
<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-petroleo-y-que-usos-tiene/>

Gallego, M. A. (3 de Mayo de 2024). <https://biblus.us.es/>. Obtenido de <https://biblus.us.es/>:
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20285/fichero/Archivo+Cap%C3%ADtulo+3.Processo+y+esquema+de+refino..pdf>

Gloria Aponte, B. S. (7 de Mayo de 2024). *saber.ucab.edu.ve*. Obtenido de *saber.ucab.edu.ve*: <https://saber.ucab.edu.ve/items/cbed6833-1c4a-4bc7-906f-4376a6816626>

Instituto Boliviano de Comercio Exterior. (10 de jUNIO de 2024). *IBCE*. Obtenido de *IBCE*: <https://ibce.org.bo/principales-noticias-bolivia/noticias-nacionales-detalle.php?id=50514&idPeriodico=8&fecha=2015-02-02#:~:text=Lidema%20seg%C3%BAn%20los%20estudios%2C%20el,34%20mil%20kilos%20son%20pl%C3%A1sticos.>

- Kister, H. Z. (1992). *Destilacion Design (Destilacion Diferencial)*. Nueva York: McGraw-Hill. Obtenido de https://www.academia.edu/28621003/Distillation_Design_Kister
- La Tercera. (17 de Mayo de 2024). *knowhub.cl*. Obtenido de knowhub.cl: <https://knowhub.cl/2022/09/14/los-chilenos-que-convierten-el-plastico-en-eco-combustible-y-solvente-organico/>
- Los Tiempos. (12 de Marzo de 2024). *lostiempos.com*. Obtenido de lostiempos.com: <https://www.lostiempos.com/actualidad/economia/20240312/produccion-petroleo-bolivia-cayo-su-nivel-mas-ultimos-30-anos>
- MATMAKE. (3 de Julio de 2024). *Matmake.com*. Obtenido de Matmake.com: <https://matmake.com/materials-data/polystyrene-properties.html>
- MatWeb. (3 de Julio de 2024). *matweb.com*. Obtenido de matweb.com: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2&ckck=1>
- Ministerio de Hidrocarburos y Energia de Bolivia. (15 de Febrero de 2024). *Ministerio de Hidrocarburos y Energia de Bolivia*. Obtenido de Ministerio de Hidrocarburos y Energia de Bolivia: <https://www.mhe.gob.bo/2024/02/15/ypfb-despacha-14-millones-de-litros-de-combustibles-por-dia-y-hay-moviles-politicos-detras-de-los-bloqueos/#:~:text=Por%20ejemplo%2C%20en%20Cochabamba%2C%20la,mil%20y%20400%20mil%20litros.>
- MONTES, L. A. (27 de Junio de 2024). *Los Tiempos*. Obtenido de Los Tiempos: <https://www.lostiempos.com/actualidad/cochabamba/20190210/plastico-inunda-calles-emsa-recoge-35-t-botellas-cada-dia>

- Moron, E. (17 de Mayo de 2024). *hive.blog/hive*. Obtenido de hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pirolisis-catalitica-de-residuos-plasticos-para-producir-combustibles
- PDVSA. (3 de Mayo de 2024). *pdvsa.com*. Obtenido de [pdvsa.com](http://www.pdvsa.com/images/pdf/cuadernos/Refinacion.pdf): <http://www.pdvsa.com/images/pdf/cuadernos/Refinacion.pdf>
- Prieto., A. M. (16 de Mayo de 2024). *pt-mexico.com*. Obtenido de [pt-mexico.com](https://www.pt-mexico.com/articulos/la-pirolisis-como-opcion-de-reciclaje-quimico-para-poliolefinas): <https://www.pt-mexico.com/articulos/la-pirolisis-como-opcion-de-reciclaje-quimico-para-poliolefinas>
- QUIMICA.ES. (3 de Mayo de 2024). *quimica.es*. Obtenido de [quimica.es](https://www.quimica.es/enciclopedia/Gasolina.html#Referencias): <https://www.quimica.es/enciclopedia/Gasolina.html#Referencias>
- QUIMICA.ES. (2 de Mayo de 2024). *QUIMICA.ES*. Obtenido de QUIMICA.ES: https://www.quimica.es/enciclopedia/Destilaci%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica.html
- Qureshi, M. S. (21 de Diciembre de 2021). *mdpi.com*. Obtenido de [mdpi.com](https://www.mdpi.com/1420-3049/26/23/7317): <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/23/7317>
- REPSOL. (5 de Mayo de 2024). *repsol.com*. Obtenido de [repsol.com](https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-eolica/index.cshtml): <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-eolica/index.cshtml>
- REPSOL. (5 de Mayo de 2024). *repsol.com*. Obtenido de [repsol.com](https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml): <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>
- REPSOL. (5 de Mayo de 2024). *repsol.com*. Obtenido de [repsol.com](https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-hidraulica/index.cshtml): <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-hidraulica/index.cshtml>

