

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA



**PROYECTO DE GRADO**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE  
COMBUSTIBLE A PARTIR DE RECICLADO DE PLÁSTICO EN LA CIUDAD DE  
LA PAZ**

POSTULANTE: UNIV. YAMIL FAVIAN ESTEVEZ MEDINA

TUTOR: M.SC. ING PEDRO REYNALDO MARIN DOMINGUEZ

LA PAZ – BOLIVIA 2022



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a Dios por darme la fuerza para seguir adelante mostrándome y guiándome por el camino correcto

Dedico este proyecto a mi madre Galinda Medina Cornejo por alentarme cada día a seguir adelante, por velar siempre por mí por sobre todas las cosas, por cada concejo y sobre todo por todo el amor que solo una madre puede dar

Dedico este proyecto a mi padre Félix Estevez Albino por ser un pilar en mi vida que me enseñó a aprender de mis errores y no darme por vencido sin importar que tan difíciles se pongan las situaciones

Dedico este proyecto a mi hermano Mauricio Estevez Medina por inspirarme a ser cada día una mejor persona y lo suficientemente capaz para poder guiarlo

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero agradezco a Dios por no dejarme caer en los momentos de incertidumbre y darme la sabiduría y el valor para afrontar cada una de los retos que me llevaron a la conclusión y realización de este proyecto

Agradezco a mi padre Félix Estevez Albino, a mi madre Galinda Medina Cornejo y a mi hermano Mauricio Estevez Medina por todo su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida

Agradezco a cada uno de los Docentes de la Carrera de Ingeniería Petrolera de la Universidad Mayor de San Andrés por brindarme todo su el conocimiento adquirido que fue la herramienta principal para la elaboración de este proyecto, gracias a mi tutor de proyecto el Ing. Reynaldo Marín por ser mi guía y consejero en la elaboración de este proyecto. También agradezco a mis revisores Ing. Carlos Torrico, Ing. Mauricio Alvarez y Ing. Sergio Viscarra por las revisiones realizadas

Agradezco a mis amigos y compañero de universidad por todas las experiencias vividas. Finalmente agradezco a grandes personas que a lo largo de esta etapa en mi vida fueron un gran apoyo Antonio Lima, Álvaro Mendoza, Daniel Delgado, Evelyn Quinteros, Fernando Huarachi, Jeanette Farfán, Karla Peralta y Nashira Chávez.

## RESUMEN

Este proyecto ha sido desarrollado con el propósito de generar otra fuente alterna de combustibles, haciendo un énfasis especial en el diésel sintético que puede obtenerse en el departamento de La Paz, empleando como materia prima el plástico reciclado (Polipropileno, Poliestireno, Polietileno de alta densidad) de distintas fuentes tomando en cuenta el plástico de la basura. Dicha materia prima abunda en La ciudad de La Paz, dándoles un segundo uso a estos productos, por lo que este proyecto a su vez contribuye a la reducción de la contaminación ambiental en dicho departamento debido a que los productos plásticos son bastante contaminantes ya que solo llegan a degradarse en bastante tiempo.

Este proyecto a su vez incentiva a la disminución de la importación de diésel que nuestro país realiza en grandes cantidades y en cual va aumentando con el pasar de los años. Se realizó un estudio de mercado de los combustibles en nuestro país, tocando los temas de producción nacional y el constante crecimiento de la demanda del mercado interno.

Se empleará el proceso de “Pirólisis” que ha sido desarrollado un proceso de tecnología de conversión que puede convertir varios tipos de residuos plásticos en combustibles líquidos, como ser diésel gasolina. Esta tecnología convierte los residuos plásticos en combustibles que son aprovechables en distintos sectores tanto industriales como urbanos a parte que son mucho más limpios y de bajo o casi nulo contenido de azufre.

Se abordarán los conceptos básicos de la Pirólisis, dando a conocer los diferentes tipos de procesos en la Pirolisis así también como la pirolisis catalítica y pirolisis térmica que sería la utilizada en este proyecto, así también los parámetros necesarios de estudio como el tipo de reactor a utilizar, la temperatura y el tiempo de residencia adecuado.

Con el fin de ver la viabilidad se realiza un análisis de disponibilidad de materia prima, la cantidad de desechos plásticos que es generada en la ciudad de La Paz también el consumo reciclaje de los mismos.

A su vez se realizará una simulación con los datos obtenidos de los anteriores puntos utilizando el software computacional Aspen Plus para cada plástico (Polipropileno, Poliestireno, Polietileno de alta densidad) de manera individual para así también conocer los productos más posibles generados para cada tipo de plástico.

## CONTENIDO

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 1         | CAPÍTULO 1 GENERALIDADES .....                          | 1  |
| 1.1       | INTRODUCCIÓN.....                                       | 1  |
| 1.2       | ANTECEDENTES.....                                       | 2  |
| 1.3       | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                        | 4  |
| 1.3.1     | IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....                        | 4  |
| 1.3.2     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....                           | 4  |
| 1.4       | OBJETIVOS.....  | 5  |
| 1.4.1     | OBJETIVO GENERAL.....                                   | 5  |
| 1.4.2     | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                             | 5  |
| 1.5       | JUSTIFICACIÓN.....                                      | 5  |
| 1.5.1     | JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....                              | 5  |
| 1.5.2     | JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA .....                           | 6  |
| 1.5.3     | JUSTIFICACIÓN SOCIAL.....                               | 6  |
| 1.5.4     | JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.....                            | 7  |
| 1.6       | ALCANCE.....  | 7  |
| 1.6.1     | ALCANCE TEMÁTICO.....                                   | 7  |
| 2         | CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO.....                           | 8  |
| 2.1       | COMBUSTIBLES SINTÉTICOS .....                           | 8  |
| 2.1.1     | EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA A LO LARGO DE LA HISTORIA.....  | 8  |
| 2.1.2     | ORIGEN DE LOS COMBUSTIBLES SINTÉTICOS .....             | 9  |
| 2.1.3     | VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS ..... | 10 |
| 2.1.3.1   | VENTAJAS DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS .....               | 10 |
| 2.1.3.2   | DESVENTAJAS DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS.....             | 10 |
| 2.2       | SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA .....      | 11 |
| 2.2.1     | TEORÍA DE PLÁSTICOS .....                               | 11 |
| 2.2.1.1   | TIPOS DE PLÁSTICOS.....                                 | 11 |
| 2.2.1.1.1 | TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....                   | 12 |
| 2.2.1.1.2 | POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE).....                | 15 |
| 2.2.1.1.3 | POLICLORURO DE VINILO (PVC) .....                       | 17 |
| 2.2.1.1.4 | POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE).....                | 20 |
| 2.2.1.1.5 | POLIPROPILENO (PP) .....                                | 23 |
| 2.2.1.1.6 | POLIESTIRENO (PS).....                                  | 25 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 2.2.1.2     | CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO TÉRMICO - MECÁNICO .....       | 28 |
| 2.2.1.2.1   | TERMOPLÁSTICOS .....  | 28 |
| 2.2.1.2.2   | TERMOESTABLES .....   | 28 |
| 2.2.2       | GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS .....   | 29 |
| 2.2.2.1     | RECICLADO MECÁNICO .....  | 29 |
| 2.2.2.2     | RECICLADO QUÍMICO .....   | 30 |
| 2.2.2.2.1   | PIRÓLISIS .....   | 31 |
| 2.2.2.2.2   | GASIFICACIÓN .....  | 31 |
| 2.2.2.2.3   | DESPOLIMERIZACIÓN CATALÍTICA .....  | 31 |
| 2.2.2.2.4   | HIDROGENACIÓN .....   | 32 |
| 2.2.3       | DISPONIBILIDAD DE PLÁSTICOS EN LA CIUDAD DE LA PAZ .....                          | 32 |
| 2.2.4       | COMPOSICIÓN GENERAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES .....                     | 34 |
| 2.2.4.1.1   | DISPONIBILIDAD DE POLIESTIRENO POLIPROPILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD ..... | 36 |
| 2.3         | CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA PIRÓLISIS .....                                     | 37 |
| 2.3.1       | PROCESO DE PIRÓLISIS .....  | 37 |
| 2.3.1.1     | PIRÓLISIS TÉRMICA .....   | 38 |
| 2.3.1.1.1   | TIPOS DE PIRÓLISIS TÉRMICA .....  | 38 |
| 2.3.1.1.1.1 | PIRÓLISIS LENTA .....   | 39 |
| 2.3.1.1.1.2 | PIRÓLISIS RÁPIDA .....  | 39 |
| 2.3.1.1.1.3 | PIRÓLISIS FLASH .....   | 39 |
| 2.3.1.1.2   | MECANISMO DE DEGRADACIÓN TÉRMICA DE POLÍMEROS .....                               | 39 |
| 2.3.1.1.2.1 | CISIÓN AL FINAL DE LA CADENA .....  | 40 |
| 2.3.1.1.2.2 | PROPAGACIÓN .....   | 40 |
| 2.3.1.1.2.3 | TERMINACIÓN .....   | 40 |
| 2.3.1.2     | PIRÓLISIS CATALÍTICA .....  | 42 |
| 2.3.1.2.1   | MECANISMO DE DEGRADACIÓN CATALÍTICA DE POLÍMEROS .....                            | 42 |
| 2.3.1.2.1.1 | FORMACIÓN DEL ION CARBONILO .....   | 43 |
| 2.3.1.2.1.2 | BIMOLECULAR .....   | 43 |
| 2.3.1.2.1.3 | REORDENAMIENTO INTRAMOLECULAR .....   | 43 |
| 2.3.1.2.1.4 | AROMATIZACIÓN Y ALQUILACIÓN .....   | 43 |
| 2.3.2       | PARÁMETROS IMPORTANTES QUE AFECTAN LA PIRÓLISIS .....                             | 44 |
| 2.3.2.1     | TEMPERATURA .....   | 44 |
| 2.3.2.2     | VELOCIDAD DE CALEFACCIÓN .....  | 45 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 2.3.2.3   | TIEMPO DE RESIDENCIA.....   | 45 |
| 2.3.2.4   | PRESIÓN .....   | 45 |
| 2.3.2.5   | HUMEDAD.....  | 46 |
| 2.3.2.6   | TAMAÑO DE PARTÍCULA .....   | 46 |
| 2.3.2.7   | CANTIDAD DE MUESTRA .....   | 46 |
| 2.3.2.8   | ATMÓSFERA DE REACCIÓN.....  | 46 |
| 3         | CAPÍTULO 3 ESTUDIO DE MERCADO .....   | 47 |
| 3.1       | PRODUCTORES, EXPORTADORES E IMPORTADORES EN EL MUNDO .....                    | 47 |
| 3.2       | MERCADO NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....                                | 50 |
| 3.2.1     | DEMANDA NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS .....                               | 50 |
| 3.2.2     | OFERTA NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE PRODUCCIÓN NACIONAL.....          | 51 |
| 3.2.3     | IMPORTACIÓN NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS .....                           | 54 |
| 4         | CAPÍTULO 4 APLICACIÓN PRÁCTICA.....   | 58 |
| 4.1       | SISTEMA DE REACCIÓN .....   | 58 |
| 4.1.1     | TIPO DE REACCIÓN.....   | 58 |
| 4.1.2     | CINÉTICA DE LA REACCIÓN .....   | 58 |
| 4.1.2.1   | ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN .....                                       | 59 |
| 4.1.2.1.1 | ORDEN DE REACCIÓN (n) .....   | 59 |
| 4.1.2.1.2 | CONSTANTE DE VELOCIDAD (K).....   | 60 |
| 4.1.2.2   | ECUACIÓN DE ARRHENIUS.....  | 60 |
| 4.1.2.2.1 | ENERGÍA DE ACTIVACIÓN ( <i>EA</i> ).....                                      | 60 |
| 4.1.2.2.2 | FACTOR PRE EXPONENCIAL (A) .....  | 61 |
| 4.1.3     | CÁLCULO DE LA CINÉTICA DE LA REACCIÓN.....                                    | 61 |
| 4.1.3.1   | CÁLCULO DE LA ECUACIÓN CINÉTICA DEL POLIESTIRENO (PS).....                    | 61 |
| 4.1.3.2   | CÁLCULO DE LA ECUACIÓN CINÉTICA DEL POLIPROPILENO (PP) .....                  | 66 |
| 4.1.3.3   | CÁLCULO DE LA ECUACIÓN CINÉTICA DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) ..... | 69 |
| 4.1.4     | CRITERIO DE SELECCIÓN DE REACTOR .....  | 72 |
| 4.1.5     | CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REACCIÓN EN REACTOR TIPO BATCH .....                | 74 |
| 4.1.5.1   | CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN DEL POLIESTIRENO .....                         | 75 |
| 4.1.5.2   | CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN DEL POLIPROPILENO.....                         | 76 |
| 4.1.5.3   | CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD .....         | 77 |
| 4.1.6     | CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR .....                                | 78 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 4.1.6.1     | CÁLCULO DE LA PRESIÓN MÁXIMA PERMITIDA .....   | 80  |
| 4.1.6.2     | CÁLCULO DEL ESPESOR DEL REACTOR.....   | 81  |
| 4.1.6.3     | CÁLCULO DEL FONDO TORRIESFERICO.....   | 83  |
| 4.2         | SISTEMA DE CONDENSACIÓN .....  | 85  |
| 4.2.1       | CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DEL CONDENSADORES .....                                    | 85  |
| 4.2.1.1     | CÁLCULO PARA EL PRIMER CONDENSADOR.....  | 88  |
| 4.2.1.1.1   | CÁLCULO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA<br>LOGARÍTMICA ( $\Delta TLMD$ ) ..... | 89  |
| 4.2.1.1.2   | CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN (f).....  | 90  |
| 4.2.1.1.3   | CÁLCULO PARA EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASFERENCIA DE<br>CALOR <b>UCAL</b> .....     | 95  |
| 4.2.1.1.3.1 | CÁLCULO DE <b>hi</b> PARA LOS TUBOS .....  | 95  |
| 4.2.1.1.3.2 | CÁLCULO DE <b>h0</b> PARA EL SHELL.....  | 96  |
| 4.2.1.2     | CÁLCULO PARA EL SEGUNDO CONDENSADOR .....  | 100 |
| 4.2.1.2.1   | CÁLCULO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA<br>LOGARÍTMICA ( $\Delta TLMD$ ) ..... | 101 |
| 4.2.1.2.2   | CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN (f).....  | 102 |
| 4.2.1.2.3   | CÁLCULO PARA EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASFERENCIA DE<br>CALOR <b>UCAL</b> .....     | 108 |
| 4.2.1.2.3.1 | CÁLCULO DE <b>hi</b> PARA LOS TUBOS .....  | 108 |
| 4.2.1.2.3.2 | CÁLCULO DE <b>h0</b> PARA EL SHELL.....  | 109 |
| 4.3         | SELECCIÓN DE BOMBAS .....  | 114 |
| 4.3.1       | CÁLCULO DE LA ALTURA DE SUCCIÓN REQUERIDO.....                                       | 114 |
| 4.3.2       | PERDIDA POR LONGITUD DE TUBERÍA Y ACCESORIOS .....                                   | 117 |
| 4.4         | SIMULACIÓN DEL PROCESO.....  | 122 |
| 4.4.1       | PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN.....   | 123 |
| 4.4.1.1     | CALCULATOR .....   | 127 |
| 4.4.2       | RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....  | 129 |
| 4.4.2.1     | RESULTADOS POLIESTIRENO .....  | 129 |
| 4.4.2.2     | RESULTADOS DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD.....                                     | 131 |
| 4.4.2.3     | RESULTADOS DEL POLIPROPILENO .....   | 133 |
| 4.5         | RESULTADOS Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE REACCIÓN .....                                 | 136 |
| 4.6         | RESULTADOS Y PROPUESTA DE LOS CONDENSADORES.....                                     | 137 |
| 4.7         | RESULTADOS Y PROPUESTA DE LAS BOMBAS .....   | 138 |
| 4.8         | RESULTADOS DE CONVERSIÓN DE MATERIA PRIMA .....                                      | 138 |
| 5           | CAPÍTULO 5 ESTUDIO ECONÓMICO .....   | 139 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.1     | COSTOS DE INVERSIÓN DEL PROYECTO.....           | 139 |
| 5.1.1   | COSTOS DE OPERACIÓN DEL PROYECTO.....           | 140 |
| 5.1.1.1 | COSTOS DE PERSONAL .....                        | 140 |
| 5.1.1.2 | COSTOS DE MATERIA PRIMA .....                   | 140 |
| 5.2     | INGRESOS DEL PROYECTO.....                      | 141 |
| 5.3     | VALOR ACTUAL NETO (VAN) .....                   | 142 |
| 5.4     | TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) .....             | 143 |
| 6       | CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... | 145 |
| 6.1     | CONCLUSIONES.....                               | 145 |
| 6.2     | RECOMENDACIONES .....                           | 146 |
| 7       | ANEXOS .....                                    | 150 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 2.1 Código de identificación de resinas de plástico .....                              | 12  |
| Figura 2.2 Composición general de residuos sólidos en la ciudad de La Paz .....               | 35  |
| Figura 2.3 Mecanismo de reacción del craqueo térmico.....                                     | 41  |
| Figura 2.4 Mecanismo de reacción de craqueo catalítico. ....                                  | 44  |
| Figura 3.1 Crecimiento del volumen de la demanda de combustibles líquidos en el país.....     | 51  |
| Figura 3.2 Explotación nacional de líquidos en Bolivia durante los años 2010 a 2019 .....     | 52  |
| Figura 3.3 Situación de los volúmenes de producción anual entre los años 2005 a 2019 .....    | 53  |
| Figura 3.4 Importación de combustibles líquidos en Bolivia.....                               | 55  |
| Figura 3.5 Evolución de importaciones de diésel periodo 2005 - 2020 .....                     | 56  |
| Figura 4.1 Regresión lineal del polietileno .....   | 64  |
| Figura 4.2 Regresión lineal del polipropileno .....   | 67  |
| Figura 4.3 Regresión lineal del polietileno de alta densidad.....                             | 70  |
| Figura 4.4 Geometría de un fondo torriesferico tipo KLOPPER.....                              | 83  |
| Figura 4.5 Factor de corrección de LMTD para 1-2,4,6.....                                     | 91  |
| Figura 4.6 Correlaciones para el coeficiente de trasferencia de calor del lado del Shell..... | 97  |
| Figura 4.7 Correlaciones para el coeficiente de trasferencia de calor del lado del Shell..... | 110 |
| Figura 4.8 Tipo de bombas.....  | 114 |
| Figura 4.9 Rugosidad relativa de los materiales de las tuberia .....                          | 118 |
| Figura 4.10 Coeficientes de resistencia para codos .....                                      | 119 |
| Figura 4.11 Coeficientes de resistencia para válvulas, uniones y acoples.....                 | 120 |
| Figura 4.12 Ubicación del nivel del agua del tanque con respecto a la bomba .....             | 121 |
| Figura 4.13 Compuestos empleados para la simulación del proceso .....                         | 123 |
| Figura 4.14 Declaración de Solido no convencional para los polímeros .....                    | 124 |
| Figura 4.15 Corriente de entrada del Plástico .....   | 125 |
| Figura 4.16 Resultados del segundo condensador para el Poliestireno .....                     | 130 |
| Figura 4.17 Resultados del primer condensador para el Poliestireno .....                      | 130 |
| Figura 4.18 Resultados del primer condensador para el Polietileno de alta densidad .....      | 132 |
| Figura 4.19 Resultados del segundo condensador para el Polietileno de alta densidad .....     | 132 |
| Figura 4.20 Resultados del primer condensador para el Polipropileno .....                     | 134 |
| Figura 4.21 Resultados del primer condensador para el Polipropileno.....                      | 134 |
| Figura 4.22 Planta Piloto de Pirolisis de Polimeros.....                                      | 135 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de PET .....                                     | 14 |
| Tabla 2.2 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de HDPE .....                                    | 17 |
| Tabla 2.3 Propiedades físicas, químicas, térmicas y generales de PVC.....                                    | 20 |
| Tabla 2.4 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de LDPE .....                                    | 22 |
| Tabla 2.5 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de PP .....                                      | 25 |
| Tabla 2.6 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de PS .....                                      | 27 |
| Tabla 2.7 Empresas recicladoras de plástico en la ciudad de La paz .....                                     | 32 |
| Tabla 2.8 Generación de residuos .....   | 33 |
| Tabla 2.9 Composición física ponderada general de la ciudad .....  | 34 |
| Tabla 2.10 Disponibilidad de Poliestireno, Polipropileno y Polietileno de alta densidad .....                | 36 |
| Tabla 2.11 Mecanismo de descomposición térmica de termoplásticos .....                                       | 42 |
| Tabla 3.1 Ranking de Países Productores de petróleo en el mundo .....  | 47 |
| Tabla 3.2 Ranking de Países Exportadores de petróleo en el mundo.....  | 48 |
| Tabla 3.3 Ranking de Países importadores de petróleo en el mundo .....                                       | 49 |
| Tabla 3.4 Volumen comercializado de combustibles en Bolivia (2005 - 2019).....                               | 50 |
| Tabla 3.5 Volúmenes de Producción nacional de refinados de petróleo durante 2005 a 2019.....                 | 53 |
| Tabla 3.6 Volúmenes de importación nacional de combustibles líquidos 2005 a 2019 .....                       | 54 |
| Tabla 3.7 Crecimiento de los volúmenes de importación anuales con respecto al volumen del año anterior ..... | 57 |
| Tabla 4.1 Análisis termogravimétrico de Poliestireno .....   | 61 |
| Tabla 4.2 Análisis termogravimétrico de Polipropileno .....  | 66 |
| Tabla 4.3 Análisis termogravimétrico de Polietileno de alta densidad .....                                   | 69 |
| Tabla 4.4 Tipos de Reactores Químicos en la industria.....   | 73 |
| Tabla 4.5 Análisis termogravimetrico de Poliestireno .....   | 76 |
| Tabla 4.6 Análisis termogravimetrico de Polipropileno .....  | 77 |
| Tabla 4.7 Análisis termogravimetrico de Polietileno de alta densidad .....                                   | 78 |
| Tabla 6.8 Características de Acero inoxidable SA-240-304.....  | 82 |
| Tabla 4.9 Perdida de calores en intercambiadores de calor .....  | 86 |
| Tabla 4.10 Relación de diámetro de tubería externa con interna estándar .....                                | 87 |
| Tabla 4.11 Relación de diámetro de tubería externa con Tube Pitch estándar .....                             | 87 |
| Tabla 4.12 Configuración inicial .....   | 88 |
| Tabla 4.13 Valores de entrada y salida para primer condensador .....   | 88 |
| Tabla 4.14 Propiedades del agua para el primer condensador .....   | 88 |
| Tabla 4.15 Propiedades del gasoil para el primer condensador .....   | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4.16 Relación de fluido de coraza y de tubo para el coeficiente global de transferencia de diseño .....  | 92  |
| Tabla 4.17 Resultados del número de Reynolds en función del número de pasos .....                              | 93  |
| Tabla 4.18 Recuento de tubos de 1 in de OD en 1.25 in Cuadrado Pitch .....                                     | 94  |
| Tabla 4.19 Valores de entrada y salida para primer condensador .....   | 100 |
| Tabla 4.20 Propiedades del agua para el segundo condensador.....   | 100 |
| Tabla 4.21 Propiedades del agua para el segundo condensador.....   | 101 |
| Figura 4.7 Factor de corrección de LMTD para 1-2,4,6.....  | 103 |
| Tabla 4.22 Relación de fluido de coraza y de tubo para el coeficiente global de transferencia de diseño .....  | 104 |
| Tabla 4.23 Resultados del número de Reynolds en función del número de pasos .....                              | 105 |
| Tabla 4.24 Cambio se la configuración inicial del intercambiador para $Re \geq 4000$ .....                     | 106 |
| Tabla 4.25 Recuento de tubos de 1 in de OD en 1.25 in Square Pitch.....  | 107 |
| Tabla 4.26 Variación de la presión atmosférica con respecto a la altura del nivel del mar .....                | 115 |
| Tabla 4.27 Presion de vapor de agua a diferentes temperaturas .....  | 116 |
| Tabla 4.28 Análisis próximo y ultimo de algunos plásticos comunes en los residuos sólidos .....                | 122 |
| Tabla 4.29 Equipos utilizados en la simulación del proceso de pirolisis y especificaciones.....                | 125 |
| Tabla 4.30 Corrientes de Entrada del proceso y especificaciones .....  | 127 |
| Tabla 4.31 Variables de ingreso para la descomposición en átomos del polímero .....                            | 127 |
| Tabla 4.32 Variables de salida para la descomposición en átomos del polímero.....                              | 128 |
| Tabla 4.33 Resultado de las corrientes de salida del Poliestireno después de cada bloque .....                 | 129 |
| Tabla 4.34 Resultado de las corrientes de salida del Polietileno de alta densidad después de cada bloque ..... | 131 |
| Tabla 4.35 Resultado de las corrientes de salida del Polipropileno después de cada bloque .....                | 133 |
| Tabla 4.36 Resultados de parámetros cinéticos .....  | 136 |
| Tabla 4.37 Resultados de cinética y tiempo de reacción .....   | 136 |
| Tabla 4.38 Dimensionamiento del reactor .....  | 136 |
| Tabla 4.39 Resultados característicos del primer condensador.....  | 137 |
| Tabla 4.40 Resultados característicos del segundo condensador .....  | 137 |
| Tabla 4.41 Resultados característicos de las bombas hidráulicas .....  | 138 |
| Tabla 4.42 Resultados de conversión de los polímeros a diésel .....  | 138 |
| Tabla 4.43 Producción de la planta piloto .....  | 138 |
| Tabla 5.1 Costo de Equipos e Implementos necesarios .....  | 139 |
| Tabla 5.2 Inversión del proyecto .....   | 140 |
| Tabla 5.3 Costos por personal de operación de la planta.....   | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 5.4 Costos por materia prima anual .....                             | 141 |
| Tabla 5.5 de la producción de combustible (diésel y gasolina) diario ..... | 141 |
| Tabla 5.6 Ingreso de la producción Anual .....                             | 141 |
| Tabla 5.7 Tabla Flujo Neto de Fondo .....                                  | 142 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO A - CURVA DE TEMPERATURA PARA LOS INTERCAMBIADORES DEL<br>POLIESTIRENO .....                 | 150 |
| ANEXO B - CURVA DE TEMPERATURA PARA LOS INTERCAMBIADORES DEL<br>POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD ..... | 151 |
| ANEXO C - CURVA DE TEMPERATURA PARA LOS INTERCAMBIADORES DEL<br>POLIPROPILENO.....                 | 152 |
| ANEXOS D EQUIPO E IMPLEMENTOS CARACTERÍSTICAS Y PRECIOS .....                                      | 153 |

## SIMBOLOGÍA

|              |  |
|--------------|--|
| SULFANAL:    | Análisis de azufre orgánico                  |
| PROXANAL:    | Análisis próximo                             |
| TGA:         | Análisis termogravimétrico                   |
| ULTANAL:     | Análisis ultimo                              |
| U:           | Coeficiente global de transferencia de calor |
| $\epsilon$ : | Coeficiente de rugosidad                     |
| R:           | Constante de los gases ( 8.3136 J mol /K)    |
| K:           | Constante de velocidad                       |
| OD:          | Diámetro externo                             |
| ID:          | Diámetro interno                             |
| Ea:          | Energía de activación (1/s)                  |
| A:           | Factor pre-exponencial                       |
| °C:          | Grado Celcius                                |
| Nu:          | Numero de Nusselt                            |
| Re:          | Numero de Reynolds                           |
| $P_T$ :      | Numero de Prandtl                            |
| n:           | Orden aparente de reacción                   |
| PVC:         | Policloruro de vinilo                        |
| PP:          | Polipropileno                                |
| PS:          | Poliestireno                                 |
| HDPE:        | Polietileno de alta densidad                 |
| LDPE:        | Polietileno de baja densidad                 |
| TIR:         | Tasa interna de retorno                      |
| PET:         | Teraftalato de Polietileno                   |
| $t_R$ :      | Tiempo de reacción                           |
| VAN:         | Valor actual neto                            |
| $\beta$ :    | Velocidad de calentamiento (K/min)           |

## CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El petróleo y gas natural son la fuente de energía más importante de nuestra sociedad moderna siendo un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo. La importancia del petróleo no ha dejado de crecer desde sus primeras aplicaciones industriales a mediados del siglo XIX, extendiéndose y diversificándose hasta unos límites cotidianos que tan sólo habría que pensar en qué pasaría si de forma repentinamente se acabara, para llegar a la simple conclusión de que se trataría de un verdadero desastre a nivel global del planeta, desde el claro e inminente concepto del transporte por tierra, mar y aire, y afectando a todas las industrias productoras de los subproductos derivados del mismo, base de la sociedad moderna. (Antonio Colino Martínez y Rafael Caro, Fuentes Energéticas, 2010)

A su vez, si hay algo que gran parte de los seres humanos del siglo XXI sabemos, es que el petróleo es un recurso finito. Manejamos en general los conceptos de energías “no renovables” y sabemos que el uso de combustibles fósiles –como el petróleo- contribuyen ampliamente al fenómeno conocido como “efecto invernadero”. Esto está provocando un cambio climático a nivel mundial, que puede llegar a ser muy perjudicial para nuestro planeta. (María Jesús Martínez-Conde, 2018)

En los últimos años ha descendido la disponibilidad mundial de esta materia así también como su costo relativo ha aumentado, lo que abarca la probabilidad de que a mediados del siglo XXI el petróleo ya no pueda usarse de manera comercial de la forma habitual como años atrás. Existen estudios basados en el análisis de reservas de petróleo realizados por Beyond Petroleum los cuales estiman que las reservas que pueden ser recuperadas de manera económicamente factible o con menor precio a comparación de otras fuentes de energía durarían 40 años manteniéndose el ritmo de extracción actual (Beyond Petroleum, 2018)

En Bolivia se llega a generar aproximadamente 7.022 toneladas de basura al día. Donde de este total, sólo recicla el 4%. Según autoridades y expertos, una de las principales razones es la falta de inversión en el manejo de residuos por parte de los municipios. De estos residuos urbanos generados en el país se estima que la materia orgánica son el 60%, plásticos el 13%, papel y

cartón son 7% y lo que no es posible reciclar es 20% En el departamento de La Paz se genera un promedio de 650 a 680 toneladas (Siremu, 2020)

Este proyecto tiene como fin, la evaluación de la generación de combustibles líquidos como diésel a partir de la reutilización y reciclado de productos plásticos reduciendo así el impacto ambiental causado por estos y proporcionándoles un segundo uso.

## **1.2 ANTECEDENTES**

A comienzos de la década de 1940, ante las carencias energéticas que atravesaba España, en el seno del régimen franquista se planteó la posibilidad de producir petróleo sintético. Bajo iniciativa del Instituto Nacional de Industria, en noviembre de 1942 se creó la Empresa Nacional Calvo Sotelo (ENCASO) para producir carburantes y lubricantes. La producción se mantuvo en activo durante varios años, hasta 1966, si bien esta actividad nunca llegaría a ser económicamente rentable. (Andagua,2009)

Actualmente la demanda de Energía y recursos natural a nivel mundial es más alta que en otras épocas y seguirá creciendo con el pasar de los años, se estima que la extracción de recursos ha aumentado a más del triple desde 1970, con un incremento del 45% en el uso de combustibles fósiles (UN Environment Programme, 2019)

A todo esto se suma la contaminación por desechos sólidos urbanos y no urbanos a nivel mundial donde estudios realizados por el Banco Mundial que fueron detallados en un informe denominando “What a Waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050” especifican que es necesario adoptar medidas urgentes debido a un incremento hasta del 70% para el 2050 de los niveles actuales de desechos siendo uno de los más contaminantes los plásticos que afectan el curso de aguas y ecosistemas, tan solo el año 2016 se generaron en el mundo 242 millones de toneladas de desechos plásticos y con el pasar de los años esta cifra va en aumento(Banco Mundial, 2018)

En el intento de amortiguar esta situación varios países a nivel mundial están optando por tecnologías amigables al medio ambiente con resultados bastante positivos

La Tecnología de Pirolisis ofrece una alternativa bastante eficiente y limpia para el tratamiento de residuos plásticos, el cual uno de los objetivos principales para su empleo de este proceso es reducir la contaminación directa. Uno de los primeros estudios en relación a la generación de

combustible mediante reciclado de plástico fue realizado por el empresario japonés akinori Ito quien buscando un proceso para a producción de diésel patentó un equipo compacto denominado “Blest Machine” que permite procesar polietileno poliestireno y polipropileno convirtiendo 1 kilogramo de plástico en 1 kilogramo de combustible utilizando 1 kilovatio de energía (UPSACL, 2015)

La empresa Cynar PLC Green fue empresa de tecnología líder en el mercado de producción de energía a base de residuos realiza investigaciones de este proceso donde ha desarrollado un proceso de tecnología de conversión que convierte varios tipos de residuos plásticos en combustibles líquidos, principalmente diésel. Su primera planta piloto de pirolisis ELPD ubicado en Portlaoise Irlanda y una segunda planta en España. La empresa reporta que dependiendo de la composición y mezcla la tecnología puede llegar a superar un índice de conversión del 90% utilizando como mezcla Polietileno de alta densidad, Polietileno de baja densidad, Polipropileno y Poliestireno. (Businesswire Company, 2012)

Eco creation es una empresa de origen coreano, que utiliza tecnología pirolítica para la obtención de combustibles líquidos con una alimentación de materia prima de plásticos Polipropileno, Poliestireno y Polietileno, de los cuales se a logrado obtener un rendimiento por encima al 80% en la obtención de queroseno y diésel, también una obtención del 3% de gas y un 15% de nafta. La operación que esta empresa utiliza es de tipo batch, con un consumo eléctrico que varía entre 1 a 2 kW/h que abastece para un tiempo de operación de 10 a 12 horas por día, la temperatura de Pirolisis varías de 380 °C a 480 °C a condiciones de ausencia de oxígeno y presión atmosférica, la capacidad de procesamiento de su planta es de 100 toneladas por día, con un reactor batch de pirolisis. (Eco Creation, 2016)

La compañía PK Clean fundada por Priyanka Bakaya con sede en Utah, utiliza la tecnología de Pirólisis catalítica haciendo énfasis en los plásticos a su vez dispone de una planta piloto en Pune, India para realizar pruebas convirtiendo 10 toneladas de plástico en 60 barriles de combustible al día con cero emisiones tóxicas. Actualmente las empresas PK Clean technologies y sustane technologies se encuentran asociadas en la elaboración de una planta de diésel sintético en Nueva Escocia, Canadá donde se tiene planeado procesar 70000 toneladas de residuos sólidos, se estima que podrá producir aproximadamente 832142 galones de combustible sintético al año (PK Clean Technology, 2017)

La empresa Plastic2oil de origen estadounidense utiliza como materia prima polietilenos y polipropilenos no lavado. Tiene una planta con una capacidad de producción de 1.8 toneladas de materia prima por hora, reporta una conversión de desechos plásticos en combustibles líquidos del 86% transformando 1 litro de combustible a partir de 1.2 kilogramos de residuos plásticos. (Plastic2Oil, 2016)

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Una de las situaciones más preocupantes que va en incremento con el pasar de los años es la contaminación ambiental que perturba y destruye los ecosistemas tanto de flora como fauna, donde una de las causas principales es el deficiente manejo de residuos o desechos ya sea urbanos o proveniente de otra índole.

Los residuos o desechos sólidos en nuestro país son uno de los problemas más relevantes, pero también con menos propuestas de solución. En la ciudad de La Paz uno de los eventos que sacó a la luz este problema fue el deslizamiento en el relleno sanitario de Alpacoma sucedida en 2019, esto nos da una idea de la necesidad que tenemos por incorporar nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente de manejo de desechos, así también el reciclaje y la reutilización de ciertos productos con potencial energético en estos desechos sólidos.

Los combustibles fósiles que actualmente son la fuente de energía más utilizada a nivel mundial, el cual alcanza numerosas cifras de producción anual tiene un gran impacto ambiental, causando afectaciones como alteraciones a las propiedades del agua o formación de componentes contaminantes así también como alteración en la calidad del aire por la emisión de gases dañinos. Pero aun con estos antecedentes la necesidad de energía aumenta, cada año la demanda de combustibles como el diésel se incrementa en nuestro país el cual nos vuelve dependientes la importación de diésel de Argentina, Chile y Rusia, que son los principales países que abastecen el mercado de Bolivia al no poder cubrir la demanda nacional.

#### **1.3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Con el constante incremento en la subvención a los costos de importación de diésel debido a la demanda de dicho combustible y el problema de una mala gestión de desechos plásticos se ve necesario evaluar el potencial energético de estos últimos para poder responder la pregunta: ¿La

obtención de diésel a partir de desechos plásticos mediante el proceso de Pirólisis es viable y factible?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Realizar una evaluación de la Pirólisis de desechos plásticos para la obtención de diésel en la ciudad de La Paz

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Estimar el porcentaje de plástico que corresponde a los desechos sólidos de la ciudad de La Paz
- ✓ Realizar un análisis de la situación actual de la importación de Diésel que realiza el país
- ✓ Comprender los fundamentos teóricos del proceso de Pirólisis y la tecnología asociada
- ✓ Determinar el rendimiento de conversión del proceso de Pirólisis mediante simulación
- ✓ Analizar técnica y económicamente del proceso de producción de diésel por pirolisis

## **1.5 JUSTIFICACIÓN**

La contaminación del medio ambiente y la necesidad de energía a llevado a muchos países a nivel mundial a descubrir y utilizar nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente generando así combustibles de una manera alterna, factible y limpia obtenido de materia orgánica, reciclado de desechos etc.

### **1.5.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA**

El estudio de la tecnología de Pirólisis nos permite un análisis de funcionalidad de un proceso factible con casi nulas emisiones de CO<sub>2</sub> y que produce una generación alterna a la manera convencional de la producción de Diésel siendo también una tecnología muy útil para la gestión o manejo de desechos sólidos, dando paso al reciclaje de desechos que presentan un alto potencial energético. La Pirolisis es utilizada en países como España, Irladia, Estados Unidos y en nuestro país aportaría al crecimiento tecnológico abriéndonos las puertas a nuevas tecnologías en cuanto a energía sustentable y renovable

Los procesos de reciclaje de residuos ya sean catalíticos o térmicos, son bastante atractivos debido a que producen combustibles de calidad que pueden ser utilizados para la industria. La

Pirolisis nos permite refinar desechos plásticos en hidrocarburos líquidos de gran valor energético para luego ser comercializados

### **1.5.2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA**

Nos permite una disminución en los costos que comprende la importación de diésel que nos permiten cubrir la demanda de interna del país, haciéndonos menos dependientes y más autosustentables. También generaremos una disminución en la subvención que realiza el estado al costo de los combustibles, debido al incremento de disponibilidad de este combustible en el sector de transporte proporcionándoles un diésel sintético de alta calidad

Con esto se podría generar múltiples fuentes de trabajo que comprenderían en la operación de la planta, así también en el área de gestión de residuos sólidos, manejo de la basura, la recolección y el reciclaje de distintos tipos de desechos, reduciendo así un porcentaje en el desempleo de nuestro país

### **1.5.3 JUSTIFICACIÓN SOCIAL**

Se lograría generar diferentes fuentes de trabajo indirectos y directos en distintas áreas lo que conlleva a sueldos a su personal y beneficios sociales a ellos y a sus familias, además de brindarles conocimientos técnicos por capacitaciones al personal. A su vez impulsaría a la fundación de empresas de recolección y separación de desechos solidos

Permitiría una disminución de enfermedades provocadas por desechos sólidos. El mal manejo y amontonamiento de desechos no solo afean el entorno, sino que además atraen plagas y se convierten en caldo de cultivo para la propagación de enfermedades gastrointestinales, respiratorias y de la piel

Permitiría la incorporación de un mejor sistema de manejo de basura o desechos impulsando el reciclaje y evitando la sobre acumulación de residuos en rellenos sanitarios evitando así posibles deslizamientos

Al reducir la subvención que el gobierno realiza a los combustibles, se recuperaría el costo que conlleva esto para poder invertir ese ingreso para otro fin. Esto generaría un impacto positivo en la sociedad por la disminución de productos que el estado subvenciona

#### **1.5.4 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL**

Produciría una notable disminución en la contaminación de los suelos en los que se encuentra involucrado flora y fauna evitando la destrucción de ecosistemas debido a que sabemos que los plásticos logran degradarse en miles de años estos podrían obstruir y contaminar los lagos y ríos y en la zona urbana el amontonamiento de basura o desechos sólidos atrae plagas

Implementación de mejores sistemas manejo de residuos sólidos separando todos aquellos productos con los que se puede obtener diésel y reduciendo el método convencional para la generación de combustibles mediante la extracción de petróleo donde se realizan perforaciones y daños a los suelos contaminando los acuíferos naturales que podemos encontrar en el interior de la tierra causando la contaminación de la flora e indirectamente a la fauna

#### **1.6 ALCANCE**

##### **1.6.1 ALCANCE TEMÁTICO**

El presente Proyecto de Grado se encuentra comprendido en el área de Petroquímica y Control Ambiental dentro de la Industria Petrolera, para cumplir con el objetivo general se realizará lo siguiente, un análisis de la materia prima y su procedencia, un análisis de la demanda de diésel en el país, un análisis del proceso mediante simulador, análisis de cálculo de diseño de equipos

## **CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 COMBUSTIBLES SINTÉTICOS**

#### **2.1.1 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA A LO LARGO DE LA HISTORIA**

Desde el uso del fuego hasta desarrollar energías renovables la humanidad es consciente de la necesidad de energía para poder vivir. El uso del fuego como fuente de energía que fue el punto de partida hace un millón de años con su descubrimiento. Fueron necesarios varios miles de años para que el hombre lograra utilizar el fuego adecuadamente para calentarse o defenderse en el medio ambiente en el que habitaba.

Pasando a la era Neolítica, los seres humanos ya tenían conocimiento en el cultivo de plantas y aprendieron a domesticar animales, por lo que esto les permitió abandonar la vida nómada, posteriormente la alfarería y metalurgia que involucraban la energía por combustión de la madera y carbón vegetal. La invención de la rueda y la vela en 3500 a.c. permitió la facilidad para el transporte por mar y tierra utilizando la fuerza animal y la energía del viento.

Durante la Edad media el ser humano ya utilizaba la energía proveniente de los molinos hidráulicos y de viento en sus actividades también el uso de carbón como energía por combustión se hizo más frecuente. Al finalizar la edad media el descubrimiento de la pólvora de gran poder destructivo por medio de la que desprende al utilizarlo energía química

Durante los siglos XVII y XVIII que se llevaron a cabo importantes progresos en la física y química dando como resultado el desarrollo de la máquina de vapor que fue un gran salto tecnológico que dio como resultado en inicio en la aplicación de transporte marítimo y ferrocarril (National Geographic, medio ambiente y combustibles)

El siglo XIX fue el inicio del protagonismo de los combustibles fósiles como fuente de energía, además que a finales de este siglo Nikolaus August Otto llegaría a inventar el motor de combustión interna, lo que causo un masivo incremento en la demanda del petróleo el cual superaría al carbón. Por otra parte, gracias al conocimiento que se tenía sobre Electricidad y electromagnetismo fue posible la transformación de energía eléctrica en mecánica, lo que abrió la puerta a los motores de corriente eléctrica continua y después alterna.

Así también, durante el inicio del XX se produjo un importante descubrimiento que fue la Energía Nuclear, donde se tuvo la primera fisión artificial del átomo de Uranio en 1938

desarrollada por Otto Hahn y después de cuatro años se construiría el primer reactor nuclear a cargo de Enrico Fermi. (National Geographic, medio ambiente y combustibles)

Durante el final del siglo XX y principio del siglo XXI inicio la preocupación a nivel mundial por la contaminación y problemas del cambio climático, pero también un gran incremento en la demanda energética, el ser humano necesita más y más energía con el pasar de los años los que nos obliga a buscar la manera de generar energía y que a su vez sea menos contaminante.

### **2.1.2 ORIGEN DE LOS COMBUSTIBLES SINTÉTICOS**

Durante la década de 1930 en España se realizaron algunos avances sobre combustibles producidos de manera sintética y no de manera convencional. La Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya (SMMP), una empresa de capital francés, llegó a producir petróleo de forma sintética a través de la destilación de pizarras bituminosas en una planta situada en Puertollano. Con una producción anual de 8.700 toneladas de petróleo, la SMMP llegó a obtener en su momento unos cuatro millones de litros de gasolina, 400.000 litros de lubricantes y unas 1.300 toneladas de asfaltos. Destaca también el caso del científico Rafael Suñén, que investigó en Francia y en Zaragoza adaptaciones a las materias primas disponibles en España. Suñén, sin embargo, desapareció tras el estallido de la Guerra Civil y su proyecto terminó cayendo en saco roto. (Andagua,2009)

A comienzos de la década de 1940, ante las carencias energéticas que atravesaba España, en el seno del régimen franquista se planteó la posibilidad de producir petróleo sintético. Bajo iniciativa del Instituto Nacional de Industria, en noviembre de 1942 se creó la Empresa Nacional Calvo Sotelo (ENCASO) para producir carburantes y lubricantes. El plan tomaba como base la experiencia de la Alemania nazi en este campo, contándose también con la asistencia de la tecnología germana para el desarrollo del proyecto español. Sin embargo, las dificultades económicas que arrastraba España y la derrota alemana en la Segunda Guerra Mundial lastraron el desarrollo del proyecto. Aquella situación forzó que se abandonara la idea de obtener petróleo a través de lignito, apostándose por la producción de lubricantes a través del destilado de pizarras bituminosas. Se levantó una planta de destilería en Puertollano que empezaría a funcionar en 1956. ENCASO comercializó una marca de lubricantes propia y con los años también elaboró olefinas en Puertollano. La producción se mantuvo en activo durante varios

años, hasta 1966, si bien esta actividad nunca llegaría a ser económicamente rentable. (Andagua,2009)

### **2.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS**

#### **2.1.3.1 VENTAJAS DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS**

La producción y uso de combustibles sintéticos presenta numerosos beneficios con respecto al uso de combustibles fósiles.

- El diésel sintético casi no presenta composición de azufre, lo que lo transforma en una alternativa mucho más limpia reduciendo significativamente la emisión de gases sulfurados como el dióxido de azufre  $SO_2$ , que es uno de los gases causantes del efecto invernadero .
- No son necesarias modificaciones en su forma de almacenamiento, distribución ni venta del combustible sintético debido a que presenta características de almacenaje similares al combustible convencional
- La producción de este tipo de combustible contempla la reutilización y reciclaje de residuos inorgánicos de largo periodo de degradación que afectan al medio ambiente y ecosistemas. Además de reducir espacios en rellenos sanitarios.

#### **2.1.3.2 DESVENTAJAS DE COMBUSTIBLES SINTÉTICOS**

Los combustibles sintéticos, a pesar de las mejoras que conlleva su uso en motores de combustión interna, presenta algunas desventajas que no se pueden despreciar, tanto en su uso final, como en el proceso de fabricación

- altas temperaturas que son necesarias para generar los productos combustibles deseados en el proceso.
- Los combustibles sintéticos son un producto nuevo, que se encuentra en una etapa de evaluación ni el potencial de mercado en comparación con el combustible convencional.
- El volumen de producción de combustibles sintéticos depende directamente de la materia prima que se pretende utilizar en el proceso.

## **2.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA**

### **2.2.1 TEORÍA DE PLÁSTICOS**

Los plásticos son compuestos orgánicos que son generados a partir de moléculas más simples o monómeros de hidrocarburos que son obtenidos del petróleo y gas. Estos polímeros son grandes agrupaciones de monómeros que por medio de un proceso químico denominado polimerización formando largas cadenas macromoleculares que generalmente contienen en su estructura carbono, hidrogeno, nitrógeno, oxígeno, cloro, flúor y bromo.

Los plásticos son el tipo de material necesario que proporcionan el balance necesario de propiedades que no pueden lograrse por otros materiales, por ejemplo: poco peso, color resistencia a la degradación ambiental y biológica, el inicio de la producción de plástico data de 1869 cuando se creó el celuloide que después en 1884 dio origen a la película fotográfica, pero industria del plástico dio su inicio en el siglo XX. El crecimiento de desarrollo, aplicaciones y el impacto social y económico e incluso impacto ambiental a tenido un su máximo en estos últimos años. (MAVDT, 2004)

Los plásticos son materiales que cada vez tienen mayor impacto desde décadas atrás a nivel mundial, pues su gran versatilidad ha permitido que sea un recurso económico y fácil de usar industrialmente para diferentes aplicaciones. La industria de alimentos ha aprovechado este material para el empaque de sus productos, por lo que se ha aumentado su producción y, por ende, ha incrementado la cantidad de desechos sólidos plásticos como consecuencia del corto tiempo de vida útil que tienen, ya que dejan de cumplir su función una vez llegan al consumidor, tras este punto se convierten en contaminantes debido a su tardía descomposición.

#### **2.2.1.1 TIPOS DE PLÁSTICOS**

Según su estructura molecular, densidad y forma de polimerización, los plásticos tienen diferentes propiedades entre sí; en algunos casos puede ocurrir que dos polímeros tengan la misma estructura molecular, pero sus características sean diferentes debido al grado de compactación entre las cadenas. Por ejemplo, el polietileno está conformado por varias moléculas de etileno, sin embargo, puede ser de alta o baja densidad, de tal manera que mientras el primero tiene alta resistencia química y mecánica, el segundo es flexible y tiene baja resistencia mecánica. Las propiedades de cada polímero permiten seleccionar el material óptimo

para un proceso en específico según las características que se requieran. Además, gracias a la variedad de polímeros que existen, las aplicaciones con estos materiales son bastante amplias.

**Figura 2.1 Código de identificación de resinas de plástico**



Fuente: Tecnología de los plásticos blog, 2011

#### **2.2.1.1.1 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

El PET es compuesto aromático que pertenece al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres. Su denominación técnica es Tereftalato de Polietileno o politereftalato de etileno y forma parte del grupo de los termoplásticos, razón por la cual es posible reciclarlo.

Este polímero fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Se debe recordar que su país estaba en plena guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Recién a partir de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de film para el embasamiento de alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976; pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para el embotellado de bebidas carbonatadas.

El PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y los de mayor peso molecular, grado ingeniería. Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas. Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos. (K. Mulder and M. Knot, 2001)

Su fórmula general es:



## APLICACIONES

### a) Envase y empaque

Por su impermeabilidad a los gases, el PET abarca casi el 100% del mercado de botellas retornables y no retornables para bebidas carbonatadas debido a su durabilidad, estabilidad dimensional e insensibilidad a la humedad excelentes y también de empaques de alimentos pues, no deteriora ni causa efectos de toxicidad a estos productos. Se encuentra PET para este mercado en los siguientes productos.