- REPSOL. (5 de Mayo de 2024). *repsol.com*. Obtenido de [repsol.com](https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-geotermica/index.cshtml):
- REPSOL. (5 de Mayo de 2024). *repsol.com*. Obtenido de [repsol.com](https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biomasa/index.cshtml):
- Roberto Scaffaro. (9 de Abril de 2019). Polímeros. *Degradación y reciclaje de películas basadas en polímeros biodegradables: una breve revisión*. Palermo, Italia. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/4/651>
- Valeria Peredo, A. R. (27 de Junio de 2024). *LAB TECNO SOCIAL*. Obtenido de LAB TECNO SOCIAL: <https://labtecnosocial.org/las-eco-recolectoras-en-cochabamba/>
- Vargas, N. (27 de Junio de 2024). *Opinion*. Obtenido de Opinion: <https://www.opinion.com.bo/articulo/revista-asi/ruth-velasquez-eco-recolectora-que-dignifica-trabajo-basura/20220526205737868193.html>
- Xunrui Wang, C. D. (2022). Pirólisis catalítica de polietileno y polipropileno sobre zeolita Y. *Actas complementarias de la 151.^a reunión y exposición anual de TMS 2022* (págs. 557–563). India: Springer.

CAPÍTULO 7

ANEXOS

ANEXO I:

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE LOS COMBUSTIBLES.

ANEXO I.I

**ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE LA GASOLINA DE ALTO OCTANAJE EN
BOLIVIA**

PRUEBA	VERANO (*)		INVIERNO		UNIDAD	METODO ASTM			
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.		Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4
Gravedad específica a 15.6/15.6°C		Informar		Informar		D-1298	D-4052		
Tensión de vapor de Reid a 100°F(37,8°C)	7	9	7	9.5	psig	D-323	D-4953	D-5191	
Relación V/L=20 (760 mmHg)	56(133)		51(124)		°C (°F)	D-5188	D-2533	D-4814	
Contenido de plomo (**)		0.013		0.013	g Pb/lit	D-3237	D-5059		
Gomas existentes		5		5	mg/100ml	D-381			
Azufre total		0.05		0.05	% peso	D-1266	D-2622	D-4294	
Octanaje RON	95		95			D-2699			
Octanaje MON		Informar		Informar		D-2700			
Indice antidetonante (RON+MON)/2		Informar		Informar					
Color		Violeta		Violeta		Visual			
Apariencia		Cristalina		Cristalina		Visual			
Poder calorífico		Informar		Informar	BTU/lb	D-240			
Destilación Engler (760 mmHg) (***)						D-86			
10% vol.		65(149)		60(140)	°C (°F)				
50% vol.	77(170)	118(245)	77(170)	116(240)	°C (°F)				
90% vol.		190(374)		185(365)	°C (°F)				
Punto final		225(437)		225(437)	°C (°F)				
Residuo		2		2	% vol.				
Contenido de aromáticos totales		48		48	% vol.	D-1319	D-5134	D-5769	D-6729
Contenido de olefinas		18		18	% vol.	D-1319	D-5134	D-6729	
Contenido de benceno		3		3	% vol.	D-4053	D-5134	D-3606	D-5769
Contenido de manganeso		18		18	mg Mn/ lt	D-3831			
Contenido de oxígeno		2.7		2.7	% peso	D-2504	D-4815		

Fuente: Especificaciones Técnicas ANH; 2024

ANEXO I.II

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL DIÉSEL EN BOLIVIA.