- Bebidas carbonatadas
- Agua
- Aceite
- Conservas
- Cosméticos
- Detergentes
- productos químicos
- Productos farmacéuticos

### b) Electro-electrónico

Debido a su alta resistencia dieléctrica y mecánica, el PET se encuentra para este mercado en los siguientes productos

- aislante de ranuras y fases en motores,
- condensadores, bobinas y transformadores
- conectores eléctricos de alta densidad

c) Fibras (telas tejidas, cordeles, etc.)

En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir, debido a su resistencia, baja elongación y alta tenacidad. Se encuentra PET para este mercado en los siguientes productos:

- Ropas que contengan poliéster,
- partes para cinturones,
- hilos de costura
- refuerzo de llantas
- refuerzos de manguera
- cerdas de brocha para pintura e cepillos industriales

**Tabla 2.1 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de PET**

| PROPIEDADES FÍSICAS Y GENERALES                        |                 |
|--|-----------------|
| Absorción del agua – equilibrio %                      | <0,7            |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )                          | 1,3 – 1,4       |
| Inflamabilidad   | Auto extingible |
| Reciclabilidad   | Es reciclable   |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                                   |                 |
| Calor específico (KJ/Kg K)                             | 1,2 – 1,35      |
| Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>6</sup> /K) | 20 – 80         |
| Conductividad térmica ( 1/Wm K)                        | 0,15 – 0,4      |
| Temperatura máxima de utilización (°C)                 | 115 – 170       |
| Temperatura mínima de utilización (°C)                 | 60 – 70         |
| Temperatura de fusión (°C)                             | 212 –265        |
| RESISTENCIAS QUÍMICAS                                  |                 |
| Ácidos concentrados                                    | Buena           |
| Álcalis  | Mala            |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| Alcoholes                | Buena     |
| Grasas y aceites         | Buena     |
| Halógenos                | Buena     |
| Hidrocarburos Aromáticos | Aceptable |

Fuente: Cmematerials, Universidad de Barcelona

### 2.2.1.1.2 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

El polietileno (PE) es un polímero resultado de la polimerización del etileno. Es posiblemente el plástico más popular del mundo. El polietileno de alta densidad (HDPE) se produce normalmente con un peso molecular que se encuentra en el rango entre 200.000 y 500.000, pero puede ser mayor. Es un polímero de cadena lineal no ramificada. Es más duro, fuerte y un poco más pesado que el de baja densidad, pero es menos dúctil. El polietileno con peso molecular entre 3.000.000 y 6.000.000 es el que se denomina UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene). Con este material se producen fibras, tan fuertes, que pueden utilizarse para fabricar chalecos a prueba de balas. (T.P. Chang, 2005)

El polietileno fue descubierto por químicos británicos en 1933. Las primeras aplicaciones del polietileno se basaron en sus excelentes propiedades eléctricas, y hasta el año 1945 su uso como aislante en los cables submarinos y otras formas de recubrimiento de conductores absorbió la mayor parte del material fabricado. Hasta el año 1949 se pensaba, en los medios de la especialidad, que el etileno solamente se podía polimerizar a alta presión. Entonces encontró el profesor Karl Ziegler, en los años 1949-1955, un camino completamente nuevo para la obtención del polietileno a la presión normal.

Su fórmula general es:



### APLICACIONES

#### a) Envases

El polietileno de alta densidad debido a su ligereza de peso, transparencia, resistencia a la rotura, manejabilidad, seguridad de uso y fundamentalmente en la versatilidad en cuanto a novedad de

diseño, Destaca principalmente sobre este mercado encontrándose principalmente en envases diseñados para productos de consumo diario

- Envases de Detergentes, limpiadores, jabones líquidos, shampoo, etc.
- Envases de productos lácteos en general (leche, yogurt, mantequilla, quesos, etc.)
- Envases de pegamentos, combustibles, alcoholes, ceras
- Envases de pintura, tinta
- Envase de fertilizantes

#### b) Empaque

El polietileno de alta densidad debido a sus características de ser una materia flexible, transparente, resistente y químicamente inerte convirtiéndose en una de las mejores alternativas para la fabricación de empaques

- bolsas y láminas para evitar la contaminación y proteger el producto o el material recubierto por este.
- Las láminas de Polietileno de alta densidad sirven para empacar y recubrir otros materiales como papel, cartón, aluminio, embalaje, sobres para correo y cubiertas de libros.

#### c) Industria Eléctrica

Su principal aplicación en este mercado es de aislante de cable por el bajo coeficiente de conductividad eléctrica que posee

#### d) Mercado de tuberías

Las tuberías Polietileno de Alta Densidad Alta masa molecular se encuentran en el mercado en forma lisa o corrugada con excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas utilizadas principalmente en:

- Conexiones de agua y alcantarillado
- Cableado eléctrico
- Minería
- Desechos industriales

**Tabla 2.2 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de HDPE**

| PROPIEDADES FÍSICAS Y GENERALES                        |                   |
|--|-------------------|
| Absorción del agua – equilibrio %                      | <0,5              |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )                          | 0,941 –0,965      |
| Inflamabilidad   | Auto extinguiible |
| Reciclabilidad   | Es reciclable     |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                                   |                   |
| Calor específico (KJ/Kg K)                             | 1,9               |
| Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>6</sup> /K) | 100 – 200         |
| Conductividad térmica ( 1/Wm K)                        | 0,15 – 0,4        |
| Temperatura máxima de utilización (°C)                 | 113 – 129         |
| Temperatura mínima de utilización (°C)                 | 82 – 72           |
| Temperatura de fusión (°C)                             | 130 –137          |
| RESISTENCIAS QUÍMICAS                                  |                   |
| Ácidos concentrados                                    | Buena             |
| Álcalis  | Buena             |
| Alcoholes  | Buena             |
| Grasas y aceites                                       | Aceptable         |
| Halógenos  | Mala              |
| Hidrocarburos Aromáticos                               | Aceptable         |

Fuente: Cmematerials, Universidad de Barcelona

### 2.2.1.1.3 POLICLORURO DE VINILO (PVC)

El PVC es un polímero vinílico. Es similar al polietileno, con la diferencia que cada dos átomos de carbono, uno de los átomos de hidrógeno está sustituido por un átomo de cloro. Es producido por medio de una polimerización por radicales libres del cloruro de vinilo. El policloruro de vinilo está entre los primeros plásticos descubiertos por el ser humano y también es uno de los más utilizados, pero también se considera muy difícil de reciclar. La razón de esta preferencia de la que goza es que se caracteriza por ser ligero y a la vez muy resistente, es extremadamente duradero, tiene alta resistencia al fuego, permeabilidad baja y alta propiedad aislante. (T.P. Chang, 2005)

El PVC fue uno de esos curiosos descubrimientos que tuvo que ser realizado dos veces. en 1912 un químico alemán, Fritz Klatte, hizo reaccionar un poco de acetileno con ácido clorhídrico (HCl). Esta reacción produce cloruro de vinilo, pero en aquella época nadie sabía qué hacer con él, así que lo dejó en un estante donde con el tiempo, se polimerizó. Sin saber qué hacer con el PVC que él acababa de inventar, Nunca imaginaron un uso para el PVC y en 1925 su patente expiró. En 1926, justamente al año siguiente, un químico norteamericano, Waldo Semon, trabajaba en B.F. Goodrich cuando independientemente inventó el PVC. Pero a diferencia de los químicos anteriores, cayó en la cuenta que este nuevo material haría una perfecta cortina para baño entonces, el PVC fue patentado en los Estados Unidos. Luego siguieron toneladas de nuevas aplicaciones para este material impermeable maravilloso y en esta segunda vez, el PVC fue un gran éxito.

Su fórmula general es:



### Aplicaciones del PVC

El PVC presenta buenas propiedades eléctricas y de aislamiento sobre un amplio rango de temperaturas. Excelente durabilidad y tiene aproximadamente una vida útil de 40 o más años. Características de procesamiento fáciles para obtener las especificaciones deseadas del producto final y resistente a ambientes agresivos.

#### a) Usos del PVC en la construcción

- Aislamiento de cables y alambres
- Marcos de puertas y ventanas
- Ductos y tuberías
- Membranas de revestimiento y de techados
- Tapices de paredes
- Suelo
- Losetas
- Perfilaría

## b) Juguetes

Muchos juguetes de diferentes tipos son hechos de PVC como:

- Muñecas
- Patos de baño
- Juguetes playeros inflables
- Piscinas para niños
- Pelotas
- Algunos artículos para el cuidado del bebé

## c) Usos Generales

- Agricultura: tuberías para riego, mangueras, película para invernadero y almacenamiento de agua.
- Mobiliario: muebles para casa habitación, oficina y jardín.
- Calzado: zapatos, suelas para tenis, botas para jardín e industriales, sandalias.
- Tarjetas de crédito.
- Tapicería: para muebles, bolsas, maletas, carteras, lonas, impermeables, tapiz para muros.
- Película para anuncios publicitarios.
- Señalamientos viales.
- Álbumes fotográficos.
- Cortinas para baño.
- Mantelería.
- Película para forros de libros.
- Pasillos plásticos para alfombras.
- Persianas

**Tabla 2.3 Propiedades físicas, químicas, térmicas y generales de PVC**

| PROPIEDADES FÍSICAS Y GENERALES                        |               |
|--|---------------|
| Absorción del agua – equilibrio %                      |               |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )                          | 1,3 – 1,58    |
| Inflamabilidad   | Inflamable    |
| Reciclabilidad   | Es reciclable |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                                   |               |
| Calor específico (KJ/Kg K)                             | 1,9           |
| Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>6</sup> /K) | 75 – 100      |
| Conductividad térmica ( 1/Wm K)                        | 0,12 – 0,25   |
| Temperatura máxima de utilización (°C)                 | 60 – 70       |
| Temperatura mínima de utilización (°C)                 | 123 – 73,2    |
| Temperatura de fusión (°C)                             | 75 –105       |
| RESISTENCIAS QUÍMICAS                                  |               |
| Ácidos concentrados                                    | Buena         |
| Álcalis  | Buena         |
| Alcoholes  | Buena         |
| Grasas y aceites                                       | Buena         |
| Halógenos  |               |
| Hidrocarburos Aromáticos                               | Aceptable     |

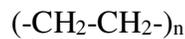
**Fuente:** Cmmaterials, Universidad de Barcelona

#### **2.2.1.1.4 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)**

El polietileno es un polímero vinílico obtenido a partir del monómero etileno. Es el plástico más popular del mundo. Una molécula del polietileno es una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono. Pero propiamente el polietileno de baja densidad en su estructura que presenta carbonos que en vez de tener enlaces con hidrógenos tienen asociadas largas cadenas de polietileno, presentando una estructura ramificada o polietileno ramificado. El polietileno de baja densidad (LDPE), es más barato y más fácil de hacer. (K. Mulder and M. Knot, 2001)

El Polietileno de baja densidad fue obtenido accidentalmente por los estudios de alta presión del etileno que Michaels realizó en Ámsterdam. Este descubrimiento lo aprovechó Gibson para producir Polietileno, a partir de una mezcla de etileno y benzaldehído. En 1935, en Inglaterra, los químicos e ingenieros W. Faucett, G. Paton, W. Perrin y G. Williams, polimerizaron etileno utilizando altas presiones y temperaturas.

Su fórmula general es:



Aplicaciones:

a) Empaque

El polietileno de baja densidad tiene características de ser una materia flexible, resistente y químicamente inerte convirtiéndose en una de las mejores alternativas para la fabricación de bolsas. Podemos encontrar varios tipos de bolsas fabricadas a partir de polietileno de baja densidad destacando los que se utilizan en elementos para publicidad

b) Elementos Diversos

- Entre los elementos diversos en los que podemos encontrar LDPE
- piezas para juguetes,
- tapas para envases de productos
- envases de alta resistencia usados en laboratorios químicos y biológicos, etc.
- Fabricación de utensilios desechables como platos, vasos y cubiertos.

c) Industria Eléctrica

El LDPE tiene grandes características aislantes porque al igual que HDPE este presenta un bajo coeficiente de conductividad eléctrica y buena resistencia química. Los cables encargados de la conducción de la energía eléctrica se recubren con materiales plásticos que les sirven de aislamiento eléctrico y de protección contra la corrosión y los agentes externos

d) Recubrimiento de Película

Las películas de LDPE se usan como

- recubrimiento de acequias y canales de agricultura,
- para el envasado automático de alimentos y productos industriales (leche, agua, plásticos, etc.)
- base para pañales desechables.
- Películas para procesos de empaque y embalaje.

**Tabla 2.4 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de LDPE**

| PROPIEDADES FÍSICAS Y GENERALES                        |               |
|--|---------------|
| Absorción del agua – equilibrio %                      | <0,015        |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )                          | 0,917 – 0,932 |
| Inflamabilidad   | Inflamable    |
| Reciclabilidad   | Es reciclable |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                                   |               |
| Calor específico (KJ/Kg K)                             | 1,9           |
| Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>6</sup> /K) | 100 – 200     |
| Conductividad térmica ( 1/Wm K)                        | 0,322 – 0,348 |
| Temperatura máxima de utilización (°C)                 | 50 – 90       |
| Temperatura mínima de utilización (°C)                 | 60            |
| Temperatura de fusión (°C)                             | 98 –115       |
| RESISTENCIAS QUÍMICAS                                  |               |
| Ácidos concentrados                                    | Aceptable     |
| Álcalis  | Buena         |
| Alcoholes  | Buena         |
| Grasas y aceites                                       | Mala          |
| Halógenos  | Mala          |
| Hidrocarburos Aromáticos                               | Aceptable     |

Fuente: Cmematerials, Universidad de Barcelona

### 2.2.1.1.5 POLIPROPILENO (PP)

Es un termoplástico que reúne una serie de propiedades que es difícil encontrar en otro material como su alta estabilidad térmica. Estructuralmente es un polímero vinílico, similar al polietileno, sólo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo. Cada dos átomos de carbono de esta cadena principal, se encuentra ramificado un grupo metilo (CH<sub>3</sub>). Esto permite distinguir tres formas isómeras del polipropileno. (T.P. Chang, 2005)

En 1954 el italiano G. Natta, siguiendo los trabajos elaborados por K. Ziegler en Alemania, logró obtener polipropileno de estructura muy regular denominado isotáctico. Su comercialización en Europa y Norteamérica se inició rápidamente en 1957, en aplicaciones para enseres domésticos. Los trabajos de Natta y Ziegler que permitieron conseguir polímeros de etileno a partir de las olefinas, abrieron el camino para la obtención de otros polímeros. Este plástico, también con una estructura semicristalina, superaba en propiedades mecánicas al polietileno, su densidad era la más baja de todos los plásticos, y su precio también era muy bajo, pero tenía una gran sensibilidad al frío, y a la luz ultravioleta, lo que le hacía envejecer rápidamente. Por este motivo su uso se vio reducido a unas pocas aplicaciones. Pero el descubrimiento de nuevos estabilizantes a la luz, y la mayor resistencia al frío conseguida con la polimerización propileno-etileno, y la facilidad del PP a admitir cargas reforzantes, fibra de vidrio, talco, amianto y el bajo precio de dieron gran auge a la utilización de este material.

Su fórmula general es:



#### APLICACIONES

a) Industria alimentaria y producción de envases, donde se utiliza polipropileno, entre otros, para la producción de:

- Envases y botes
- artículos para el hogar
- alfombras
- algunos juguetes

b) industria química y farmacéutica, en particular la producción de tuberías y conductos para la transmisión de agua y medios químicamente agresivos. Además, el PP también se utiliza para producir

- recipientes de laboratorio,
- filtros, accesorios médicos y equipos de diagnóstico,
- recipientes y jeringas desechables.

c) producción de maletas, contenedores, cubos y tanques pequeños, por ejemplo,

- plantas de tratamiento
- aguas residuales domésticas,

d) industria textil, el Polipropileno es muy utilizado en la elaboración de

- alfombras,
- tapetes,
- tejidos,
- fibras sintéticas
- herramientas,

e) industria del mueble y la construcción, por ejemplo,

- aislamiento de estructuras de edificios
- accesorios de baño
- cables en instalaciones de gas y calefacción central
- producción de muebles y accesorios para muebles

f) industria del automóvil, en particular la producción de:

- partes de carrocería,
- parachoques,
- elementos de espejos
- accesorios de cabina.

**Tabla 2.5 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de PP**

| PROPIEDADES FÍSICAS Y GENERALES                        |               |
|--|---------------|
| Absorción del agua – equilibrio %                      | <0,03         |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )                          | 0,89 – 0,91   |
| Inflamabilidad   | Combustible   |
| Reciclabilidad   | Es reciclable |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                                   |               |
| Calor específico (KJ/Kg k)                             | 1,7 –1,9      |
| Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>6</sup> /K) | 100 – 180     |
| Conductividad térmica ( 1/Wm K)                        | 0,1 – 0,22    |
| Temperatura máxima de utilización (°C)                 | 90 – 120      |
| Temperatura mínima de utilización (°C)                 | 10 a 60       |
| Temperatura de fusión (°C)                             | 150 –175      |
| RESISTENCIAS QUÍMICAS                                  |               |
| Ácidos concentrados                                    | Buena         |
| Álcalis  | Buena         |
| Alcoholes  | Buena         |
| Grasas y aceites                                       | Buena         |
| Halógenos  | Mala          |
| Hidrocarburos Aromáticos                               | Buena         |

Fuente: Cmematerials, Universidad de Barcelona

#### 2.2.1.1.6 POLIESTIRENO (PS)

El poliestireno es un plástico económico y resistente y probablemente sólo el polietileno sea más común en su vida diaria. es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero. . (T.P. Chang, 2005)

El poliestireno fue obtenido por primera vez en Alemania por la Farbenindustrie A. G. (hoy BASF), en el año 1930. En ese mismo año la empresa inicia la producción industrial de poliestireno instalando una planta para producir 100 ton/año. El primer poliestireno de uso general se introdujo comercialmente en los Estados Unidos en el año 1938 y el primero de alto

impacto en el año 1948. Durante la 2da Guerra Mundial se realizaron injertos de estireno en polibutadieno, obteniéndose un hule sintético para sustituir al caucho natural debido a su escasez.

Su fórmula general es:



## APLICACIONES

a) El poliestireno en los electrodomésticos

- Refrigeradores,
- Aires acondicionados,
- hornos y horno de microondas,
- aspiradoras,
- licuadoras

b) El poliestireno en la industria automotriz se usa para fabricar muchas autopartes como

- perillas,
- paneles de instrumentos,
- molduras,
- paneles de absorción de energía para puertas
- espuma para mitigar el ruido.

c) El poliestireno en el sector de los servicios de alimentos

El envasado para el servicio de alimentos de poliestireno suele ser mejor aislante, mantiene los alimentos frescos por más tiempo y cuesta menos que las otras alternativas.

d) El poliestireno en el sector médico

Dada su transparencia y fácil esterilización, el poliestireno se usa en una amplia gama de aplicaciones médicas como:

- bandejas para cultivos

- tubos de ensayo
- platos de Petri
- componentes de diagnóstico
- carcasas para equipamiento para pruebas y dispositivos médicos.

e) El poliestireno en los dispositivos electrónicos

El poliestireno se usa para las carcasas y otras partes componentes de los televisores, computadores y todo tipo de equipamiento de TI, donde es esencial una combinación de forma, función y estética.

**Tabla 2.6 Propiedades físicas químicas térmicas y generales de PS**

| PROPIEDADES FÍSICAS Y GENERALES                        |               |
|--|---------------|
| Absorción del agua – equilibrio %                      |               |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )                          | 1,04 – 1,05   |
| Inflamabilidad   | 1,04          |
| Reciclabilidad   | Es reciclable |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                                   |               |
| Calor específico (KJ/Kg k)                             | 1,7 –1,9      |
| Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>6</sup> /K) | 50 – 83       |
| Conductividad térmica ( 1/Wm K)                        | 0,121 – 0,131 |
| Temperatura máxima de utilización (°C)                 | 77 – 103      |
| Temperatura mínima de utilización (°C)                 | 123 a 74      |
| Temperatura de fusión (°C)                             | 150 –243      |
| RESISTENCIAS QUÍMICAS                                  |               |
| Ácidos concentrados                                    | Aceptable     |
| Álcalis  | Buena         |
| Alcoholes  | Buena         |
| Grasas y aceites                                       | Buena         |
| Halógenos  | Mala          |
| Hidrocarburos Aromáticos                               | Buena         |

Fuente: Cmematerials, Universidad de Barcelona

### **2.2.1.2 CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO TÉRMICO - MECÁNICO**

Los polímeros o plásticos pueden ser agrupados de diversas formas, de acuerdo a sus características pueden clasificarse en termoplásticos y termoestables

#### **2.2.1.2.1 TERMOPLÁSTICOS**

Los Termoplásticos son polímeros lineales, que pueden estar ramificados o no. Puesto que no se encuentran entrecruzados son polímeros solubles en algunos disolventes orgánicos, son capaces de fundir y son, por tanto, reciclables. Si los comparamos con los demás tipos de plásticos, los termoplásticos se fabrican y emplean en cantidades muy grandes y entre ellos los más frecuentes son PE, PP, PS y PVC. De hecho, más de la mitad de la cifra total de plásticos procesada corresponde a los cuatro plásticos citados. Para que un polímero tenga aplicación como termoplástico debe tener una temperatura de transición vítrea  $T_g$  (si se trata de un material amorfo), o una temperatura de fusión  $T_m$  (si se trata de un material cristalino), superior a la temperatura ambiente. Por lo general, los materiales termoplásticos presentan un buen conjunto de propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y bastante económicos. La principal desventaja deriva del hecho de que son materiales que funden, de modo que no tienen aplicaciones a elevadas temperaturas puesto que por encima de la  $T_g$  comienzan a reblandecer, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas. (Beltran y Marcilla, 2012)

#### **2.2.1.2.2 TERMOESTABLES**

Los Termoestables son materiales que adquieren un estado final reticulado o entrecruzado, que los hace insolubles e incapaces de fundir. A estos materiales se llega partiendo de materias primas de bajo peso molecular de las que se obtiene, en una primera fase, un producto intermedio (prepolímero), muy poco o nada reticulado, todavía capaz de fundir y fluir, y por tanto de rellenar un molde. La reticulación espacial que da lugar a la formación de la macromolécula termoestable tiene lugar por reacción química, durante el moldeo de la pieza. Puesto que no funden y no reblandecen son materiales que presentan muy buenas propiedades a elevadas temperaturas. Junto con su alta resistencia térmica presentan alta resistencia química, rigidez, dureza superficial, buena estabilidad dimensional, entre otras ventajas sobre otros materiales.

Sin embargo, el empleo de estos materiales ha ido disminuyendo en los últimos años. Existen numerosas razones por las que esto ha ocurrido. Los termoestables requieren métodos de transformación lentos. (Beltran y Marcilla, 2012)

### **2.2.2 GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

El manejo de residuos sólidos donde se encuentra incluido el plástico es un conjunto de procedimientos y políticas aplicadas a una gestión ambiental económicamente apropiada, en este se encuentran incluidas diferentes procesos y operaciones como son: generación, recolección. Almacenamiento, transporte tratamiento y disposición final de los residuos sólidos. En Bolivia estas acciones se rigen por leyes como la Ley 755 de Gestión integral de residuos.

Como artículo primero y objetivo se tiene que La presente Ley tiene por objeto establecer la política general y el régimen jurídico de la Gestión Integral de Residuos en el Estado Plurinacional de Bolivia, priorizando la prevención para la reducción de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura, en el marco de los derechos de la Madre Tierra, así como el derecho a la salud y a vivir en un ambiente sano y equilibrado. (Ley N° 755 de gestión integral de residuos)

Esta ley de gestión de Residuos en la sección II artículo 14 prioriza el aprovechamiento de residuos y fomenta al reciclaje enunciado de la siguiente manera:

“El aprovechamiento de residuos es el conjunto de acciones que permiten la reutilización de los mismos o la reincorporación al ciclo productivo de los diferentes recursos presentes en los mismos, para generar beneficios al medio ambiente y a la economía del país, mediante el compostaje, reciclaje o aprovechamiento energético.” (Ley N° 755 de gestión integral de residuos)

Entre los múltiples métodos que actualmente son utilizados para aprovechar los residuos o desechos plásticos entre los cuales se encuentran el reciclado mecánico, reciclado químico y recuperación de energía.

#### **2.2.2.1 RECICLADO MECÁNICO**

El reciclaje mecánico de plástico es un proceso por el cual se obtiene materias primas secundarias, donde los residuos de plásticos son sometidos a calor y presión para la

transformación en otros objetos similares o distintos a los iniciales, pero con las propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original (Aracil Sáez, 2008)

Para que el proceso tenga resultados positivos se requiere que los plásticos a reciclar sean de gran tamaño, homogéneos, libres de contaminantes e impurezas. Además los termoplásticos son termodinámicamente incompatibles, es decir que tienen temperaturas de fusión diferentes que varían en un rango de 80°C a 240°C, por esta razón es necesario que cada resina sea tratada por separado para obtener como producto materias primas secundarias que cumplan con las especificaciones de calidad del mercado (MAVDT, 2008)

Las aplicaciones de este tipo de método se limitan a un porcentaje reducido de residuos plásticos por las siguientes 3 razones primordiales

- Los plásticos reciclados generalmente deben mezclarse con una cantidad de plástico virgen, debido a que los plásticos a lo largo de su vida útil y su eliminación van perdiendo sus propiedades
- Los residuos plásticos deben ser separados homogéneamente, debe evitarse las mezclas de tipos diferentes de plásticos y además deben estar limpios
- Se limitan exclusivamente a los polímeros termoplásticos, debido a que son los únicos que se pueden moldear una y otra vez al ser sometidos a calor y sin perder sus características

#### **2.2.2.2 RECICLADO QUÍMICO**

Mediante procesos químicos puede descomponerse los plásticos usados en compuestos más simples como monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos. Este proceso requiere homogeneidad de materiales, sino que puede llevarse a cabo con mezclas de distintos polímeros, incluso se puede trabajar con plásticos termoestables y plásticos de composición compleja. De esta manera puede ahorrarse el costo de selección. Con esta técnica se puede recuperar los residuos plásticos que no han podido ser aprovechados en el método del reciclado mecánico. (Espinoza, 2009)

A pesar de las múltiples ventajas que el reciclaje químico nos ofrece, aún se encuentra en etapas experimentales avanzadas, sin embargo, este método promete ser una alternativa ambiental,

social, y económicamente viable para el aprovechamiento de desechos plásticos. (MAVDT, 2008)

Existen diferentes procesos químicos para realizar reciclaje químico como la pirolisis, la gasificación, la despolimerización, Hidrogenación

#### **2.2.2.2.1 PIRÓLISIS**

proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno a temperaturas comprendidas entre 400°C a 1000°C del que se obtiene fracciones sólidas, líquidas y gaseosas aprovechables. Además, que estos productos obtenidos pueden ser reutilizados por la industria petroquímica o ser empleados como combustibles, en este proceso se puede trabajar todo tipo de residuos plásticos (Aracil Sáez, 2008). Pero varios estudios realizados en laboratorio sobre pirolisis de Plásticos demuestran que los plásticos con mejores resultados de rendimiento son el Poliestireno, Polipropileno, Polietileno de alta densidad y Polietileno de baja densidad, dejando de lado a el Policloruro de vinilo y el Polietilentereftalato porque tienen rendimientos de conversión muy bajos y además generan ácidos altamente corrosivos que pueden dañar el equipo como ser el ácido clorhídrico y el ácido benzoico.

#### **2.2.2.2.2 GASIFICACIÓN**

Este proceso se produce por la oxidación parcial de las cadenas poliméricas donde se llega a sintetizar monóxido de carbono e hidrogeno, que se pueden utilizar como gas de síntesis o materia prima para la producción de metano, amoniaco o alcoholes, útiles para la generación de electricidad, o por otro lado también son útiles como agentes para le producción de acero en hornos de venteo. Como ventaja presenta el hecho de que no se requiere la separación previa de los residuos y es la técnica más desarrollada del reciclaje químico. (Aracil Saez, 2008)

#### **2.2.2.2.3 DESPOLIMERIZACIÓN CATALÍTICA**

Este método es conocido como el proceso inverso de la producción del plástico, parte de un polímero que descompuesto en monómeros los cuales pueden volver a ser utilizados como materia prima. Este proceso se puede desarrollar por vía térmica o catalítica, mediante reacciones de metanolisis, hidrolisis, alcoholisis o glicolisis. Para lograr buenos resultados con este proceso se debe disponer de materia prima bien definida, este proceso es aplicable a polímeros de policondensacion como el PET y Poliamida y algunas adiciones como los Poliuretanos. (Aracil Sáez, 2008)

#### 2.2.2.2.4 HIDROGENACIÓN

Este proceso es uno de los más utilizados a nivel industrial, en donde se produce una reacción donde se produce una reacción con el hidrogeno en presencia de catalizadores metálicos, en este proceso se trabaja a temperaturas de 300 a 500C produciendo así que los hidrocarburos insaturados rompan su dobles o triples enlaces para ser transformados en hidrocarburos saturados y líquidos. (Aracil Sáez, 2008)

En este proyecto utilizaremos el método de reciclaje químico de "Pirolisis", porque presenta más estudio realizados en diferentes países con buenos resultados además que es un proceso factible.

#### 2.2.3 DISPONIBILIDAD DE PLÁSTICOS EN LA CIUDAD DE LA PAZ

los residuos sólidos son aquellos que ya no sirven para lo que fueron creados (transportar líquidos u otros materiales, recubrir cables y otros), pero que pueden ser sometidos a un proceso de reciclaje porque son potencialmente procesables, extendiendo su vida útil. Estableceremos 2 fuentes donde podremos obtener la materia prima que es el plástico en la ciudad de La Paz, la primera será de los residuos o desechos urbanos que son transportados a rellenos sanitarios y la segunda que son el plástico procedente del reciclaje.

En la ciudad de la Paz se generan aproximadamente entre 600 y 650 toneladas al día de basura o desechos sólidos urbanos de los cuales la materia orgánica son el 65%, plásticos el 8.5%, papel y cartón son 7% y lo que no es posible reciclar es 19.5% (SIREMU, 2020).

**Tabla 2.7 Empresas recicladoras de plástico en la ciudad de La paz**

| Nº | EMPRESA/INDUSTRIA<br>RECICLADORA | MATERIAL(ES)                       | DIRECCIÓN   |
|----|----------------------------------|------------------------------------|---|
| 1  | ARMEL*                           | Polietileno Tereftalato (PET)      | -   |
|    |                                  | Polietileno (alta y baja densidad) |   |
|    |                                  | Polipropileno sin color            |   |
| 2  | BOLIPET SRL                      | Polietileno Tereftalato (PET)      | Mutual La Primera, Av. TalTal, N° 8085<br>(El Alto)   |
| 3  | CORECA                           | Polietileno Tereftalato (PET)      | Av. del Ejército<br>77286086 – 77260680   |
|    |                                  | Polietileno de baja densidad       |   |
| 4  | CORMOPET                         | Polietileno Tereftalato (PET)      | Carretera a Viacha, Km 5<br>surtidor Las Rosas (El Alto), 70658032  |
| 5  | DULPLAST                         | Polietileno Tereftalato (PET)      | C.7cerca de la Av.9(Entrada a la zona 1° de<br>Mayo a 2 cuadras de la Av. Bolivia). (El Alto)<br>70547247 |
|    |                                  | Polietileno (alta y baja densidad) |   |
| 6  | FABOPLA                          | Polietileno de alta densidad       | Av. 6 de Marzo (lado<br>ELECTROPAZ), carretera a Oruro. (El Alto)   |
|    |                                  | Polipropileno sin color            |   |
| 7  | FIAP                             | Polietileno Tereftalato (PET)      |   |
|    |                                  | Polietileno Tereftalato (PET)      |   |

|    |                                     |                                    |  |
|----|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| 8  | FIBRACON                            | Polietileno (alta y baja densidad) | Av. Oscar Alfaro esq. C. Puerto Villarroel (a 7 cuadras de la Av. Bolivia), Zona San Pablo (El Alto), 2832009      |
| 9  | GLOBAL INDUSTRIAS                   | Polietileno Tereftalato (PET)      | -  |
| 10 | HIDROPLAST                          | Polietileno Tereftalato (PET)      | C. 9 en la Av. Bolivia (delante del colegio Elizardo Pérez a 4 cuadras del cruce a Villa Adela) (El Alto), 2823378 |
|    |                                     | Polietileno (alta y baja densidad) |  |
| 11 | J.R. INDUSTRIAS                     | Polietileno Tereftalato (PET)      | -  |
| 12 | IMPEGONAL GONZALES E HIJOS*         | Polietileno (alta y baja densidad) | Zona Villa Bolívar E, Circunvalación esq. Pando N° 110 (El Alto)   |
|    |                                     | Polietileno Tereftalato (PET)      |  |
| 13 | INDUPLAST                           | Polietileno Tereftalato (PET)      | Av. Arica 100 Rosas Pampa. (El Alto) 2814875   |
|    |                                     | Polietileno (alta y baja densidad) |  |
| 14 | INDUSTRIAS DE PLASTICO VICTORIA SRL | Polietileno de baja densidad       | Av. Francisco Bedregal 884/Bajo Llojeta (final Sopocachi, Parada 2) (La Paz) 71535050 – 71928617                   |
| 15 | INDUSTRIAS FATIMA                   | Polietileno (alta y baja densidad) | -  |

Fuente: RJ Peñaranda Espinoza, La basura también es plata, dos rutas del reciclaje paceño, 2017

En el Año 2019 se realizó un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos. El Estudio se llevó a cabo en el Municipio de La Paz, en sus siete macrodistritos que incluyen 21 distritos municipales urbanos, se aplicó tomando en cuenta las fuentes de generación: domiciliarias (1650 muestras) y no domiciliarias (500 muestras). En las fuentes domiciliarias se generó información por macrodistrito y estrato, posteriormente se analizó la misma en 3 estratos socioeconómicos (alto, medio y bajo). En las fuentes no domiciliarias de la misma manera se identificaron los principales rubros de las actividades económicas de la ciudad como instituciones públicas y privadas, unidades educativas, industrias, establecimientos de salud, mercados, hoteles entre otros. (Caracterización de residuos, Ga Hoole.srl, 2020)

**Tabla 2.8 Generación de residuos**

| <b>GENERACIÓN PER CÁPITA</b> |       |            |
|------------------------------|-------|------------|
| domiciliaria                 | 0,584 | kg/hab día |
| no domiciliaria              | 0,74  | Kg/hab día |
| <b>GENERACIÓN TOTAL</b>      |       |            |
| 698,11 Toneladas / día       |       |            |

Fuente: elaborado a partir de Ga hoole, Caracterización ciudad de La Paz, 2020

En la ciudad de la Paz se generan 698,11 Toneladas / día de residuos sólidos en promedio

## 2.2.4 COMPOSICIÓN GENERAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

La composición física ponderada general para la ciudad de La Paz, en la siguiente tabla 2.9 se consideró todas composiciones de los residuos sólidos de las fuentes generadoras determinadas

**Tabla 2.9 Composición física ponderada general de la ciudad**

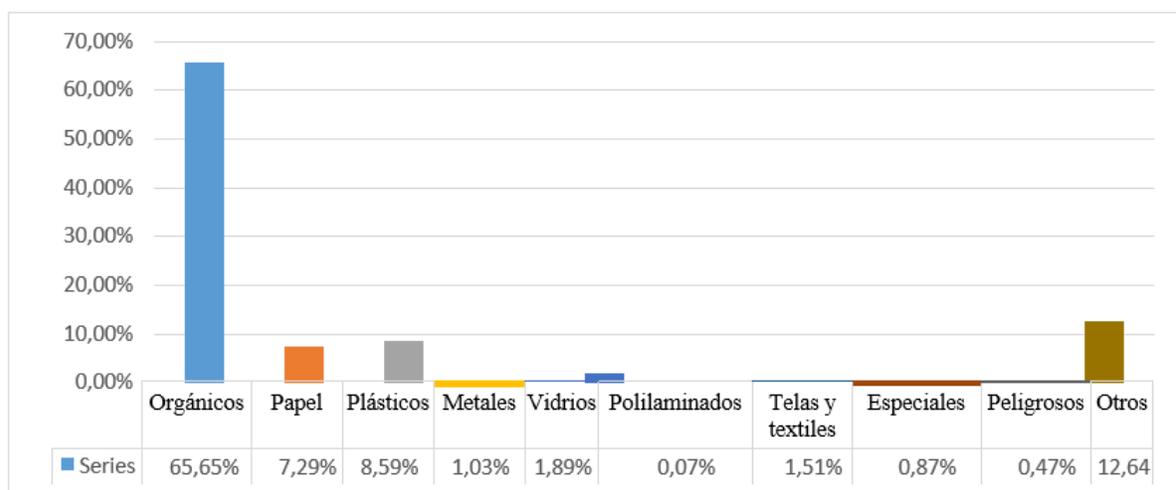
| CLASIFICACIÓN                                   | 80,31%        | 0,7%                        | 4,5%                | 6,0%           | 1,2%                        | 2,9%          | 4,2%       | %      |
|---|---------------|-----------------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|---------------|------------|--------|
|   | DOMICILIARIOS | ESTABLECIMIENTOS HOSPEDAJES | EXPENDIOS DE COMIDA | CONSUMO MASIVO | ESTABLECIMIENTOS EDUCATIVOS | INSTITUCIONES | INDUSTRIAS |        |
| Restos de frutas, verduras y similares          | 47,74%        | 39,40%                      | 45,99%              | 54,19%         | 6,31%                       | 4,80%         | 12,35%     | 44,72% |
| Restos de comida                                | 15,09%        | 21,19%                      | 41,32%              | 28,69%         | 22,69%                      | 32,85%        | 30,31%     | 18,40% |
| Huesos  | 0,66%         | 0,18%                       | 0,35%               | 0,10%          | 0,00%                       | 0,00%         | 0,03%      | 0,56%  |
| Madera no tratada                               | 0,05%         | 0,00%                       | 0,00%               | 0,38%          | 0,00%                       | 0,00%         | 4,22%      | 0,24%  |
| Restos de podas                                 | 1,65%         | 1,45%                       | 0,00%               | 6,39%          | 0,02%                       | 0,08%         | 0,00%      | 1,73%  |
| Papel Blanco                                    | 0,65%         | 0,67%                       | 0,19%               | 0,04%          | 7,21%                       | 19,29%        | 2,31%      | 1,29%  |
| Papel de color                                  | 0,29%         | 0,11%                       | 0,00%               | 0,00%          | 0,83%                       | 0,40%         | 0,00%      | 0,25%  |
| Periódico                                       | 0,42%         | 0,07%                       | 0,00%               | 0,02%          | 0,32%                       | 0,36%         | 0,15%      | 0,36%  |
| Cartón  | 2,38%         | 2,90%                       | 0,18%               | 1,57%          | 3,04%                       | 8,25%         | 10,13%     | 2,74%  |
| Revistas  | 0,27%         | 0,01%                       | 0,00%               | 0,00%          | 0,16%                       | 0,51%         | 0,00%      | 0,23%  |
| Otros (Papel Contaminado)                       | 1,69%         | 2,10%                       | 1,80%               | 1,64%          | 22,25%                      | 4,87%         | 10,28%     | 2,41%  |
| Plástico 1. Tereftalato de Polietileno (PET)    | 1,83%         | 2,68%                       | 0,69%               | 0,40%          | 2,17%                       | 3,09%         | 0,78%      | 1,69%  |
| Plástico 2. Polietileno de Alta Densidad (PEAD) | 0,62%         | 0,40%                       | 0,33%               | 0,31%          | 0,91%                       | 0,50%         | 0,59%      | 0,59%  |
| Plástico 3. Cloruro de Polivinilo (PVC)         | 0,06%         | 0,01%                       | 0,03%               | 0,01%          | 0,02%                       | 0,09%         | 0,03%      | 0,06%  |
| Plástico 4. Polietileno de Baja Densidad (PEBD) | 0,97%         | 1,31%                       | 1,29%               | 1,00%          | 13,59%                      | 1,35%         | 5,99%      | 1,36%  |
| Plástico 5. Polipropileno (PP)                  | 0,64%         | 0,58%                       | 0,43%               | 0,27%          | 2,31%                       | 1,04%         | 0,35%      | 0,63%  |
| Plástico 6. Poliestireno (PS)                   | 0,41%         | 0,49%                       | 0,33%               | 0,15%          | 0,92%                       | 3,87%         | 0,40%      | 0,50%  |
| Plástico 7. (ABS)                               | 1,78%         | 1,04%                       | 0,23%               | 0,41%          | 2,06%                       | 1,78%         | 2,85%      | 1,67%  |
| Bolsas tipo película                            | 1,39%         | 1,43%                       | 0,98%               | 2,00%          | 1,33%                       | 0,60%         | 0,53%      | 1,35%  |
| Otros (Fibra Contaminada, envoltura de dulces)  | 0,64%         | 0,41%                       | 0,14%               | 0,11%          | 2,51%                       | 0,46%         | 4,01%      | 0,74%  |
| Latas de Aluminio                               | 0,22%         | 0,80%                       | 0,03%               | 0,00%          | 0,08%                       | 0,34%         | 0,02%      | 0,20%  |
| Latas de Pintura                                | 0,05%         | 0,00%                       | 0,00%               | 0,00%          | 0,00%                       | 0,00%         | 0,13%      | 0,04%  |
| Metales no Ferrosos (Hojalata)                  | 0,58%         | 0,41%                       | 0,56%               | 0,14%          | 0,24%                       | 1,64%         | 0,90%      | 0,59%  |
| Metales Ferrosos                                | 0,23%         | 0,20%                       | 0,00%               | 0,01%          | 0,03%                       | 0,12%         | 0,18%      | 0,20%  |
| Vidrio Transparente                             | 1,12%         | 1,21%                       | 0,72%               | 0,35%          | 0,29%                       | 1,35%         | 0,00%      | 1,01%  |
| Vidrio Ámbar                                    | 0,21%         | 1,06%                       | 0,40%               | 0,46%          | 0,96%                       | 0,00%         | 0,00%      | 0,24%  |
| Vidrio Verde                                    | 0,32%         | 0,66%                       | 0,03%               | 0,00%          | 0,44%                       | 0,00%         | 0,15%      | 0,27%  |
| Vidrio Plano                                    | 0,11%         | 0,00%                       | 0,00%               | 0,00%          | 0,00%                       | 0,00%         | 0,00%      | 0,09%  |
| Vidrio Marrón                                   | 0,29%         | 1,74%                       | 0,76%               | 0,00%          | 0,00%                       | 0,00%         | 0,00%      | 0,28%  |
| Envases de Tetrapark y Tetrabric                | 0,07%         | 0,23%                       | 0,01%               | 0,00%          | 0,57%                       | 0,03%         | 0,00%      | 0,07%  |
| Telas y textiles                                | 1,59%         | 1,23%                       | 0,04%               | 0,11%          | 0,42%                       | 0,06%         | 1,39%      | 1,36%  |
| Algodón   | 0,02%         | 0,00%                       | 0,00%               | 0,00%          | 0,02%                       | 0,00%         | 0,45%      | 0,04%  |
| Fibras Sintéticas                               | 0,14%         | 0,03%                       | 0,01%               | 0,00%          | 0,00%                       | 0,00%         | 0,00%      | 0,11%  |
| Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos  | 0,39%         | 0,08%                       | 0,04%               | 0,02%          | 0,42%                       | 0,02%         | 0,40%      | 0,34%  |
| Cuero   | 0,11%         | 0,00%                       | 0,00%               | 0,00%          | 0,00%                       | 0,00%         | 0,00%      | 0,09%  |
| Goma  | 0,33%         | 0,14%                       | 0,20%               | 0,04%          | 0,19%                       | 0,12%         | 1,32%      | 0,34%  |

|  |       |        |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Baterías   | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Pilas  | 0,12% | 0,12%  | 0,00% | 0,00% | 0,02% | 0,00% | 0,00% | 0,10% |
| Medicamentos caducos                             | 0,18% | 0,11%  | 0,00% | 0,03% | 0,15% | 0,17% | 2,23% | 0,25% |
| Envases de plaguicidas                           | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Luminarias incandescentes y lámparas de descarga | 0,04% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,03% |
| Restos de pintura                                | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Otros R. Peligrosos (Mat.Hosp. Contaminado)      | 0,04% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,03% | 3,73% | 0,19% |
| Papel Sanitarios                                 | 5,66% | 12,47% | 2,59% | 0,34% | 4,82% | 3,51% | 1,09% | 4,98% |
| Pañales desechables y Toallas Sanit.             | 6,01% | 2,10%  | 0,07% | 0,35% | 0,96% | 4,22% | 0,31% | 5,01% |
| Heces Fecales                                    | 0,93% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,75% |
| Madera tratada                                   | 0,30% | 0,07%  | 0,03% | 0,00% | 0,57% | 0,09% | 0,24% | 0,26% |
| Material de Construcción y Escombros             | 0,20% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,16% |
| Residuos Voluminosos                             | 0,01% | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Loza y Cerámica                                  | 0,39% | 0,01%  | 0,03% | 0,20% | 0,13% | 0,56% | 0,00% | 0,34% |
| Residuos Finos                                   | 0,42% | 0,37%  | 0,08% | 0,13% | 0,81% | 0,37% | 1,53% | 0,44% |
| Otros (Materiales Contaminados)                  | 0,62% | 0,53%  | 0,13% | 0,14% | 0,16% | 0,08% | 0,61% | 0,55% |
| Plastoform                                       | 0,05% | 0,01%  | 0,00% | 0,00% | 0,08% | 3,09% | 0,01% | 0,13% |

Fuente: Ga hoole, Caracterización ciudad de La Paz, 2020

Se observa que el plástico se presenta considerablemente en los residuos sólidos de la ciudad. Considerando la tabla 4.9 de composiciones físicas ponderada de residuos sólidos en la ciudad de La Paz se obtiene que A nivel general el 65,65% son residuos orgánicos, el 12.64% fracción resto y el 8.59 % plásticos, el 7.29 % Papel, entre lo más importante. Con estos porcentajes determinados se elabora la Figura 2.2

**Figura 2.2 Composición general de residuos sólidos en la ciudad de La Paz**



Fuente: Elaborado a partir datos de Ga hoole, Caracterización ciudad de La Paz, 2020

### 2.2.4.1.1 DISPONIBILIDAD DE POLIESTIRENO POLIPROPILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

En la siguiente tabla se calculó la cantidad de polímeros (PS, PP Y HDPE) disponibles a diario y anuales que podrían ser utilizados para la obtención de combustible por el proceso de Pirolisis

**Tabla 2.10 Disponibilidad de Poliestireno, Polipropileno y Polietileno de alta densidad**

| <b>RESIDUOS SOLIDOS GENERAL<br/>POR DÍA</b> | 698,11 Toneladas / día |                        |              |
|---|------------------------|------------------------|--------------|
| <b>POLÍMERO</b>                             | <b>%</b>               | <b>TONELADAS / DÍA</b> | <b>ANUAL</b> |
| POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD                | 0.59%                  | 4.118849               | 1503.379885  |
| POLIPROPILENO                               | 0.63%                  | 4.398093               | 1605.303945  |
| POLIESTIRENO                                | 0.50%                  | 3.49055                | 1274.05075   |

Fuente: elaborado a partir de información recopilada Ga hoole, Caracterización ciudad de La Paz, 2020

Se observa que la cantidad total por día de polímeros en residuos sólidos que sirven de materia prima para la producción de combustible por el proceso de pirolisis llega a ser de 12 toneladas es más que suficiente para satisfacer la alimentación del proceso pensado a realizarse que es de 1 ton / día

## **2.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA PIRÓLISIS**

### **2.3.1 PROCESO DE PIRÓLISIS**

La pirólisis es un proceso que consiste en la descomposición termoquímica que implica romper la estructura molecular de los compuestos en condiciones de presión, temperatura moderadas y en un ambiente privado de agentes oxidantes. La pirólisis se ha considerado como una opción para el tratamiento químico de residuos sólidos urbanos, siendo estudiado por numerosos países en particular países desarrollados, con el objetivo en común de reducir los residuos o prácticamente utilizarlos para ser transformados en materiales que puedan ser aprovechados energéticamente o usados como materia prima de ciertos procesos industriales. (Botello, Avalos, Camporredondo, 2010)

La pirólisis de polímeros es el proceso mediante el cual se lleva cabo una descomposición termoquímica de las macromoléculas presentes en los plásticos para obtener compuestos de cadena más corta o de bajo peso molecular. Esta degradación se lleva a cabo a temperaturas altas, y en ausencia de oxígeno, dando como resultado una mezcla de hidrocarburos combustibles, además de gases y residuos sólidos (Moreno, Sáenz 2018). Dichos productos pueden ser aplicados como combustibles, petroquímicos y monómeros. Dependiendo de los polímeros o mezclas de polímeros que son utilizados de materia prima del proceso, las condiciones de operación utilizadas los rendimientos pueden variar en rangos considerables. (Cunliffe, Jones, Williams, 2013)

El requerimiento de ausencia total de oxígeno es necesario con el fin de crear una atmósfera inerte sin medios oxidantes, debido a que si el oxígeno reacciona con alguna de las moléculas que se desprenden podría provocar una reacción de combustión peligrosa, además de obstaculizar la formación de los compuestos deseados y de esta manera afectar el rendimiento del proceso (Moreno, Sáenz 2018).

Una de las ventajas de la pirolisis es que abarca a un mayor espectro de aplicaciones, ya que se usa no solo en termoplásticos sino también en materiales termoestables, pudiendo estos contener un rango de contaminación de aproximadamente 20%, valor que no afectaría al desarrollo y resultados de esta tecnología (Garrido, 2013).

### **2.3.1.1 PIRÓLISIS TÉRMICA**

La pirolisis térmica, que también como termólisis, es un proceso de degradación térmica de residuos plásticos, que es realizada en una atmósfera inerte (Garrido, 2013), se basa en calentamiento de los plásticos por lo que es considerado un proceso endotérmico, en este tipo de pirolisis la temperatura juega un papel demasiado importante puesto que no presenta la interferencia de un acelerador de reacción (Moreno, Sáenz 2018).

En este proceso los polímeros iniciales son separados o fragmentados, mediante reacciones intermoleculares, a estructuras secundarias, que a su vez se descomponen en estructuras terciarias y así de manera sucesiva hasta la obtención de los productos finales (Garrido, 2013). La degradación se lleva a cabo a través de dos tipos de reacciones, una de ellas provoca rupturas aleatorias de los enlaces formando compuestos de bajo peso molecular, mientras que la otra produce rupturas al final de la cadena polimérica originando productos volátiles (Contreras 2014).

El mecanismo de ruptura aleatoria es el medio principal de degradación de varios polímeros, en especial de las poliolefinas (PE y PP), los cortes ocurren en sitios al azar de la cadena estructural del polímero causando una caída rápida del peso molecular del plástico inicial. Con la formación baja de monómeros que favorece la formación de distintas clases de dímeros y oligómeros, saturados o insaturados, con o sin conformaciones de estructuras cíclicas (Contreras 2014).