PRUEBA	ORIENTE (*)		OCCIDENTE		UNIDAD	METODO ASTM		
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.		Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3
Gravedad específica a 15.6/15.6°C	0.79	0.88	0.80	0.88		D-1298	D-4052	
Corrosión lámina de cobre (3h/100°C)		3		3		D-130		
Azufre total		0.5		0.5	% peso	D-1266	D-4294	D-2622
Punto de escorrimiento		(*)		-1.1(30)	°C (°F)	D-97		
Punto de inflamación	38(100.4)		38(100.4)		°C (°F)	D-93		
Apariencia	Cristalina		Cristalina			Visual		
Viscosidad cinemática a 40°C	1,7	5.5	1.7	5.5	cSt	D-445	D-7042	
Índice de cetano (**)	45		45			D-976	D-4737	
Número de cetano	42		42			D-613		
Residuo carbonoso Ramsbottom del 10% de residuo destilado		0.30		0.30	% peso	D-524	D-189	D-4530
Cenizas		0.02		0.02	% peso	D-482		
Agua y sedimentos		0.05		0.05	% peso	D-1796	D-2709	
Destilación Engler (760 mmHg) (***) 90% vol.	282(540)	382(720)	282(540)	382(720)	°C (°F)	D-86		
Poder calorífico	Informar		Informar		BTU/lb	D-4868	D-240	
Color ASTM	Informar		Informar			D-1500		
Contenido de aromáticos totales	Informar		Informar		% Vol	D-1319		

Zona Oriente	Ene-Feb-Mar	Abril	May-Jun-Jul- Ago	Sep	Oct-Nov	Dic
Punto de escorrimiento	12(53,6)	7(44,6)	3(37,4)	7(44,6)	9(48,2)	12(53,6)

Fuente: Especificaciones Técnicas ANH; 2024

ANEXO I.III

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL KEROSENE EN BOLIVIA.

PRUEBA	ESPECIFICACION		UNIDAD	METODO ASTM		
	MIN.	MAX.		Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3
Gravedad específica a 15,6/15,6°C	Informar			D-1298	D-4052	
Corrosión lámina de cobre		3		D-130		
Azufre total		0,3	% peso	D-1266	D-4294	D-2622
Color Saybolt	16			D-156		
Punto de inflamación	38(100,4)		°C(°F)	D-56	D-93	
Apariencia	Cristalina			Visual		
Agua y sedimentos	0,05		% peso	D-1796		
Viscosidad cinemática a 40°C	1	1,9	cSt	D-445	D-7042	
Destilación Engler (760 mmHg):				D-86		
10% vol.		205(401)	°C(°F)			
Punto final		300(572)	°C(°F)			
Recuperado	97		% vol.			

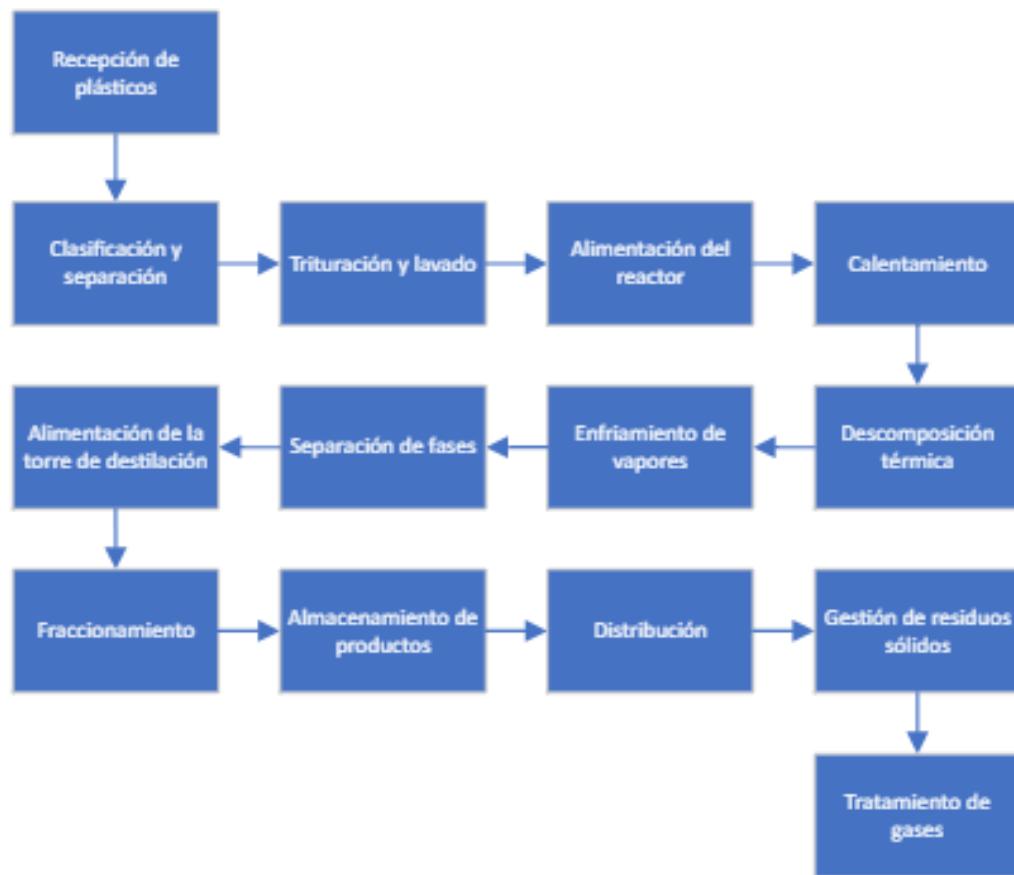
Fuente: Especificaciones Técnicas ANH; 2024