EL mecanismo de la ruptura al final de la cadena, conocida también como unzipping, se produce en la interface gas-líquido dentro del reactor, en ella existe la transferencia de radicales intramoleculares. Además, se ha demostrado que al disminuir la interface gas-líquido decrece la formación de compuestos volátiles en la pirolisis de polietileno, polipropileno y poliestireno (Contreras 2014).

#### **2.3.1.1.1 TIPOS DE PIRÓLISIS TÉRMICA**

Generalmente, la pirolisis térmica se lleva a cabo a temperaturas comprendidas entre 300 a 1000°C, mismas que se determinan de acuerdo al tipo de polímero a pirolizar y de las condiciones de operación. Además, se ha determinado en estudios que, a temperaturas menores de 500°C, temperaturas bajas, existe una mayor producción de aceite, mientras que a temperaturas altas, mayores a 600°C, la generación de gases es predominante (Moreno, Sáenz 2018, p. 41).

De acuerdo a la temperatura de operación, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia, la pirolisis térmica puede darse de tres maneras: lenta, rápida y flash.

#### **2.3.1.1.1.1 PIRÓLISIS LENTA**

La pirolisis lenta es conocida también como convencional, se lleva a cabo a temperaturas inferiores, entre 300 y 550°C, debido a que la velocidad de calentamiento es lenta, se obtienen como productos fracciones de gas líquido y sólido en menores proporciones (Cortázar 2014; Rincón, Silva 2015).

#### **2.3.1.1.1.2 PIRÓLISIS RÁPIDA**

Este tipo de proceso se efectúa a temperaturas superiores, comprendidas entre 600-800°C (Millan 2014), el rendimiento de la fracción líquida es superior a la obtenida en la pirolisis convencional, debido a que la velocidad de calentamiento es rápida se hace necesario un enfriamiento instantáneo de los gases con el fin de evitar el craqueo de los mismos y la formación de gases condensables (Rincón, Silva 2015).

#### **2.3.1.1.1.3 PIRÓLISIS FLASH**

La pirolisis flash ocurre a temperaturas elevadas por encima de 800°C, generando una mayor proporción de gases como monóxido de carbono e hidrógeno, alrededor del 60%, la cantidad de sólidos en consecuencia disminuye tomando valores del 10%. Al ser un proceso endotérmico con alta transferencia de calor el tiempo de residencia disminuye considerablemente, en relación a los otros tipos de pirolisis (Rincón, Silva 2015)

#### **2.3.1.1.2 MECANISMO DE DEGRADACIÓN TÉRMICA DE POLÍMEROS**

El mecanismo de degradación térmica presenta tres etapas y se basa en dos tipos de reacciones diferentes que son consecuencia del calor absorbido, es decir ocurren reacciones endotérmicas de manera simultánea. Las etapas son:

a. Iniciación: Esta etapa comprende el rompimiento homolíticos de las uniones carbón – carbón y esta puede ocurrir por dos reacciones:

a.1. Cisión aleatoria en las cadenas de polímeros:

Se genera un corte aleatorio en las cadenas del polímero, es decir, ocurre en cualquier lugar a lo largo de la cadena del polímero degradado lo que genera una rápida reducción del peso

molecular ya que se liberan fragmentos de menor peso molecular y no monómeros. Esta es la principal forma de degradación de distintos polímeros.

#### **2.3.1.1.2.1 CISIÓN AL FINAL DE LA CADENA**

Llamado también despolimerización, ocurre en la interfase de gas-líquido y genera compuestos volátiles, liberando unidades monoméricas de forma sucesiva desde el final de la cadena polimérica. El peso molecular, a diferencia del anterior, decrece lentamente y solo ocurre cuando los enlaces estructurales son más débiles que los enlaces de los grupos funcionales y que contengan, a su vez, moléculas de polímeros con un radical libre, catión, anión, entre otros, al final de la cadena (Almeida & Marques, 2016).

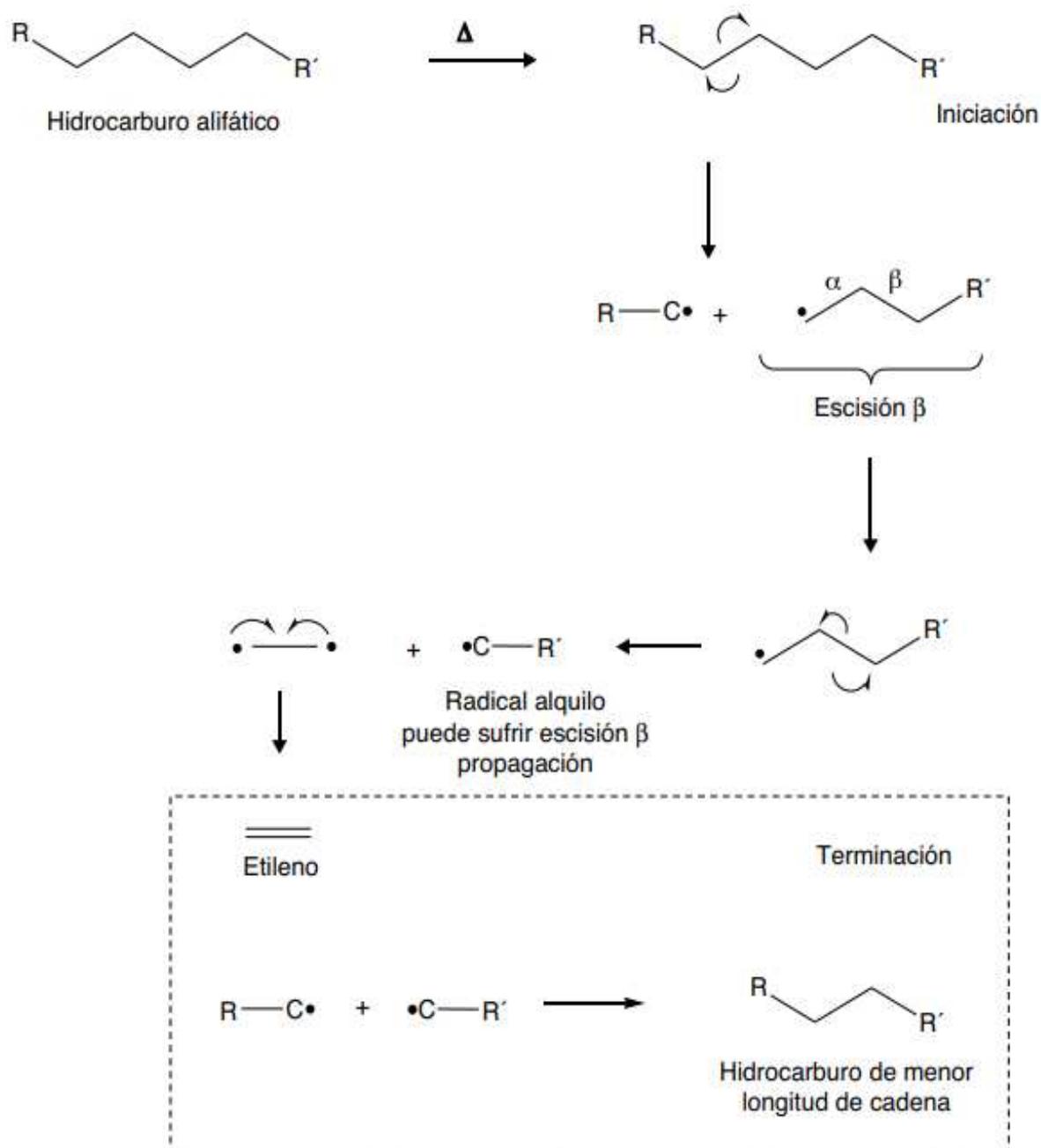
#### **2.3.1.1.2.2 PROPAGACIÓN**

Posteriormente a la iniciación ocurren reacciones de transferencia de hidrógeno intra o intermolecular, donde la cadena que abstrae el hidrógeno queda saturada y la que dona queda como un radical secundario más estable. Luego se genera un corte en la unión carbono – carbono en la posición  $\beta$  de la cadena, conocida como cisión- $\beta$  generando componentes con radicales saturados o insaturados y nuevos radicales. (Contreras Canteros, 2014)

#### **2.3.1.1.2.3 TERMINACIÓN**

Las reacciones de terminación pueden ocurrir por desproporción, donde se pueden generar diferentes olefinas y alcanos. Asimismo, también puede ocurrir la combinación de los distintos radicales generando productos ramificados, es decir, se genera una amplia distribución de los hidrocarburos (Poblete Olivares, 2013),

Figura 2.3 Mecanismo de reacción del craqueo térmico



Fuente: Alvarado, Jose Gregorio, et al. Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos.

En la Tabla 4.11 se muestra el mecanismo de descomposición térmica de algunos polímeros donde se observa los diferentes tipos de polímero termoplásticos y la temperatura influye en los productos pirolíticos a obtener.

**Tabla 2.11 Mecanismo de descomposición térmica de termoplásticos**

| <b>Polímero</b> | <b>Modo de descomposición térmica</b>                                    | <b>Productos a baja temperatura</b>             | <b>Productos a alta temperatura</b> |
|-----------------|--|---|-------------------------------------|
| Polietileno     | Ruptura aleatoria de cadena  | Ceras, aceites de parafinas, olefinas- $\alpha$ | Gases y aceites de bajo peso        |
| Polipropileno   | Ruptura aleatoria de cadena  | Vaselina y olefinas                             | Gases y aceites de bajo peso        |
| Poliestireno    | Combinación de corte al final de la cadena y ruptura aleatoria de cadena | Estireno y oligómeros                           | Estireno y oligómeros               |

Fuente: Extraído de (Poblete Olivares, 2013)

### **2.3.1.2 PIRÓLISIS CATALÍTICA**

La pirólisis catalítica es considerada la otra opción para llevar a cabo el proceso de pirólisis, es una técnica semejante a la termólisis, con la principal diferencia que esta se lleva a cabo en presencia de un catalizador, el cual se presenta como una sustancia aceleradora de reacción que posibilita la disminución de la temperatura de craqueo y de la energía de activación, al incrementar la selectividad favorece el rendimiento de productos gaseosos al reducir la formación de reacciones secundarias (Moreno, Sáenz 2018).

Entre los catalizadores más utilizados están las zeolitas y la roca volcánica o riolita ya que presentan una gran resistencia a temperaturas elevadas, su aplicación abarca varios procesos petroquímicos participando en reacciones ya sea en fase líquida o en fase de vapor (Garrido, 2013).

#### **2.3.1.2.1 MECANISMO DE DEGRADACIÓN CATALÍTICA DE POLÍMEROS**

Las reacciones en la degradación catalítica ocurren a través de la formación del ion carbonilo, la cual involucra reacciones de isomerización, escisión aleatoria de la cadena y escisión  $\beta$ , transferencia de hidrógeno, oligomerización o alquilación, aromatización. La formación del ion

carbonilo depende de las características del catalizador como es la fuerza, densidad y distribución de sus sitios ácidos (Almeida & Marques, 2016).

El mecanismo de degradación se inicia con una degradación inicialmente térmica y luego ocurre la degradación catalítica en la superficie y poros del catalizador (Miandad R., y otros, 2017). Los mecanismos de reacción comprenden:

#### **2.3.1.2.1.1 FORMACIÓN DEL ION CARBONILO**

Ocurre mediante las siguientes reacciones: a.1. Monomolecular: Para el caso de los alcanos estos adquieren un hidrógeno sobre los sitios ácidos del catalizador formando iones carbonilo. Para el caso de los dobles enlaces ocurre la iniciación donde al interior de la cadena a través de la adición de un protón se forma un ion carbonilo. Posteriormente, para ambos casos, ocurre la escisión de las cadenas de polímeros a través de un corte- $\beta$  generando un corte carbono-carbono en la cadena o un corte carbono-hidrógeno (Contreras Canteros, 2014). La velocidad de formación de los alcanos está directamente relacionada con la fuerza ácida de los sitios de Brönsted, es decir, que los sitios más fuertes serán más activos (Poblete Olivares, 2013).

#### **2.3.1.2.1.2 BIMOLECULAR**

Esta reacción implica la transferencia de un ion hidruro desde un alcano a un ion carbonilo de menor tamaño formado anteriormente. Este mecanismo una vez iniciado el mecanismo monomolecular ocurre mucho más rápido debido a su menor energía de activación (Poblete Olivares, 2013).

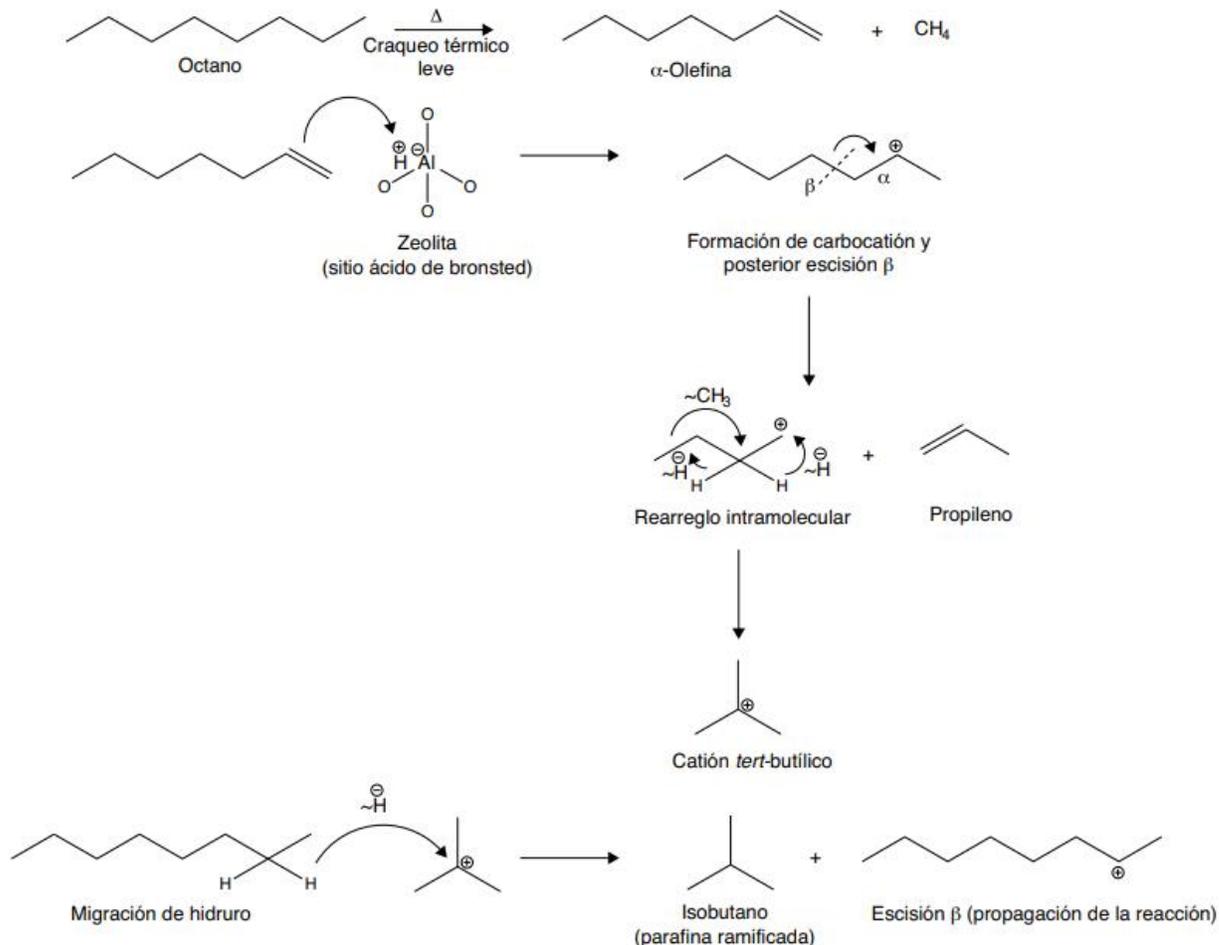
#### **2.3.1.2.1.3 REORDENAMIENTO INTRAMOLECULAR**

Los componentes intermediarios del ion carbonilo pueden sufrir reordenamientos por cambios de los átomos de hidrógeno o carbono que genera una isomerización del doble enlace (Contreras Canteros, 2014).

#### **2.3.1.2.1.4 AROMATIZACIÓN Y ALQUILACIÓN**

Posterior a la isomerización se puede llegar a formar compuestos cíclicos a través de reacciones de ciclación. La alquilación ocurre entre un alqueno y una cadena de ion carbonilo que genera la aparición de moléculas de mayor tamaño como el coque y oligómeros. Es este caso la alquilación se produce a mayor velocidad de la cisión de las cadenas (Contreras Canteros, 2014)

**Figura 2.4 Mecanismo de reacción de craqueo catalítico.**



Fuente: ALVARADO, José Gregorio, et al. Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos.

## 2.3.2 PARÁMETROS IMPORTANTES QUE AFECTAN LA PIRÓLISIS

Los parámetros que influyen en el proceso de la pirólisis son variados, cada uno de ellos afecta, de cierta manera, al rendimiento del proceso. A continuación, se presentan los variables más relevantes que inciden directamente en la pirólisis.

### 2.3.2.1 TEMPERATURA

La temperatura juega un papel determinante, ya que esta variable determina la velocidad de descomposición térmica, así como la estabilidad de las materias primas que ingresan, y de igual manera influye en los productos obtenidos. Las elevadas temperaturas que están por encima de los 600°C favorecen la generación de gases, mientras que, a temperaturas bajas, menores a 400

°C favorece la formación de hidrocarburos líquidos. Para tener un mayor control de la interface gas-líquido comúnmente se seleccionan temperaturas comprendidas entre 400°C y 500°C (Espinoza, Naranjo 2014).

La temperatura menor a la cual empieza el proceso de pirólisis es de 300°C, incluso existen polímeros termosensitivos que pueden pirolizarse a valores inferiores a este (Crespo 2013, p. 39). Por otro lado, el pico de temperatura más alto de este proceso se encuentra en los 1000°C, sin embargo, existen tecnologías en desarrollo que han tocado valores de hasta 1200°C (Rincón, Silva 2015).

#### **2.3.2.2 VELOCIDAD DE CALEFACCIÓN**

Al igual que la temperatura, su importancia radica en la determinación del tipo de pirólisis a efectuar. Este factor se define como la cantidad de calor en que puede incrementarse la muestra a pirolizar en un determinado tiempo, desde la temperatura ambiente hasta la de degradación (Conesa 2016).

De acuerdo a la velocidad de calefacción se reconocen tres tipos de pirólisis: lenta, rápida y flash. En el caso de las dos primeras, debido a que la velocidad de calefacción es menor, la producción de fracciones líquidas y sólidas es mayor en comparación a la pirólisis flash, que genera mayores cantidades de gases debido a su alta, casi inmediata, velocidad de calefacción (Aracil Sáez 2008).

#### **2.3.2.3 TIEMPO DE RESIDENCIA**

Este es otro de los factores a advertir, los compuestos volátiles que son sometidos a tiempos de residencia largos (mayor a 120 horas) incrementan el rendimiento en la producción de gases gracias a que se beneficia el craqueo de alquitranes. En cambio, al trabajar con tiempos de residencia cortos (30 min a 60 min), existe un mayor rendimiento de hidrocarburos líquidos (Conesa 2016). La determinación de este parámetro se relaciona principalmente con la temperatura, además del tipo de reactor a utilizarse en la termólisis (Espinoza, Naranjo 2014).

#### **2.3.2.4 PRESIÓN**

Pese a que la pirólisis es un proceso que se realiza en una atmósfera inerte, ausente de oxígeno, se puede llevar a cabo con la formación de vacío o la anulación del mismo. Es así que al trabajar

a presiones altas la formación de gases no condensables se incrementa causando una disminución en el porcentaje de productos líquidos (Crespo 2013).

#### **2.3.2.5 HUMEDAD**

La humedad es un parámetro que influye, de manera indirecta, sobre el balance térmico del proceso, es decir que la pirólisis ocurre a una temperatura inferior a la fijada, ya que parte del 21 calor suministrado es usado en la evaporación de la cantidad de agua y no es aprovechado en la degradación química del plástico (Conesa 2016). El contenido de humedad, además, causa afecciones a los gases de salida y provoca el desplazamiento de algunas reacciones, por lo cual, la mayoría de procesos termoquímicos exigen que el contenido de humedad de una muestra sea inferior al 30% (Fernández 2010).

#### **2.3.2.6 TAMAÑO DE PARTÍCULA**

El tamaño de partícula se considera un factor que influye en la transmisión de calor al material, en el caso de plásticos de menor tamaño, menores a 0.84mm, el rendimiento de los productos no se afectado debido a que la transmisión interna de calor es rápida. En plásticos de mayor tamaño, superiores a 1,98 mm, la transmisión de calor va a ser más lenta lo cual influiría en el tiempo de residencia, sin embargo, si el proceso ocurre mediante pirólisis lenta el tamaño de partícula no es de gran afección (Conesa 2016).

#### **2.3.2.7 CANTIDAD DE MUESTRA**

Este parámetro, al igual que el tamaño de partícula, incide de mayor forma en la transferencia de calor dentro del reactor y en menor medida en los mecanismos químicos. La cantidad de muestra se determina principalmente por dos factores: el material a pirolizar y el tipo de reactor a utilizar (Conesa 2016).

#### **2.3.2.8 ATMÓSFERA DE REACCIÓN**

Para propiciar el ambiente idóneo a la pirolisis, comúnmente se hace empleo de gases inertes como como el nitrógeno o el helio ( $N_2$ , He), también se ha llevado a cabo estudios que proponen la utilización de vapores condensables de disolventes, entre ellos el metanol o el etilglicol. Para la generación de atmósferas reductoras, el metano o el hidrogeno son compuestos de posible aplicación (Conesa 2016).

## CAPÍTULO 3 ESTUDIO DE MERCADO

### 3.1 PRODUCTORES, EXPORTADORES E IMPORTADORES EN EL MUNDO

Desde que el petróleo y sus derivados se consideraron como la principal fuente de energía a lo largo del tiempo, ha sufrido variaciones en cuanto a los precios alcanzando sus máximos registrados en el año 2008 y precios bajos en el año 2020. Con el tiempo la necesidad de energía incrementa lo cual es favorable para países productores de petróleo, que además entre ellos se encontrarían los principales países exportadores en el mundo.

**Tabla 3.1 Ranking de Países Productores de petróleo en el mundo**

| Posición | País                   | Petróleo - Producción (barriles/día) |
|----------|------------------------|--------------------------------------|
| 1        | Estados Unidos         | 10.962.000                           |
| 2        | Rusia                  | 10.759.000                           |
| 3        | Arabia Saudí           | 10.425.000                           |
| 4        | Irak                   | 4.613.000                            |
| 5        | Canadá                 | 4.264.000                            |
| 6        | Irán                   | 4.251.000                            |
| 7        | China                  | 3.773.000                            |
| 8        | Emiratos Árabes Unidos | 3.216.000                            |
| 9        | Kuwait                 | 2.807.000                            |
| 10       | Brasil                 | 2.587.000                            |
| 11       | Nigeria                | 1.989.000                            |
| 12       | Kazajistán             | 1.856.000                            |
| 13       | México                 | 1.852.000                            |
| 14       | Angola                 | 1.593.000                            |
| 15       | Noruega                | 1.517.000                            |
| 16       | Venezuela              | 1.484.000                            |
| 17       | Qatar                  | 1.464.000                            |
| 18       | Argelia                | 1.259.000                            |
| 19       | Libia                  | 1.039.000                            |
| 20       | Reino Unido            | 1.000.000                            |
| 21       | Omán                   | 979.000                              |
| 22       | Colombia               | 863.000                              |
| 23       | Azerbaiyán             | 798.000                              |
| 24       | Indonesia              | 772.000                              |
| 25       | India                  | 709.000                              |

Fuente: Fuente: Índice mundi, Petróleo-exportaciones, 2020

Entre los principales países productores de petróleo se encuentran Estados Unidos, Rusia y Arabia Saudí con cantidades importantes de producción que sobrepasan los 10 millones de barriles día

En las siguientes tablas se puede observar las Exportaciones e importaciones de petróleo mundialmente

**Tabla 3.2 Ranking de Países Exportadores de petróleo en el mundo**

| <b>Posición</b> | <b>País</b>            | <b>Petróleo - Exportaciones (barriles/día)</b> |
|-----------------|------------------------|--|
| 1               | Arabia Saudí           | 7.341.000                                      |
| 2               | Rusia                  | 4.921.000                                      |
| 3               | Irak                   | 3.092.000                                      |
| 4               | Canadá                 | 2.818.000                                      |
| 5               | Emiratos Árabes Unidos | 2.552.000                                      |
| 6               | Nigeria                | 2.096.000                                      |
| 7               | Angola                 | 1.782.000                                      |
| 8               | Venezuela              | 1.656.000                                      |
| 9               | Kazajistán             | 1.409.000                                      |
| 10              | Noruega                | 1.383.000                                      |
| 11              | México                 | 1.214.000                                      |
| 12              | Estados Unidos         | 1.158.000                                      |
| 13              | Qatar                  | 1.150.000                                      |
| 14              | Omán                   | 844.100  |
| 15              | Argelia                | 756.400  |
| 16              | Irán                   | 750.200  |
| 17              | Brasil                 | 736.600  |
| 18              | Colombia               | 726.700  |
| 19              | Azerbaiyán             | 718.800  |
| 20              | Reino Unido            | 710.600  |
| 21              | Kuwait                 | 479.700  |
| 22              | Ecuador                | 383.500  |
| 23              | Libia                  | 337.800  |
| 24              | Malasia                | 326.200  |
| 25              | Vietnam                | 324.600  |

Fuente: Índice mundi, Petróleo-exportaciones, 2020

**Tabla 3.3 Ranking de Países importadores de petróleo en el mundo**

| <b>Posición</b> | <b>País</b>    | <b>Petróleo - Importaciones<br/>(barriles/día)</b> |
|-----------------|----------------|--|
| 1               | Estados Unidos | 7.969.000  |
| 2               | China          | 6.710.000  |
| 3               | India          | 4.057.000  |
| 4               | Japón          | 3.208.000  |
| 5               | Corea del Sur  | 3.057.000  |
| 6               | Alemania       | 1.836.000  |
| 7               | Italia         | 1.341.000  |
| 8               | España         | 1.325.000  |
| 9               | Francia        | 1.147.000  |
| 10              | Países Bajos   | 1.094.000  |
| 11              | Reino Unido    | 907.100  |
| 12              | Tailandia      | 875.400  |
| 13              | Taiwán         | 846.400  |
| 14              | Canadá         | 806.700  |
| 15              | Singapur       | 783.300  |
| 16              | Bélgica        | 687.600  |
| 17              | Turquía        | 521.500  |
| 18              | Indonesia      | 498.500  |
| 19              | Polonia        | 493.100  |
| 20              | Grecia         | 484.300  |
| 21              | Rusia          | 468.400  |
| 22              | Sudáfrica      | 404.000  |
| 23              | Suecia         | 400.200  |
| 24              | Australia      | 341.700  |
| 25              | Brasil         | 297.700  |

Fuente: Fuente: Índice mundi, Petróleo-exportaciones, 2020

Se puede observar en la Tabla 3.3 y Tabla 3.2 que Estados Unidos es considerado como el mayor importador seguido de China e India a finales de 2019. A su vez Estados Unidos es el que mayor producción alcanzó a finales de ese año, lo que nos da a entender que es uno de los grandes consumidores de petróleo mundialmente. Además, que Arabia Saudí es el país más exportador de petróleo.

### 3.2 MERCADO NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Bolivia se caracteriza por ser un país gasífero con poca producción en petróleo y sus derivados, razón por la cual es difícil abastecer la demanda del mercado interno del país basándose en su propia producción.

#### 3.2.1 DEMANDA NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Bolivia se caracteriza por la ser un país gasífero con poca producción en petróleo y sus derivados, razón por la cual es difícil abastecer la demanda del mercado interno del país basándose en su propia producción. En la siguiente tabla se observa los volúmenes comercializados en el país para cubrir la demanda nacional entre los años 2005 – 2019

Tabla 3.4 Volumen comercializado de combustibles en Bolivia (2005 - 2019)

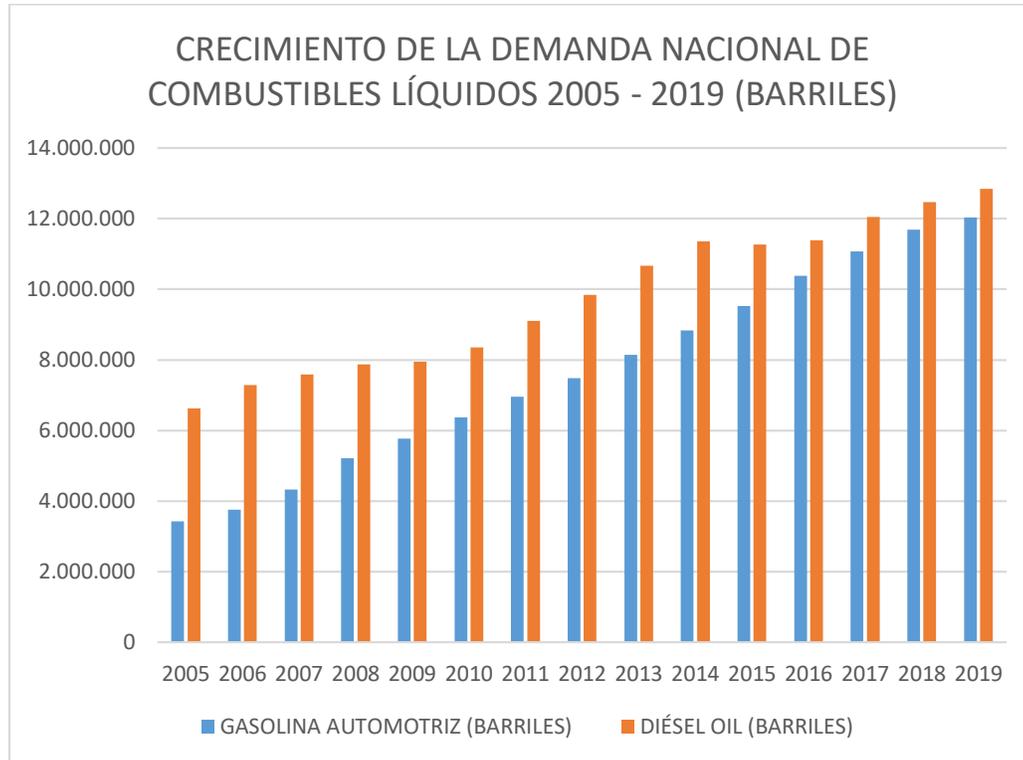
| VOLUMEN COMERCIALIZADO DE REFINADOS AL MERCADO INTERNO POR PRODUCTO, SEGÚN AÑO Y MES, 2005 - 2019 (BARRILES) |                     |                      |          |           |            |
|--|---------------------|----------------------|----------|-----------|------------|
| PERIODO  | GASOLINA AUTOMOTRIZ | GASOLINA DE AVIACIÓN | KEROSENO | JET FUEL  | DIÉSEL OIL |
| 2005   | 3.420.634           | 23.447               | 96.598   | 1.048.152 | 6.623.898  |
| 2006   | 3.748.953           | 26.107               | 91.573   | 1.049.228 | 7.280.394  |
| 2007   | 4.324.902           | 21.465               | 54.541   | 706.657   | 7.587.119  |
| 2008   | 5.212.592           | 9.864                | 14.969   | 228.245   | 7.869.854  |
| 2009   | 5.762.931           | 34.921               | 40.333   | 1.045.706 | 7.948.001  |
| 2010   | 6.365.733           | 32.449               | 45.841   | 1.051.562 | 8.350.942  |
| 2011   | 6.955.914           | 13.760               | 49.994   | 1.182.175 | 9.109.214  |
| 2012   | 7.476.810           | 8.677                | 47.479   | 1.052.081 | 9.835.619  |
| 2013   | 8.139.692           | 6.323                | 42.893   | 1.300.549 | 10.669.648 |
| 2014   | 8.834.372           | 5.344                | 46.471   | 1.412.477 | 11.361.155 |
| 2015   | 9.524.584           | 11.202               | 46.638   | 1.374.636 | 11.274.915 |
| 2016   | 10.380.598          | 29.923               | 42.971   | 1.410.317 | 11.384.654 |
| 2017   | 11.074.563          | 38.665               | 36.703   | 1.408.299 | 12.047.126 |
| 2018   | 11.696.105          | 41.260               | 38.102   | 1.334.126 | 12.474.346 |
| 2019   | 12.029.336          | 39.435               | 34.972   | 1.335.209 | 12.850.991 |

Fuente: Datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021

Los principales combustibles con mayor volumen comercializado dentro de los combustibles líquidos procedentes del refinado llegan a ser gasolina automotriz y diésel oíl que en los picos más altos de su comercialización sobrepasan los 12 millones de barriles al año

En los últimos años la demanda de combustibles líquidos principales que son la gasolina y el diésel han incrementado y siguen en constante incremento como se observa en la figura 3.1

**Figura 3.1 Crecimiento del volumen de la demanda de combustibles líquidos en el país**



Fuente: Datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021

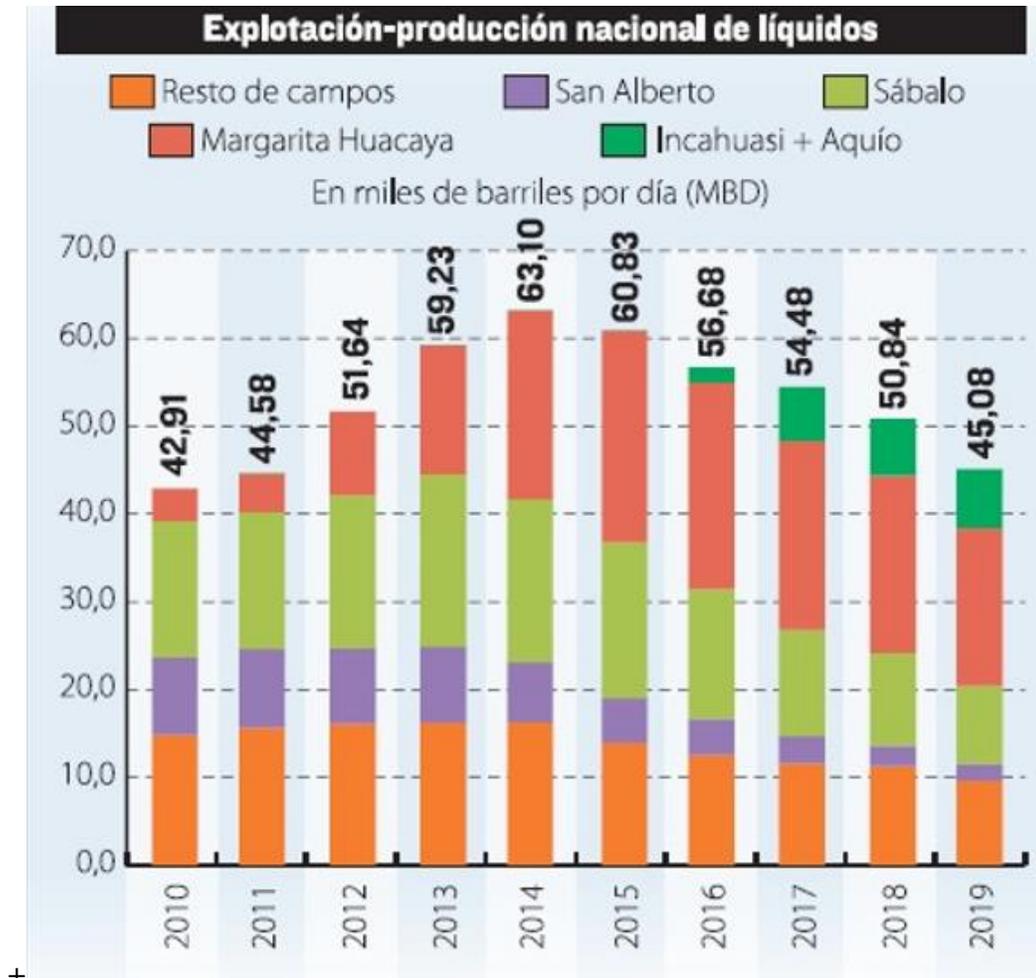
En la gráfica se observa que el crecimiento es constante, tomando estos valores se obtiene que el índice de crecimiento promedio en el volumen anual con relación al año anterior en el caso de la gasolina es de 9,47%, Mientras que el crecimiento promedio en volumen de diésel comercializado en el país con relación al año anterior es de 4,89%

### **3.2.2 OFERTA NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE PRODUCCIÓN NACIONAL**

la demanda junto con el insuficiente crecimiento en la producción Interna de combustibles líquidos dando una baja oferta para el mercado interno, han estado principalmente asociados a los precios internos de carburantes, que han sido fijados administrativamente en niveles muy por debajo de los precios internacionales de los combustibles.

En la siguiente figura se muestra la producción nacional de combustibles líquidos de los diferentes campos a lo largo de los años 2010 a 2019

**Figura 3.2 Explotación nacional de líquidos en Bolivia durante los años 2010 a 2019**



Fuente: Reporte de Producción, Ministerio de hidrocarburos, 2020

En la Figura 3.12 se puede observar la producción anual y los picos más altos entre 2010 a 2019 donde el más sobresaliente se encontraría en 2014 con 63,10 MBPD, a partir de la fecha se registró un descenso de los volúmenes de producción de petróleo y condensados, ocasionados por el agotamiento de los campos productores de petróleo, incrementando aun así más la demanda interna del país

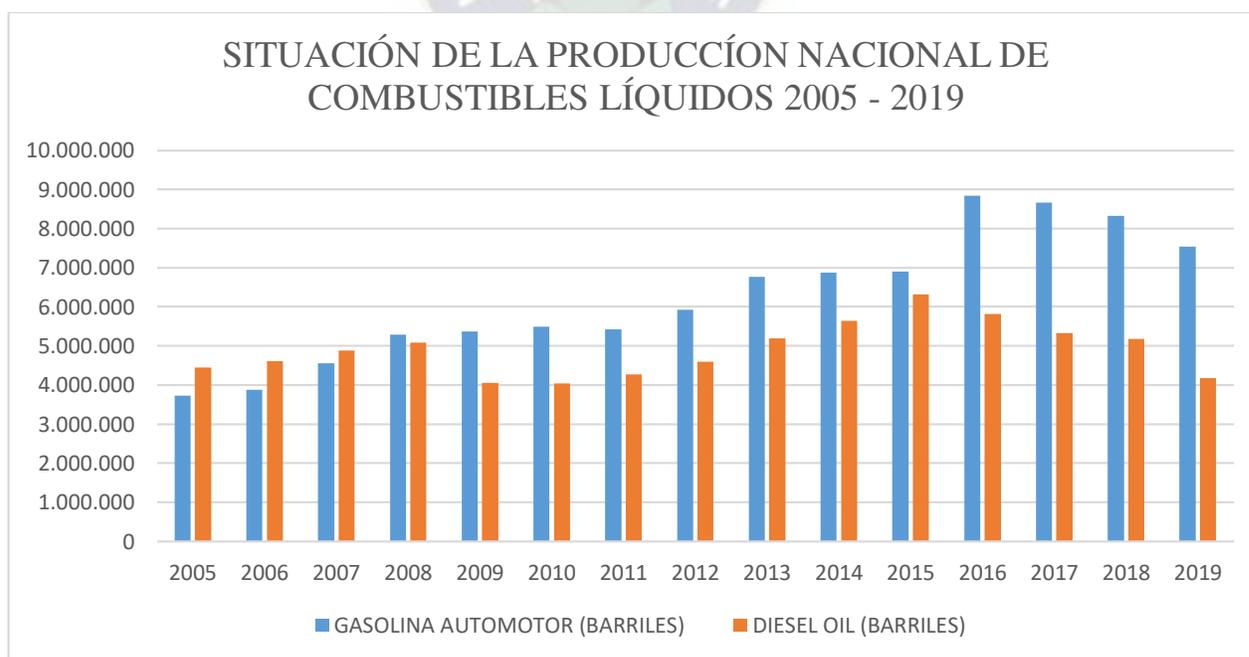
En la siguiente tabla se observa los volúmenes de producción de refinados de petróleo entre los años 2005 a 2019

**Tabla 3.5 Volúmenes de Producción nacional de refinados de petróleo durante 2005 a 2019**

| PRODUCCIÓN DE REFINADOS DE PETRÓLEO SEGÚN AÑO, 2005 - 2019 (BARRILES) |                    |                   |          |           |            |
|---|--------------------|-------------------|----------|-----------|------------|
| PERÍODO   | GASOLINA AUTOMOTOR | GASOLINA AVIACIÓN | KEROSENE | JET FUEL  | DIÉSEL OÍL |
| 2005  | 3.725.632          | 25.476            | 151.204  | 1.103.583 | 4.449.712  |
| 2006  | 3.876.633          | 28.019            | 153.062  | 1.076.448 | 4.614.623  |
| 2007  | 4.557.623          | 31.695            | 131.489  | 992.185   | 4.880.166  |
| 2008  | 5.290.867          | 39.514            | 118.967  | 1.022.389 | 5.077.252  |
| 2009  | 5.363.266          | 13.905            | 124.658  | 1.045.706 | 4.052.607  |
| 2010  | 5.491.458          | 4.050             | 127.223  | 1.095.725 | 4.035.287  |
| 2011  | 5.428.714          | 27.980            | 128.411  | 1.182.137 | 4.274.497  |
| 2012  | 5.925.665          | 45.193            | 121.591  | 1.052.048 | 4.590.852  |
| 2013  | 6.760.612          | 40.508            | 107.319  | 1.300.507 | 5.192.123  |
| 2014  | 6.876.818          | 48.704            | 117.645  | 1.412.432 | 5.646.338  |
| 2015  | 6.903.582          | 38.214            | 124.222  | 1.497.188 | 6.322.653  |
| 2016  | 8.848.210          | 33.648            | 138.638  | 1.480.652 | 5.820.586  |
| 2017  | 8.658.997          | 36.531            | 119.600  | 1.489.494 | 5.326.562  |
| 2018  | 8.330.568          | 42.450            | 138.990  | 1.397.875 | 5.174.557  |
| 2019  | 7.534.334          | 44.108            | 1595.674 | 1.385.642 | 4.180.075  |

Fuente: Datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021

**Figura 3.3 Situación de los volúmenes de producción anual entre los años 2005 a 2019**



Fuente: Datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021

En la tabla 3.5 se muestra los volúmenes de combustibles líquidos producidos del refinado de petróleo enfatizando en los principales combustibles que son la gasolina automotriz y el diésel, en la figura 3.3 se observa la inestabilidad en la producción de estos principales combustibles observando que la gasolina es más producida que el diésel

### 3.2.3 IMPORTACIÓN NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Bolivia al no tener suficiente cantidad de petróleo crudo para la refinación de los combustibles como Diésel Oíl, gasolina y otros derivados, debe realizar la importación para abastecer la demanda interna, que en la última década ha cobrado importancia en las finanzas del sector público, por la variación de precios del petróleo a nivel internacional que afecta directamente al costo de importación. Actualmente la situación no ha cambiado, la producción nacional de gasolina y diésel no llega a cubrir el 100% de la demanda interna del país, por lo que Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) se ve obligada a importar los líquidos a precios internacionales y a comercializarlos a un costo subvencionado en el mercado interno.

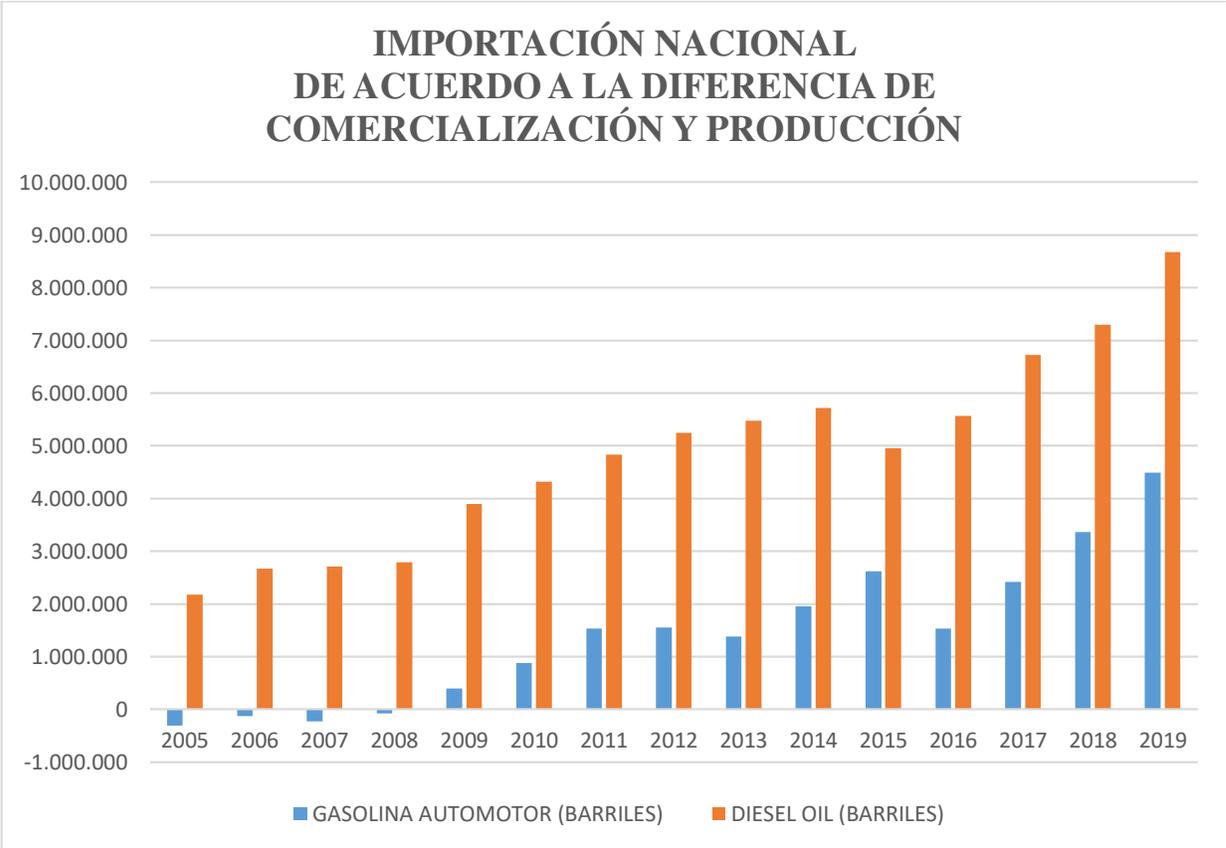
**Tabla 3.6 Volúmenes de importación nacional de combustibles líquidos 2005 a 2019**

| <b>IMPORTACIÓN NACIONAL DE COMBUSTIBLE LÍQUIDOS DE ACUERDO A LA DIFERENCIA DE VOLÚMENES DE COMERCIALIZACIÓN Y VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN (BARRILES)</b> |                           |                          |                 |                 |                   |
|--|---------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| <b>PERÍODO</b>   | <b>GASOLINA AUTOMOTOR</b> | <b>GASOLINA AVIACIÓN</b> | <b>KEROSENE</b> | <b>JET FUEL</b> | <b>DIÉSEL OÍL</b> |
| 2005   | -304.998                  | -2.029                   | -54.606         | -55.431         | 2.174.186         |
| 2006   | -127.680                  | -1.912                   | -61.490         | -27.220         | 2.665.771         |
| 2007   | -232.721                  | -10.230                  | -76.948         | -285.528        | 2.706.953         |
| 2008   | -78.275                   | -29.650                  | -103.998        | -794.144        | 2.792.602         |
| 2009   | 399.665                   | 21.015                   | -84.324         | 0               | 3.895.394         |
| 2010   | 874.275                   | 28.399                   | -81.382         | -44.163         | 4.315.654         |
| 2011   | 1.527.200                 | -14.220                  | -78.417         | 38              | 4.834.717         |
| 2012   | 1.551.145                 | -36.516                  | -74.112         | 33              | 5.244.767         |
| 2013   | 1.379.080                 | -34.185                  | -64.426         | 41              | 5.477.525         |
| 2014   | 1.957.553                 | -43.359                  | -71.174         | 45              | 5.714.817         |
| 2015   | 2.621.002                 | -27.012                  | -77.584         | -122.553        | 4.952.262         |
| 2016   | 1.532.389                 | -3.724                   | -95.667         | -70.334         | 5.564.068         |
| 2017   | 2.415.566                 | 2.134                    | -82.897         | -81.196         | 6.720.564         |
| 2018   | 3.365.537                 | -1.190                   | -100.888        | -63.749         | 7.299.790         |
| 2019   | 4.495.002                 | -4.674                   | -120.702        | -50.433         | 8.670.916         |

Fuente: Datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021

En la tabla 3.6 se puede observar los volúmenes de importación de combustibles líquidos realizados durante los años 2005 a 2019 procedentes de la diferencia de los volúmenes de comercialización y la producción de combustibles líquidos nacional. En el siguiente gráfico se puede observar el crecimiento de los volúmenes de importación de los principales combustibles líquidos que son la gasolina y el diésel.