ANEXO II:

**DIAGRAMAS Y PLANOS
DE LA PANTA DE
PIROLISIS NO
CATALITICA.**

ANEXO II.I

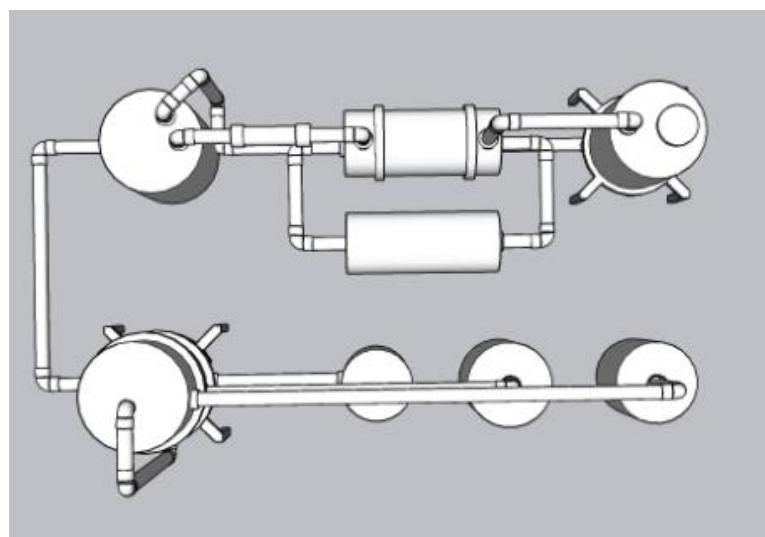
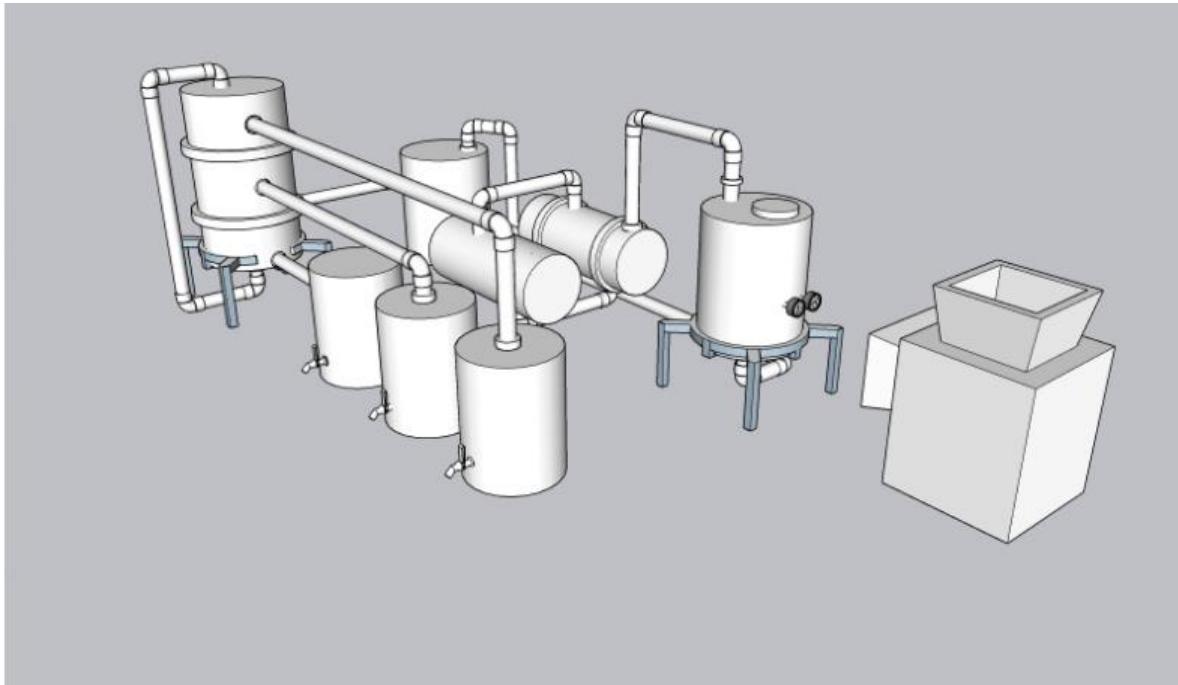
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIROLISIS.