**Figura 3.4 Importación de combustibles líquidos en Bolivia**

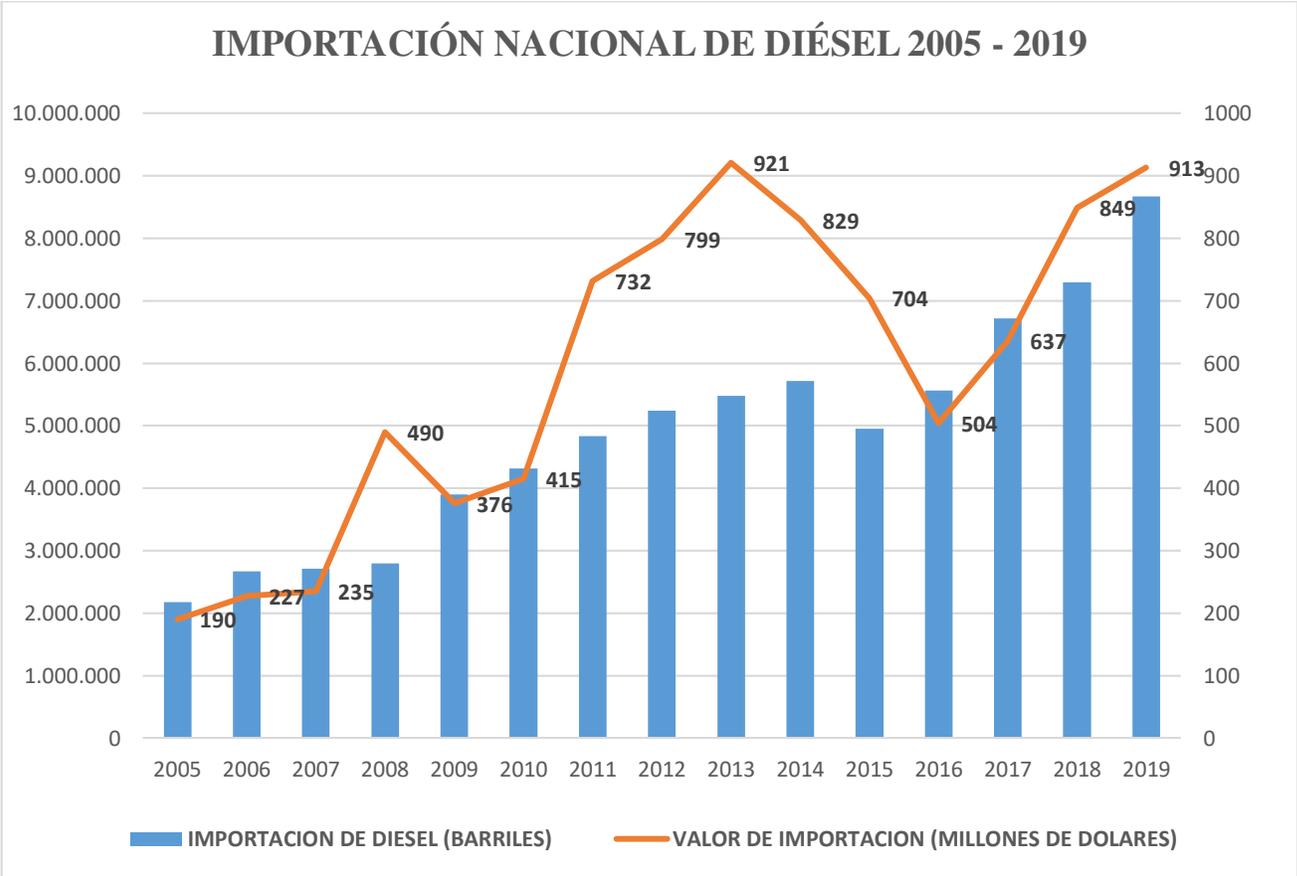


Fuente: Datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2021

De acuerdo a los datos del Ministerio de Hidrocarburos en el 2019, el principal consumidor de diésel en Bolivia sería por parte del sector de transporte con el 86,5% seguido del sector agropecuario y minería con el 7,3% continuando con el sector de construcción con el 4.8% y finalmente el sector industrial con el 1.1%

Entre los años 2005 y 2019, la importación nacional de diésel sumo 8821 millones de dólares, logrando su pico máximo en el 2019 con 913 millones de dólares como se muestra en la siguiente figura

**Figura 3.5 Evolución de importaciones de diésel periodo 2005 - 2020**



Fuente: Instituto Boliviano de comercio exterior IBCE, 2020

En la Figura 3.5 el volumen de diésel importado incrementa o en el mejor caso se mantiene aproximado al año anterior. Los principales de los cuales es importado el diésel en Bolivia en el año 2020 fueron Argentina con una participación del 21%, seguido de Chile con 20% y Estados Unidos con 15%

En la siguiente tabla se pretende calcular el crecimiento del volumen anual con respecto al anterior año y con este dato estimar los posibles volúmenes de importación de diésel hasta el año 2030

**Tabla 3.7 Crecimiento de los volúmenes de importación anuales con respecto al volumen del año anterior**

| PERIODO                     | IMPORTACIÓN DE DIÉSEL (BARRILES) | CRECIMIENTO CON RESPECTO AL ANTERIOR AÑO (%) | PERIODO | IMPORTACIÓN DE DIÉSEL CON EL CRECIMIENTO PROMEDIO CALCULADO (BARRILES) |
|-----------------------------|----------------------------------|--|---------|--|
| 2005                        | 2.174.186                        |  | 2019    | 8.670.916  |
| 2006                        | 2.665.771                        | 22.6   | 2020    | 9.624.717  |
| 2007                        | 2.706.953                        | 1.5  | 2021    | 10.683.436   |
| 2008                        | 2.792.602                        | 3.2  | 2022    | 11.858.614   |
| 2009                        | 3.895.394                        | 39.5   | 2023    | 13.163.062   |
| 2010                        | 4.315.654                        | 10.8   | 2024    | 14.610.998   |
| 2011                        | 4.834.717                        | 12.0   | 2025    | 16.218.208   |
| 2012                        | 5.244.767                        | 8.5  | 2026    | 18.002.211   |
| 2013                        | 5.477.525                        | 4.4  | 2027    | 19.982.454   |
| 2014                        | 5.714.817                        | 4.3  | 2028    | 22.180.524   |
| 2015                        | 4.952.262                        | 13.3   | 2029    | 24.620.382   |
| 2016                        | 5.564.068                        | 12.4   | 2030    | 27.328.624   |
| 2017                        | 6.720.564                        | 20.8   |         |  |
| 2018                        | 7.299.790                        | 8.6  |         |  |
| 2019                        | 8.670.916                        | 18.8   |         |  |
| <b>CRECIMIENTO PROMEDIO</b> |                                  | <b>11.0</b>                                  |         |  |

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados del Instituto Nacional de Estadística (INE)

El promedio del crecimiento del volumen de importación nacional de diésel es de 11% en relación al anterior año tomando en cuenta los valores de volúmenes recopilados de 2005 a 2019. Tomando en cuenta el valor del crecimiento promedio anual en los volúmenes de importación el 2030 el volumen que será necesario importar para cubrir el mercado interno del país tendrá un valor aproximado de 27.328 millones de barriles

## CAPÍTULO 4 APLICACIÓN PRÁCTICA

### 4.1 SISTEMA DE REACCIÓN

#### 4.1.1 TIPO DE REACCIÓN

Una reacción química es un proceso por el cual dos o más sustancias puestas en contacto reaccionan entre sí o ejercen su actividad para formar una sustancia determinada, es decir ocurre un reordenamiento o redistribución de los átomos para formar nuevas moléculas. Existen diversas formas de clasificar una reacción entre ellas están por su mecanismo, por su reactividad, por su intercambio energético y por su tipo de fase.

Por su mecanismo se puede clasificar en:

- Reacción de síntesis
- Reacción de descomposición
- Reacción de Simple sustitución
- Reacción de Doble sustitución

Por su reactividad se puede clasificar en:

- Reacción reversible
- Reacción irreversible

Por su intercambio energético

- Reacción endotérmica
- Reacción exotérmica

La Pirolisis Térmica de polímeros es un proceso que involucra reacciones de descomposición de forma irreversible, endotérmica, no catalítica

#### 4.1.2 CINÉTICA DE LA REACCIÓN

La cinética de reacciones químicas trata principalmente del estudio de la velocidad de reacción considerando todos los factores que influyen sobre ella y explicando la causa de la magnitud de esa velocidad de reacción. (Coronel, 2009)

La descripción de las reacciones de descomposición durante la degradación de los plásticos es bastante difícil, porque el proceso en si es muy complejo, además se considera que existen

factores que influncian en la degradación térmica ya que puede ocurrir en ausencia o presencia de catalizadores, así como también otro factor importante es el tipo de reactor, el tipo de plástico y la cantidad. (OCTave Lévensele, ingeniería de reacciones, 1986)

#### 4.1.2.1 ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN

La velocidad de reacción se define como la velocidad a la cual desaparece el o los reactivos y a su vez se forman productos en un lapso de tiempo, esta variable es dependiente de otras variables del sistema como la temperatura, presión, conversión, concentraciones de reactivos, etc. (Contreras Canteros, 2014).

$$(-r_A) = KC_A^n \quad (4.1)$$

Donde:

$r_A$ : Velocidad de reacción (mol / L s)

$K$ : constante de velocidad de reacción

$C_A$ : concentración del reactivo (mol / L s)

$n$ : orden de reacción (adimensional)

La ecuación de la velocidad de reacción también puede ser expresada de manera diferencial de la siguiente manera:

$$(r_A) = -\frac{dC_A}{dt} \quad (4.2)$$

$r_A$ : Velocidad de reacción (mol / L s)

$\frac{dC_A}{dt}$ : Variación de la concentración del reactivo con respecto al tiempo

La ecuación también expresa que expresa la variación o desaparición de la concentración del reactivo a lo largo del tiempo.

##### 4.1.2.1.1 ORDEN DE REACCIÓN (n)

El orden de reacción es el factor exponencial que acompaña a la concentración en la ecuación de velocidad, el cual puede estar relacionado con la estequiometria dependiendo si la reacción es elemental o no elemental de la reacción (Contreras Canteros, 2014).

#### 4.1.2.1.2 CONSTANTE DE VELOCIDAD (K)

Constante representada por la letra K, que relaciona la velocidad con las concentraciones de los reactivos en la ecuación de velocidad. (Contreras Canteros, 2014).

#### 4.1.2.2 ECUACIÓN DE ARRHENIUS

La ecuación fue propuesta primeramente por el químico neerlandés J. H. van 't Hoff en 1884; cinco años después en 1889 el químico sueco Svante Arrhenius dio una justificación física y una interpretación para la ecuación. Actualmente, es vista mejor como una empírica. Puede usarse para modelar la variación de temperatura de coeficientes de difusión, población de vacantes cristalinas, velocidad de fluencia y muchas otras reacciones o procesos inducidos térmicamente

$$K = A * e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (4.3)$$

Donde:

K: Constante de velocidad de reacción

A: Factor Pre Exponencial

$E_A$ : Energía de Activación

R: Constante Universal de los Gases

T: Temperatura

#### 4.1.2.2.1 ENERGÍA DE ACTIVACIÓN ( $E_A$ )

La energía de activación es la energía necesaria para que los reactivos formen el complejo activado durante una reacción y representa la barrera de energía que han de salvar las moléculas para que tenga lugar la reacción. Cuando ocurren los choques moleculares, parte de la energía cinética puede convertirse en energía potencial. Para que un choque entre las moléculas sea efectivo y genere una reacción satisfactoria, es necesario que la energía cinética de las moléculas sea superior a la energía de activación. Generalmente es la magnitud de la energía de activación el factor que tiene mayor influencia sobre la velocidad de la reacción (Contreras Canteros, 2014).

#### 4.1.2.2 FACTOR PRE EXPONENCIAL (A)

También llamado factor de frecuencia o pre exponencial (Universidad de Alcalá, 2019) Es un índice relacionado con la frecuencia de las colisiones entre las moléculas de reactivos y sus unidades dependerán de las de K.

#### 4.1.3 CÁLCULO DE LA CINÉTICA DE LA REACCIÓN

Antes de realizar el diseño del reactor, primero se debe definir las ecuaciones cinéticas del proceso. En la parte de selección de materia prima, se decidió que de todos los termoplásticos se utilizaran solo Poliestireno, Polipropileno y Polietileno como alimentación para del reactor. Por esta razón procederemos a definir las ecuaciones cinéticas para dichos polímeros.

##### 4.1.3.1 CÁLCULO DE LA ECUACIÓN CINÉTICA DEL POLIESTIRENO (PS)

Para poder hallar los parámetros cinéticos del poliestireno que llegarían a ser la energía de activación, la constante de velocidad y el orden de la reacción nos basamos en un análisis termogravimétrico. El estudio análisis TGA describe el comportamiento del Poliestireno reciclado frente a la degradación térmica por un incremento de la temperatura constante (Gradiente de temperatura) en un lapso de tiempo

**Tabla 4.1 Análisis termogravimétrico de Poliestireno**

| Variación de la masa de Poliestireno con respecto al tiempo y temperatura |                |               |       |            |           |
|---|----------------|---------------|-------|------------|-----------|
| Tiempo (min)  | Temperatura °C | Temperatura K | Peso% | Conversión | DGT       |
| 63.60   | 343.00         | 616.00        | 98.70 | 0          | -1.28E-03 |
| 65.37   | 351.83         | 624.83        | 78.95 | 0.18       | -2.19E-03 |
| 67.13   | 360.67         | 633.67        | 68.57 | 0.29       | -3.13E-03 |
| 68.90   | 369.50         | 642.50        | 45.58 | 0.48       | -5.38E-03 |
| 70.67   | 378.33         | 651.33        | 30.55 | 0.61       | -1.11E-02 |
| 72.43   | 387.17         | 660.17        | 22.33 | 0.77       | -1.89E-02 |
| 74.20   | 396.00         | 669.00        | 16.01 | 0.81       | -2.50E-02 |
| 75.97   | 404.83         | 677.83        | 13.24 | 0.87       | -2.52E-02 |
| 77.73   | 413.67         | 686.67        | 10.62 | 0.91       | -2.66E-02 |
| 79.50   | 422.50         | 695.50        | 7.62  | 0.95       | -2.75E-02 |

Fuente: Samaniego Ashlyn, kinetic study of plastic decomposition 2020

#### Método diferencial

Se procede a realizar la regresión lineal con los datos del análisis TGA, pero antes debe definirse la ecuación para la regresión a partir de las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 para el Poliestireno

$$K_{PS} = A * e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (4.4)$$

$$(-r_{PS}) = K C_{PS}^n \quad (4.5)$$

$$(r_{PS}) = -\frac{dC_{PS}}{dt} \quad (4.6)$$

Se modifica la ecuación agregándole variable del gradiente de temperatura utilizado en el análisis TGA

$$\nabla_T = \beta \frac{\Delta t}{\Delta T} = \beta \frac{dt}{dT} \quad (4.7)$$

Donde:

$\beta$  = valor del gradiente de temperatura

$\Delta t$  = variación del tiempo

$\Delta T$  = variación de la temperatura

$$(r_{PS}) = -\left(\beta \frac{dt}{dT}\right) \frac{dC_{PS}}{dt}$$

Simplificado  $dt$  se obtiene la siguiente ecuación

$$(r_{PS}) = -\beta \frac{dC_{PS}}{dT} \quad (4.8)$$

Además, se realiza un balance de masa para la ecuación de reacción del Poliestireno no determinada

|   |                       |   |                 |   |                 |   |       |                 |
|---|-----------------------|---|-----------------|---|-----------------|---|-------|-----------------|
| CONCENTRACIÓN   | Poliestireno          | → | $P_1$           | + | $P_2$           | + | ..... | $P_n$           |
| Concentración inicial en tiempo = 0 y conversión = 0        | $C_{PS0}$             |   |                 |   |                 |   |       |                 |
| Concentración perdida en tiempo = t y conversión = $X_{PS}$ | $C_{PS0}X_{PS}$       |   | $C_{P10}X_{P1}$ |   | $C_{P20}X_{P2}$ |   |       | $C_{PN0}X_{PN}$ |
| Concentración restante en tiempo = t                        | $C_{PS0}(1 - X_{PS})$ |   |                 |   |                 |   |       |                 |

Del balance de concentración del Polietileno (PS) se obtiene que:

$$C_{PS} = C_{PS0}(1 - X_{PS}) \quad (4.9)$$

Remplazando la ecuación 6.6 en la ecuación 6.8 se tiene

$$-\beta \frac{dC_{PS}}{dT} = KC_{PS}^n \quad (4.10)$$

Remplazando la ecuación 6.4 en la ecuación 6.10 se tiene

$$-\beta \frac{dC_{PS}}{dT} = A * e^{-\frac{E_A}{RT}} C_{PS}^n \quad (4.11)$$

Derivando la ecuación 6.9

$$d(C_{PS}) = d(C_{PS0}(1 - X_{PS}))$$

$$dC_{PS} - C_{PS0}dX_{PS}$$

Remplazando en la ecuación 6.11

$$\beta \frac{C_{PS0}dX_{PS}}{dT} = A * e^{-\frac{E_A}{RT}} * (C_{PS0}(1 - X_{PS}))^n$$

Tratándose de polímeros se asume el orden de reacción "n" como 1

$$\beta \frac{C_{PS0}dX_{PS}}{dT} = A * e^{-\frac{E_A}{RT}} * C_{PS0}(1 - X_{PS})$$

Simplificando  $C_{PS0}$  y re ordenando la ecuación

$$\frac{dX_{PS}}{dT} = \frac{A}{\beta} * e^{-\frac{E_A}{RT}} * (1 - X_{PS})$$

$$\frac{dX_{PS}}{(1 - X_{PS})} = \frac{A}{\beta} * e^{-\frac{E_A}{RT}} * dT$$

Cambiamos los diferenciales que pueden ser expresados por  $\Delta X_{PS}$  y  $\Delta T$

$$\frac{\Delta X_{PS}}{(1 - X_{PS})} = \frac{A}{\beta} * e^{-\frac{E_A}{RT}} * \Delta T \quad (4.12)$$

$$\frac{\Delta X_{PS}}{(1 - X_{PS})} = \left( \Delta T \frac{A}{\beta} \right) * e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

Se aplica logaritmo neperiano para linealizar la ecuación de la forma  $y = bx + a$

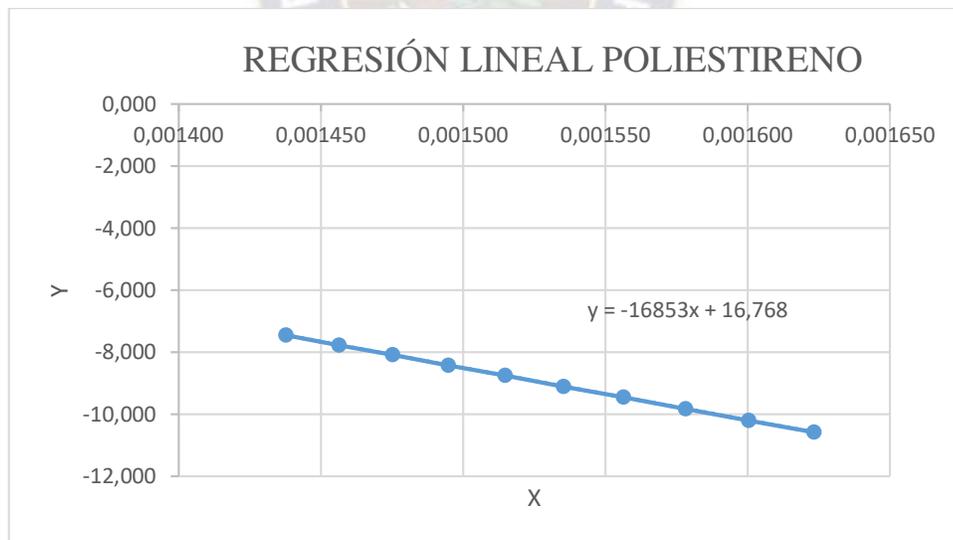
$$\ln\left(\frac{\Delta X_{PS}}{(1 - X_{PS})}\right) = \left(-\frac{E_A}{R}\right)\frac{1}{T} + \ln\left(\Delta T \frac{A}{\beta}\right) \quad (4.13)$$

$$Y = bX + a$$

Utilizando los valores de la tabla 4.1 en la ecuación se realiza la regresión lineal

| Y       | X        |
|---------|----------|
| -10.591 | 0.001623 |
| -10.204 | 0.001600 |
| -9.828  | 0.001578 |
| -9.462  | 0.001556 |
| -9.107  | 0.001535 |
| -8.760  | 0.001515 |
| -8.423  | 0.001495 |
| -8.095  | 0.001475 |
| -7.775  | 0.001456 |
| -7.463  | 0.001438 |

Figura 4.1 Regresión lineal del polietileno



Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de análisis TGA de Poliestireno

De la regresión lineal se obtiene la siguiente ecuación

$$Y = -16853X + 16.768$$

$$Y = bX + a$$

De la regresión lineal se obtienen los siguientes valores de a y b

$$n = 0.996$$

$$a = 16.768$$

$$b = -16853$$

Comparando los valores obtenidos para “a”

$$a = \ln\left(\Delta T \frac{A}{\beta}\right)$$

El valor de  $\beta$  se obtiene de la de la relación entre la temperatura al inicio de la conversión y el tiempo transcurrido hasta ese momento, ambos valores son los primeros valores de tiempo (T) y temperatura (t) en °C en la tabla 4.1 Los valores son T = 63.3 min y t = 616 K

$$\beta = \frac{t}{T} = \frac{616}{63.3} = 9.7$$

Remplazando el valor de  $\beta$  en la ecuación

$$a = 16.768 = \ln\left(1.77 * \frac{A}{9.7}\right)$$

$$A = 1.0497 * 10^8 \text{ s}^{-1}$$

Comparando los valores obtenidos para “a”

$$b = \left(-\frac{E_A}{R}\right)$$

$$b = -16852.89 = \left(-\frac{E_A}{8.314}\right)$$

$$E_A = 140115 \text{ J/mol}$$

Remplazamos los datos hallados de la regresión lineal en la ecuación 4.3

$$K = A * e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

$$K = 1.0497 * 10^8 \text{ (s}^{-1}\text{)} * e^{-\frac{140115 \text{ (j/mol)}}{695 \text{ (K)} * 8.314 \text{ (J/molK)}}$$

$$K = 0.0030899 \text{ s}^{-1}$$

Remplazando en la ecuación obtenemos la ecuación cinética de primer orden ( $n = 1$ ) del Poliestireno

$$(-r_{PS}) = K C_{PS}^n$$

$$(-r_{PS}) = 0.0030899 C_{PS}$$

#### 4.1.3.2 CÁLCULO DE LA ECUACIÓN CINÉTICA DEL POLIPROPILENO (PP)

Para poder hallar los parámetros cinéticos del poliestireno nos basamos en un análisis termogravimétrico. El estudio análisis TGA describe el comportamiento del Poliestireno reciclado frente a la degradación térmica por un incremento de la temperatura constante (Gradiente de temperatura) en un lapso de tiempo

**Tabla 4.2 Análisis termogravimétrico de Polipropileno**

| Variación de la masa de Polipropileno con respecto al tiempo y temperatura |                |               |       |            |           |
|--|----------------|---------------|-------|------------|-----------|
| Tiempo (min)   | Temperatura °C | Temperatura K | Peso% | Conversión | DGT       |
| 46.00  | 351.83         | 624.83        | 99.80 | 0          | -6.91E-04 |
| 50.10  | 369.50         | 642.50        | 77.65 | 0.21       | -2.53E-03 |
| 54.20  | 378.33         | 651.33        | 61.55 | 0.39       | -5.37E-03 |
| 58.30  | 387.17         | 660.17        | 45.89 | 0.51       | -1.24E-02 |
| 62.40  | 396.00         | 669.00        | 38.47 | 0.68       | -2.80E-02 |
| 66.50  | 404.83         | 677.83        | 25.98 | 0.77       | -5.01E-03 |
| 70.60  | 413.67         | 686.67        | 20.88 | 0.81       | -5.38E-02 |
| 74.70  | 422.50         | 695.50        | 16.94 | 0.87       | -6.96E-02 |
| 78.80  | 431.33         | 704.33        | 11.56 | 0.91       | -7.66E-02 |
| 82.90  | 440.17         | 713.17        | 8.65  | 0.95       | -6.88E-02 |

Fuente: Samaniego Ashlyn, kinetic study of plastic decomposition 2020

Al igual que para el Polipropileno se utilizará el método diferencial para realizar la regresión lineal de los datos procedentes del análisis de TGA para el Polipropileno.