Fuente: Elaboracion propia en base a la investigación realizada; 2024.

ANEXO II.II

PLANOS DE LA PLANTA DE PIROLISIS.



Fuente: Elaboracion propia en base a la investigación realizada; 2024.

ANEXO III:

TABLAS DE DATOS.

ANEXO III.I

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POLÍMEROS UTILIZADOS EN LA PLANTA
DE PIROLISIS NO CATALÍTICA.**

PLÁSTICO	FÓRMULA QUÍMICA	CARBO NO (%)	HIDRÓGENO (%)	DENSIDAD (G/CM ³)	HIDROCARBUROS PRESENTES
Polietileno (PE)	(C ₂ H ₄) _n	85,7	14,3	0,910-0,970	Parafinas 50%, Olefinas 25%, Aromáticos 15%, Naftenos 10%
Polipropileno (PP)	(C ₃ H ₆) _n	85,6	14,4	0,905	Parafinas 50%, Olefinas 25%, Aromáticos 15%, Naftenos 10%
Poliestireno (PS)	(C ₈ H ₈) _n	92,3	7,7	1,04-1,07	Estireno 60%, Tolueno 15%, Etilbenceno 10%, Benceno 10%, Xileno 5%
Polietileno Tereftalato (PET)	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	62,5	4,2	1,38	Estireno 60%, Tolueno 15%, Etilbenceno 10%, Benceno 10%, Xileno 5%

Fuente: Elaboracion propia en base a la investigación.

ANEXO III.II

RESULTADOS DE LA DESTILACIÓN DEL ACEITE PIROLÍTICO.

COMPONENTE	MASA (KG)	PORCENTAJE (%)
PE Y PP		
PARAFINAS	1062.5	25
OLEFINAS	531.25	12.5
AROMÁTICOS	318.75	7.5
NAFTENOS	212.5	5
PS Y PET		
ESTIRENO	1275	30
TOLUENO	318.75	7.5
ETILBENCENO	212.5	5
BENCENO	212.5	5
XILENO	106.25	2.5
TOTAL	4250	100

Fuente: Elaboracion Propia en base a datos de investigación; 2024

ANEXO IV:

NORMATIVAS Y REGULACIONES

ANEXO IV.I

Ley N° 3058, de 17 de mayo de 2005,

Ley de Hidrocarburos; **Articulo 1**

DR. HORMANDO VACA DIEZ VACA DIEZ
PRESIDENTE DEL HONORABLE CONGRESO NACIONAL

Por cuanto el Honorable Congreso Nacional ha sancionado la siguiente Ley, de conformidad con lo prescrito por el Artículo 78 de la Constitución Política del Estado, la promulgo para que se tenga y cumpla como Ley de la República:

EL HONORABLE CONGRESO NACIONAL,
D E C R E T A:

LEY DE HIDROCARBUROS

TITULO I

**ALCANCE DE LA LEY DE HIDROCARBUROS Y EJECUCION Y CUMPLIMIENTO DEL REFERENDUM DE
18 DE JULIO DE 2004 SOBRE LA POLITICA DE HIDROCARBUROS EN BOLIVIA**

CAPITULO I
ALCANCE DE LA LEY DE HIDROCARBUROS

ARTICULO 1º (Alcance). Las disposiciones de la presente Ley norman las actividades hidrocarburíferas de acuerdo a la Constitución Política del Estado y establecen los principios, las normas y los procedimientos fundamentales que rigen en todo el territorio nacional para el sector hidrocarburífero.

Todas las personas individuales o colectivas, nacionales o extranjeras, públicas, de sociedades de economía mixta y privadas que realizan y/o realicen actividades en el sector hidrocarburífero, Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB), los servidores públicos, consumidores y usuarios de los servicios públicos, quedan sometidos a la presente Ley.

Fuente: Servicio Estatal de Autonomías;2024

Define el alcance de la ley, aplicable a todas las actividades hidrocarburíferas en el territorio nacional.

ANEXO IV.II

Ley N° 755, de 28 de octubre de 2015,

Ley De Gestión Integral De Residuos; Artículo 7

medio ambiente, su manejo inadecuado.

- f) Responsabilidad Compartida. La Gestión Integral de Residuos es responsabilidad social, pública y privada; requiere la participación conjunta, coordinada y diferenciada de todos sus actores.
- g) Sostenibilidad. La Gestión Integral de Residuos debe adaptarse a las condiciones locales en base a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales, para garantizar su continuidad, expansión y mejora permanente.
- h) Sustentabilidad. Toda actividad, obra o proyecto para la Gestión Integral de Residuos, deberá mantener un equilibrio entre las necesidades de los seres humanos y la conservación de los recursos naturales y ecosistemas que sustentarán la vida de las futuras generaciones.

Artículo 7. (GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS). Se entiende por Gestión Integral de Residuos al sistema conformado por procesos de planificación, desarrollo normativo, organización, sostenibilidad financiera, gestión operativa, ambiental, educación y desarrollo comunitario para la prevención, reducción, aprovechamiento y disposición final de residuos, en un marco de protección a la salud y el medio ambiente.

Artículo 8. (JERARQUIZACIÓN DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS).

- I. En la aplicación de la Gestión Integral de Residuos, el nivel central del Estado y las entidades territoriales autónomas, deben orientar sus acciones, en orden de importancia, a:
 - 1. Prevenir para reducir la generación de residuos.
 - 2. Maximizar el aprovechamiento de los residuos.
 - 3. Minimizar la disposición final de los residuos, restringiendo en lo posible sólo para aquellos residuos no aprovechables.
- II. Todo generador de residuos, así como aquel que realice la gestión operativa de los mismos, deberá realizar sus actividades en el orden de prioridad señalado en el Parágrafo precedente.

Artículo 9. (POLÍTICAS DE ESTADO). Se establecen las siguientes políticas de Estado:

- a) Planificación y coordinación interinstitucional e intersectorial para la Gestión Integral de Residuos.
- b) Prevención de la generación de residuos y fomento al cambio de patrones de producción y consumo para re-

Fuente: Servicio Estatal de Autonomías;2024

Fomenta la reutilización y el reciclaje de residuos sólidos.

ANEXO IV.III

LEY N° 1098, de 15 de septiembre de 2018

Ley De Biocombustibles; Artículo 1

Ley N° 1098

LEY DE 15 DE SEPTIEMBRE DE 2018

EVO MORALES AYMA

PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DEL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

Por cuanto, la Asamblea Legislativa Plurinacional, ha sancionado la siguiente Ley:

LA ASAMBLEA LEGISLATIVA PLURINACIONAL,

DECRETA:

Artículo 1º.- (Objeto) La presente Ley tiene por objeto establecer el marco normativo que permita la producción, almacenaje, transporte, comercialización y mezcla de Aditivos de Origen Vegetal, con la finalidad de sustituir gradualmente la importación de Insumos y Aditivos, y Diésel Oil, precautelando la seguridad alimentaria y energética con soberanía.

Artículo 2º.- (Definiciones) A los efectos de la presente Ley, se adoptan las siguientes definiciones:

- a. Aditivos de Origen Vegetal. Son productos intermedios extraídos o derivados de productos, subproductos, residuos y desechos vegetales que se emplean para ser mezclados con Gasolinas, Diésel Oil u otros carburantes de origen fósil.
- b. Etanol Anhidro. Es el Aditivo de Origen Vegetal resultante de la deshidratación del alcohol etílico, a través de tecnologías que no dejen residuos químicos.
- c. Biodiesel. Es el Aditivo de Origen Vegetal, resultante de la transformación química de un aceite o grasa, debidamente refinado, en reacción con Etanol Anhidro.

Fuente: Portal Jurídico Lexivox; 2024.

Fomenta la producción y uso de biocombustibles, con principios aplicables a la producción de combustibles a partir de residuos plásticos mediante pirolisis.

ANEXO IV.IV

Decreto Supremo N° 2741, de 15 de septiembre de 2018 27 de abril de 2016

Reglamento de Calidad de Carburantes

Decreto Supremo N° 2741

EVO MORALES AYMA

PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DEL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

CONSIDERANDO:

- Que el Artículo 75 de la [Constitución Política del Estado](#), determina que las usuarias y los usuarios y las consumidoras y los consumidores tienen derecho al suministro de productos en general, en condiciones de inocuidad, calidad y a la información fidedigna sobre las características y contenidos de los productos que consuman y servicios que utilicen.
- Que el numeral 2 del Artículo 316 del Texto Constitucional, establece como una función del Estado dirigir la economía y regular, conforme con los principios establecidos en la Constitución, los procesos de producción, distribución, y comercialización de bienes y servicios.
- Que el Artículo 365 de la [Constitución Política del Estado](#), dispone que una institución autárquica de derecho público, con autonomía de gestión administrativa, técnica y económica, bajo la tutela del Ministerio del ramo, será responsable de regular, controlar, supervisar y fiscalizar las actividades de toda la cadena productiva hasta la industrialización, en el marco de la política estatal de hidrocarburos conforme con la ley.
- Que los incisos c), d) y g) del Artículo 10 de la [Ley N° 3058](#), de 17 de mayo de 2005, de Hidrocarburos, señalan que las actividades petroleras se regirán por los principios de calidad, que obliga a cumplir los requisitos técnicos y de seguridad establecidos; de continuidad, que obliga a que el abastecimiento de los hidrocarburos y los servicios de transporte y distribución, aseguren satisfacer la demanda del mercado interno de manera permanente e ininterrumpida; y de adaptabilidad, que promueve la incorporación de tecnología y sistemas de administración modernos, que aporten mayor calidad, eficiencia, oportunidad y menor costo en la prestación de los servicios.
- Que el Reglamento de Calidad de Carburantes y el Reglamento de Calidad de Lubricantes, aprobado por [Decreto Supremo N° 1499](#), de 20 de febrero de 2013, establecen las especificaciones de calidad de los carburantes y lubricantes respectivamente.

Fuente: Portal Jurídico Lexivox; 2024.

Modifica y complementa reglamentos relacionados con la calidad de carburantes y lubricantes, asegurando el cumplimiento de normas técnicas.

ANEXO IV.V

Ley N° 1333, de 27 de abril de 1992

Ley del Medio Ambiente

JAIME PAZ ZAMORA
PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA

Por cuanto, el Honorable Congreso Nacional, ha sancionado la siguiente Ley:

**TITULO I
DISPOSICIONES GENERALES**

**CAPITULO I
OBJETO DE LA LEY**

Artículo 1. La presente Ley tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población.

Artículo 2. Para los fines de la presente Ley, se entiende por desarrollo sostenible, el proceso mediante el cual se satisfacen las necesidades de la actual generación, sin poner en riesgo la satisfacción de necesidades de las generaciones

**CAPITULO V
DE LOS ASUNTOS DEL MEDIO AMBIENTE
EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL**

Artículo 29. El Estado promoverá tratados y acciones internacionales de preservación, conservación y control de fauna y flora, de áreas protegidas, de cuencas y/o ecosistemas compartidos con uno o más países.

Artículo 30. El Estado regulará y controlará la producción, introducción y comercialización de productos farmacéuticos, agrotóxicos y otras sustancias peligrosas y/o nocivas para la salud y/o del medio ambiente. Se reconocen como tales, aquellos productos y sustancias establecidas por los organismos nacionales e internacionales correspondientes, como también las prohibidas en los países de fabricación o de origen.

Artículo 31. Queda prohibida la introducción, depósito y tránsito por territorio nacional de desechos tóxicos, peligrosos, radioactivos u otros de origen interno y/o externo que por sus características constituyan un peligro para la salud de la población y el medio ambiente.

Fuente: Portal Jurídico Lexivox; 2024.

Establece el marco legal para la protección del medio ambiente en Bolivia, incluyendo la gestión de residuos y la evaluación de impacto ambiental.