Utilizando la ecuación 4.12 para el Polipropileno (PP)

$$\frac{\Delta X_{PP}}{(1 - X_{PP})} = \left( \Delta T \frac{A}{\beta} \right) * e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (4.14)$$

Se aplica logaritmo neperiano para linealizar la ecuación de la forma  $y = a + bx$

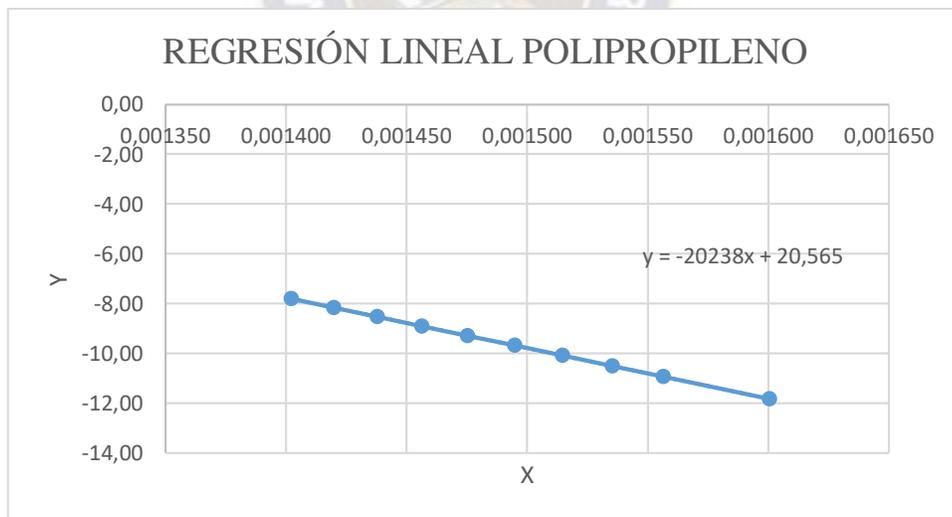
$$\ln\left(\frac{\Delta X_{PP}}{(1 - X_{PP})}\right) = \left(-\frac{E_A}{R}\right)\frac{1}{T} + \ln\left(\Delta T \frac{A}{\beta}\right)$$

$$Y = bX + a$$

Utilizando los valores de la tabla 4.2 en la ecuación se realiza la regresión lineal

| Y      | X        |
|--------|----------|
| -11.82 | 0.001600 |
| -10.93 | 0.001556 |
| -10.51 | 0.001535 |
| -10.09 | 0.001515 |
| -9.69  | 0.001495 |
| -9.29  | 0.001475 |
| -8.91  | 0.001456 |
| -8.53  | 0.001438 |
| -8.17  | 0.001420 |
| -7.81  | 0.001402 |

**Figura 4.2 Regresión lineal del polipropileno**



Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de análisis TGA de Polipropileno

De la regresión lineal se obtiene la siguiente ecuación

$$Y = -20238X + 20.565$$

$$Y = bX + a$$

De la regresión lineal se obtienen los siguientes valores de a y b

$$n = 0.997$$

$$a = 20.565$$

$$b = -20238$$

Comparando los valores obtenidos para “a”

$$a = \ln\left(\Delta T \frac{A}{\beta}\right)$$

El valor de  $\beta$  se obtiene de la de la relación entre la temperatura al inicio de la conversión y el tiempo transcurrido hasta ese momento, ambos valores son los primeros valores de tiempo (T) y temperatura (t) en °C en la tabla 4.2. Los valores son T = 46 min y t = 624.83 K

$$\beta = \frac{t}{T} = \frac{624.83}{46} = 13.58$$

Remplazando el valor de  $\beta$  en la ecuación

$$a = 20.895 = \ln\left(4.1 * \frac{A}{13.58}\right)$$

$$A = 2.8266 * 10^9 s^{-1}$$

Comparando los valores obtenidos para “a”

$$b = \left(-\frac{E_A}{R}\right)$$

$$b = -20237.911 = \left(-\frac{E_A}{8.314}\right)$$

$$E_A = 168258 J/mol$$

Remplazamos los datos hallados de la regresión lineal en la ecuación 4.3

$$K = A * e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

$$K = 2.8266 * 10^9 (s^{-1}) * e^{-\frac{168258 (j/mol)}{713(K)*8.314 (J/molK)}}$$

$$K = 0.0013309 \text{ s}^{-1}$$

Remplazando en la ecuación obtenemos la ecuación cinética de primer orden ( $n = 1$ ) del Polipropileno

$$N = 1$$

$$(-r_{PS}) = K C_{PP}^n$$

$$(-r_{PS}) = 0.0013309 C_{PP}$$

#### 4.1.3.3 CÁLCULO DE LA ECUACIÓN CINÉTICA DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

Para poder hallar los parámetros cinéticos del poliestireno nos basamos en un análisis termogravimétrico. El estudio análisis TGA describe el comportamiento del Poliestireno reciclado frente a la degradación térmica por un incremento de la temperatura constante (Gradiente de temperatura) en un lapso de tiempo

**Tabla 4.3 Análisis termogravimétrico de Polietileno de alta densidad**

Variación de la masa de Polietileno con respecto al tiempo y temperatura

| Tiempo (min) | Temperatura °C | Temperatura K | Peso% | Conversión | DGT       |
|--------------|----------------|---------------|-------|------------|-----------|
| 50.00        | 325.33         | 598.33        | 95.70 | 0.06       | -3.18E-04 |
| 53.30        | 334.17         | 607.17        | 82.10 | 0.12       | -3.35E-04 |
| 56.60        | 343.00         | 616.00        | 70.51 | 0.27       | -5.01E-04 |
| 59.90        | 351.83         | 624.83        | 59.37 | 0.39       | -6.91E-04 |
| 63.20        | 369.50         | 642.50        | 43.21 | 0.48       | -2.53E-03 |
| 66.50        | 378.33         | 651.33        | 36.15 | 0.65       | -5.37E-03 |
| 69.80        | 387.17         | 660.17        | 30.47 | 0.76       | -1.24E-02 |
| 73.10        | 396.00         | 669.00        | 24.49 | 0.82       | -2.80E-02 |
| 76.40        | 404.83         | 677.83        | 22.56 | 0.85       | -5.01E-03 |
| 79.70        | 413.67         | 686.67        | 19.11 | 0.89       | -5.38E-02 |

Fuente: Samaniego Ashlyn, kinetic study of plastic descomposition 2020

Al igual que para el Polipropileno se utilizará el método diferencial para realizar la regresión lineal de los datos procedentes del análisis de TGA para el Polietileno.

Utilizando la ecuación 4.12 para el Polipropileno (PP)

$$\frac{\Delta X_{PE}}{(1 - X_{PE})} = \left( \Delta T \frac{A}{\beta} \right) * e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (4.15)$$

Se aplica logaritmo neperiano para linealizar la ecuación de la forma  $y = a + bx$

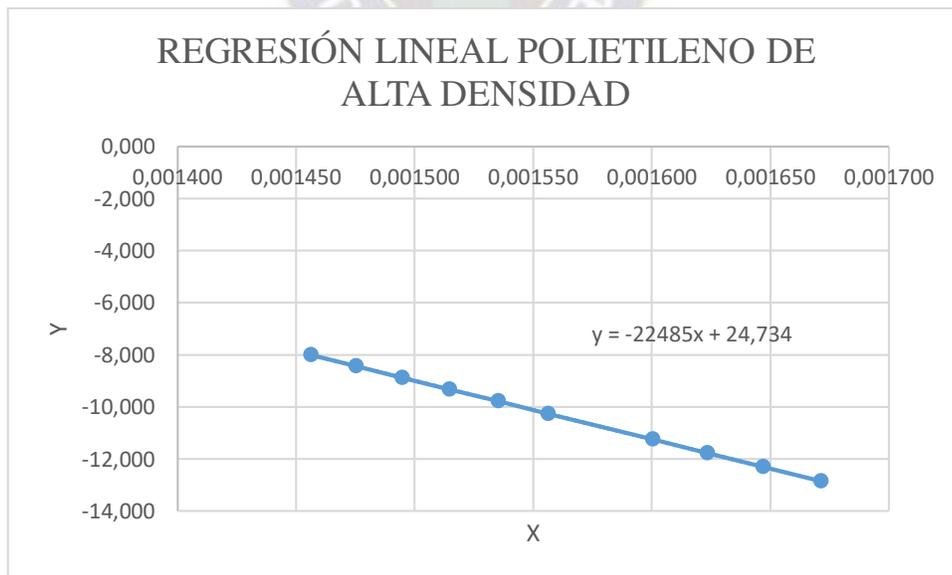
$$\ln\left(\frac{\Delta X_{PE}}{(1 - X_{PE})}\right) = \left(-\frac{E_A}{R}\right)\frac{1}{T} + \ln\left(\Delta T \frac{A}{\beta}\right)$$

$$Y = bX + a$$

Utilizando los valores de la tabla 4.3 en la ecuación se realiza la regresión lineal

| Y       | X        |
|---------|----------|
| -12.846 | 0.001671 |
| -12.298 | 0.001647 |
| -11.768 | 0.001623 |
| -11.252 | 0.001600 |
| -10.262 | 0.001556 |
| -9.788  | 0.001535 |
| -9.325  | 0.001515 |
| -8.876  | 0.001495 |
| -8.438  | 0.001475 |
| -8.011  | 0.001456 |

**Figura 4.3 Regresión lineal del polietileno de alta densidad**



Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de análisis TGA de Polietileno de alta densidad

De la regresión lineal se obtiene la siguiente ecuación lineal

$$Y = -22485X + 24.734$$

$$Y = bX + a$$

De la ecuación lineal comparado con la ecuación XX se obtienen las siguientes igualdades de a y b

$$n = 0.998$$

$$a = 24.734$$

$$b = -22485$$

Comparando los valores obtenidos para “a”

$$a = \ln\left(\Delta T \frac{A}{\beta}\right)$$

El valor de  $\beta$  se obtiene de la de la relación entre la temperatura al inicio de la conversión y el tiempo transcurrido hasta ese momento, ambos valores son los primeros valores de tiempo (T) y temperatura (t) en K en la tabla 4.3. Los valores son T = 50 min y t = 598.33 K

$$\beta = \frac{t}{T} = \frac{598.33}{50} = 11.96$$

Remplazando el valor de  $\beta$  en la ecuación

$$a = 24.734 = \ln\left(3.3 * \frac{A}{11.96}\right)$$

$$A = 2.00726 * 10^{11} \text{ s}^{-1}$$

Comparando los valores obtenidos para “a”

$$b = \left(-\frac{E_A}{R}\right)$$

$$b = -22485 = \left(-\frac{E_A}{8.314}\right)$$

$$E_A = 186940 \text{ J/mol}$$

Remplazamos los datos hallados de la regresión lineal en la ecuación 4.3

$$K = A * e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

$$K = 2.00726 * 10^{11} (s^{-1}) * e^{-\frac{186940(j/mol)}{687(K)*8.314 (J/molK)}}$$

$$K = 0.001226 s^{-1}$$

Remplazando en la ecuación obtenemos la ecuación cinética de primer orden ( $n = 1$ ) del Polietileno de alta densidad

$$N = 1$$

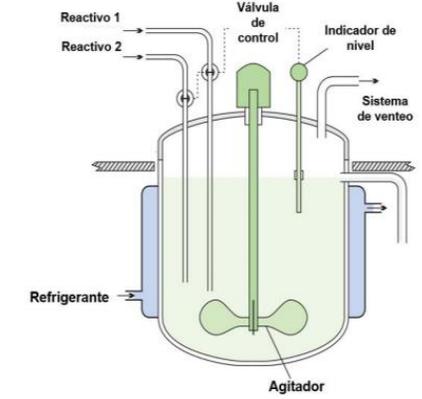
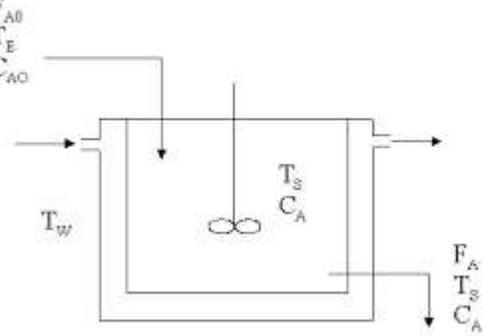
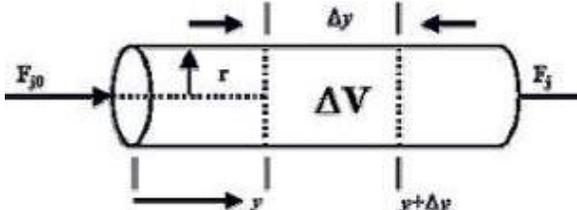
$$(-r_{PS}) = K C_{HDPE}^n$$

$$(-r_{PS}) = 0.001226 C_{HDPE}$$

#### 4.1.4 CRITERIO DE SELECCIÓN DE REACTOR

Al momento de seleccionar un reactor para un proceso químico se debe priorizar las necesidades de la reacción. A continuación, se muestra los reactores y sus correspondientes ecuaciones de diseño en la figura.

Tabla 4.4 Tipos de Reactores Químicos en la industria

| TIPOS DE REACTORES                       | ECUACIONES DE DISEÑO  | FORMA  |
|--|---|--|
| <p>BATCH<br/>DISCONTINUO</p>             | $\frac{dX_A}{dt} = \frac{-r_A v}{N_{A0}}$ $t_C = t_A + t_{CAL} + t_R$ <p><math>t_A</math> = tiempo de alimentación</p> <p><math>t_{CAL}</math> = tiempo de calentamiento</p> <p><math>t_R</math> = tiempo de reacción</p> |    |
| <p>CSTR<br/>ESTACIONARIO</p>             | $\frac{VCSTR}{F_{A0}} = \frac{X_{AF} - X_{A0}}{-r_A}$   |   |
| <p>PFR<br/>FLUJO PISTÓN<br/>CONTINUO</p> | $\frac{VPFR}{F_{A0}} = \int_0^{X_A} \frac{dF_A}{-r_X}$  |  |

Fuente: Gustavo Aron Campos Cano, Estudio preliminar de la pirolisis, 2017

De acuerdo a la bibliografía e información adquirida, el proceso de pirolisis debe ser llevada a cabo en una escala térmica desde la temperatura ambiente a la temperatura donde se inicia la reacción. En el caso que se alimente al reactor directamente a la temperatura de reacción sin antes haber pasado el tiempo de calentamiento, afectara directamente a los productos obtenidos, debido a que el proceso priorizara la formación de combustibles gaseosos no condensables en mayor producción que los combustibles líquidos, y nuestro principal objetivo es obtener combustibles líquidos en mayor porcentaje dentro de los productos. Por esta razón no se debería utilizar un reactor del tipo estacionario o continuo.

Bajo este criterio se selecciona al reactor de tipo discontinuo Batch como reactor del proceso

#### 4.1.5 CÁLCULO PARA EL TIEMPO DE REACCIÓN EN REACTOR TIPO BATCH

Una vez seleccionado el reactor discontinuo tipo "Batch" se procede a calcular el tiempo que tardara en descomponerse utilizando la ecuación de diseño del reactor seleccionado

$$\frac{dX_A}{dt} = \frac{-r_A v}{N_{AO}} \quad (4.16)$$

$$N_{AO} \frac{dX_A}{dt} = -r_A V$$

$$N_{AO} = C_{AO} V \quad (4.17)$$

Remplazando la ecuación 4.17 en

$$C_{AO} V \frac{dX_A}{dt} = -r_A V$$

Simplificando el volumen V en la ecuación actual se tiene

$$C_{AO} \frac{dX_A}{dt} = -r_A$$

Remplazando la ecuación 4.2 en la ecuación actual

$$C_{AO} \frac{dX_A}{dt} = K C_A \quad (4.18)$$

Remplazando la ecuación 4.9 en la ecuación 6.18

$$C_{AO} \frac{dX_A}{dt} = K C_{AO} (1 - X_A)$$

Simplificando la concentración inicial del reactivo  $C_{AO}$  e integrando la ecuación

$$\frac{dX_A}{dt} = K(1 - X_A)$$

$$\frac{1}{K} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1 - X_A)} = \int_0^{t_R} dt$$

$$\frac{1}{K} [-\ln(1 - X_A)] = t_R$$

$$t_R = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{1}{1 - X_A}\right) \quad (4.19)$$

#### 4.1.5.1 CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN DEL POLIESTIRENO

Se procede a utilizar la ecuación de tiempo de reacción y el valor de la constante K de velocidad de reacción previamente calculado

$$K = 0.0030899 \text{ s}^{-1}$$

Se reemplaza el valor de K en la ecuación 4.19 y utiliza el valor máximo de la conversión en el análisis TGA que es  $X = 0.95$

$$t_{RPS} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{1}{1 - X_{PS}}\right)$$

$$t_{RPS} = \frac{1}{0.0030899} \ln\left(\frac{1}{1 - 0.95}\right)$$

$$t_R = 969.5 \text{ s} = \mathbf{16.2 \text{ min}}$$

$$t_{CICLO} = t_A + t_{CAL} + t_R$$

Donde:

$t_A$  = tiempo de alimentación

$t_{CAL}$  = tiempo de calentamiento

$t_R$  = tiempo de reacción

$$t_{CICLO} = 15 \text{ min} + 60 \text{ min} + 16.2 \text{ min}$$

$$t_{CICLO} = 91.2 \text{ min}$$

Para el caso del Poliestireno se comprueba que el tiempo de reacción del reactor tipo "Batch" es aproximado a los valores de la tabla de análisis termogravimétrico (TGA)

**Tabla 4.5 Análisis termogravimétrico de Poliestireno**

| Variación de la masa de Poliestireno con respecto al tiempo y temperatura |                |               |       |            |           |
|---|----------------|---------------|-------|------------|-----------|
| Tiempo (min)  | Temperatura °C | Temperatura K | Peso% | Conversión | DGT       |
| 63.61   | 343.00         | 616.00        | 98.70 | 0          | -1.28E-03 |
| 65.37   | 351.83         | 624.83        | 78.95 | 0.18       | -2.19E-03 |
| 67.13   | 360.67         | 633.67        | 68.57 | 0.29       | -3.13E-03 |
| 68.90   | 369.50         | 642.50        | 45.58 | 0.48       | -5.38E-03 |
| 70.67   | 378.33         | 651.33        | 30.55 | 0.61       | -1.11E-02 |
| 72.43   | 387.17         | 660.17        | 22.33 | 0.77       | -1.89E-02 |
| 74.20   | 396.00         | 669.00        | 16.01 | 0.81       | -2.50E-02 |
| 75.97   | 404.83         | 677.83        | 13.24 | 0.87       | -2.52E-02 |
| 77.73   | 413.67         | 686.67        | 10.62 | 0.91       | -2.66E-02 |
| 79.50   | 422.50         | 695.50        | 7.62  | 0.95       | -2.75E-02 |

Fuente: Samaniego Ashlyn, kinetic study of plastic decomposition 2020

$$t_{R\ EXP} = 79,50 - 63,60 = 15.9\ min$$

#### 4.1.5.2 CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN DEL POLIPROPILENO

Se procede a utilizar la ecuación de tiempo de reacción y el valor de la constante K de velocidad de reacción previamente calculado

$$K = 0.0013309\ s^{-1}$$

Se reemplaza el valor de K en la ecuación 4.19 y utiliza el valor máximo de la conversión en el análisis TGA que es  $X = 0.95$

$$t_R = \frac{1}{0.0013309} \ln\left(\frac{1}{1 - 0.95}\right)$$

$$t_R = 2250\ s = 38\ min$$

$$t_{CICLO} = t_A + t_{CAL} + t_R$$

Donde:

$t_A$  = tiempo de alimentación

$t_{CAL}$  = tiempo de calentamiento

$t_R$  = tiempo de reacción

$$t_{CICLO} = 15 \text{ min} + 60 \text{ min} + 38 \text{ min}$$

$$t_{CICLO} = 113 \text{ min}$$

De la misma manera para el caso del Polipropileno se comprueba que el tiempo de reacción del reactor tipo "Batch" es aproximado a los valores de la tabla de análisis termogravimetrico (TGA)

**Tabla 4.6 Análisis termogravimetrico de Polipropileno**

| Variación de la masa de Polipropileno con respecto al tiempo y temperatura |                |               |       |            |           |
|--|----------------|---------------|-------|------------|-----------|
| Tiempo (min)   | Temperatura °C | Temperatura K | Peso% | Conversión | DGT       |
| 46.00  | 351.83         | 624.83        | 99.80 | 0          | -6.91E-04 |
| 50.10  | 369.50         | 642.50        | 77.65 | 0.21       | -2.53E-03 |
| 54.20  | 378.33         | 651.33        | 61.55 | 0.39       | -5.37E-03 |
| 58.30  | 387.17         | 660.17        | 45.89 | 0.51       | -1.24E-02 |
| 62.40  | 396.00         | 669.00        | 38.47 | 0.68       | -2.80E-02 |
| 66.50  | 404.83         | 677.83        | 25.98 | 0.77       | -5.01E-03 |
| 70.60  | 413.67         | 686.67        | 20.88 | 0.81       | -5.38E-02 |
| 74.70  | 422.50         | 695.50        | 16.94 | 0.87       | -6.96E-02 |
| 78.80  | 431.33         | 704.33        | 11.56 | 0.91       | -7.66E-02 |
| 82.90  | 440.17         | 713.17        | 8.65  | 0.95       | -6.88E-02 |

Fuente: Samaniego Ashlyn, kinetic study of plastic decomposition 2020

$$t = 82.90 - 46.00 = 36.8 \text{ min}$$

#### 4.1.5.3 CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Se procede a utilizar la ecuación de tiempo de reacción y el valor de la constante K de velocidad de reacción previamente calculado

$$K = 0.001226 \text{ s}^{-1}$$

Se reemplaza el valor de K en la ecuación 4.19 y utiliza el valor máximo de la conversión en el análisis TGA que es  $X = 0.95$

$$t_R = \frac{1}{0.001226} \ln\left(\frac{1}{1 - 0.89}\right)$$

$$t_R = 1800.38 \text{ s} = 30 \text{ min}$$

$$t_{CICLO} = t_A + t_{CAL} + t_R$$

Donde:

$t_A$  = tiempo de alimentación

$t_{CAL}$  = tiempo de calentamiento

$t_R$  = tiempo de reacción

$$t_{CICLO} = 15 \text{ min} + 60 \text{ min} + 30 \text{ min}$$

$$t_{CICLO} = 105 \text{ min}$$

De la misma manera para el caso del Polipropileno se comprueba que el tiempo de reacción del reactor tipo "Batch" es aproximado a los valores de la tabla de análisis termogravimétrico (TGA)

**Tabla 4.7 Análisis termogravimétrico de Polietileno de alta densidad**

| Variación de la masa de Polietileno con respecto al tiempo y temperatura |                |               |       |            |           |
|--|----------------|---------------|-------|------------|-----------|
| Tiempo (min)   | Temperatura °C | Temperatura K | Peso% | Conversión | DGT       |
| 50.00  | 325.33         | 598.33        | 99.70 | 0          | -3.18E-04 |
| 53.30  | 334.17         | 607.17        | 82.10 | 0.12       | -3.35E-04 |
| 56.60  | 343.00         | 616.00        | 70.51 | 0.27       | -5.01E-04 |
| 59.90  | 351.83         | 624.83        | 59.37 | 0.39       | -6.91E-04 |
| 63.20  | 369.50         | 642.50        | 43.21 | 0.48       | -2.53E-03 |
| 66.50  | 378.33         | 651.33        | 36.15 | 0.65       | -5.37E-03 |
| 69.80  | 387.17         | 660.17        | 30.47 | 0.76       | -1.24E-02 |
| 73.10  | 396.00         | 669.00        | 24.49 | 0.82       | -2.80E-02 |
| 76.40  | 404.83         | 677.83        | 22.56 | 0.85       | -5.01E-03 |
| 79.70  | 413.67         | 686.67        | 19.11 | 0.89       | -5.38E-02 |

Fuente: Samaniego Ashlyn, kinetic study of plastic decomposition 2020

$$t = 79.70 - 50.00 = 29.70 \text{ min}$$

#### 4.1.6 CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

El cálculo del diámetro del reactor se hace en base al volumen total de la mezcla y se determina mediante la siguiente ecuación

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V} \quad (4.20)$$

En este caso, el volumen de producción deseado es 750 litros ( $0.75 \text{ m}^3$ ) para los combustibles provenientes de la pirolisis, Por lo tanto, se sustituye en la ecuación 4.20 para determinar el valor del diámetro

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi}(0.75 \text{ m}^3)} = 0.98 \text{ m}$$

Dónde:

D= Diámetro del reactor (m)

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

Por otro lado, la altura del reactor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (4.21)$$

Donde:

H= Altura del reactor (m)

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

D= Diámetro m

Sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$H = \frac{4(0.75)}{\pi(0.98^2)} = 0.994 \text{ m}$$

Reducimos el diámetro y aumentamos la altura a valores más enteros para una mejor elaboración del reactor.

$$H = 0.994 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

$$D = 0.98 \text{ m}$$

#### 4.1.6.1 CÁLCULO DE LA PRESIÓN MÁXIMA PERMITIDA

Para poder determinar el espesor del material del cuerpo cilindro, primero es necesario conocer la presión que ejerce la altura del fluido dentro del tanque, la cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_F = \rho_f g H \quad (4.22)$$

Donde:

$P_F$  = Presión hidrostática (bar)

$\rho_F$  = Densidad del fluido ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$g$  = Gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

Se utiliza esta ecuación para el cálculo de la presión que ejerce el plástico porque minutos después de iniciar el proceso de pirolisis el plástico se derretirá quedando en un estado viscoso similar al de un fluido líquido

Debido a que la materia prima para la alimentación del reactor está constituida por Polipropileno, Poliestireno y Polietileno, se procede a calcular la presión ejercida de cada polímero

Para el Poliestireno (PS)

$$P_{PS} = 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1 \text{ m}$$

$$P_{PS} = 10300.5 \text{ Pa} = 0.103 \text{ bar}$$

Para el Polipropileno (PP)

$$P_{PP} = 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1 \text{ m}$$

$$P_{PP} = 8829 \text{ Pa} = 0.088 \text{ bar}$$

Para el Polietileno de alta densidad (LDPE)

$$P_{HDPE} = 950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1 \text{ m}$$

$$P_{HDPE} = 9319.5 \text{ Pa} = 0.093 \text{ bar}$$

De acuerdo a los valores obtenidos se observa que el Poliestireno es el que ejerce mayor presión al reactor. Por esta razón se tomará la Presión del Poliestireno como referencia para la presión del fluido

$$P_F = P_{PS}$$

Después es necesario determinar la presión de operación, a la cual estará sometido el recipiente a partir de la siguiente ecuación (6.22), donde de igual forma se sustituye el valor de la presión atmosférica (1.01325 bar) y el de la presión hidrostática que previamente se calculó. Así mismo y según el manual de recipientes a presión de Megyesy (1998) es recomendable diseñar los recipientes con una presión mayor a la de operación, la cual se satisface Sumando una presión de diseño de 2 bar

$$P_{MAX} = P_{ATM} + P_F + 2 \text{ bar} \quad (4.23)$$

Donde:

$P_{ATM}$  = Presión atmosférica (bar)

$P_F$  = Presión de fluido (bar)

$P_{MAX}$  = Presión máxima permitida (bar)

Remplazando datos se tiene:

$$P_{MAX} = 1.01325 \text{ bar} + 0.103 \text{ bar} + 2 \text{ bar}$$

$$P_{MAX} = 3.116 \text{ bar} \approx 4 \text{ bar}$$

#### 4.1.6.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DEL REACTOR.

Una vez calculada la presión máxima permitida de operación a la cual estará sometido el reactor, se procede a determinar el espesor del material. Para ello también es necesario conocer las propiedades físicas del material, en este caso para la fabricación de los recipientes el material a utilizar es de Acero inoxidable SA-240-304 y el cual de acuerdo a la norma ASME sección II parte D, tiene las siguientes características.

**Tabla 6.8 Características de Acero inoxidable SA-240-304**

| Composición Nominal | Especificaciones | Tipo / Grande | Esfuerzo de tracción (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Esfuerzo de fluencia (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Máximo esfuerzo admisible (Kg/mm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|------------------|---------------|--|--|---|
| 18 Cr-8 Ni          | SA-240           | 304           | 52.73                                      | 21.09                                      | 11,4  |

Fuente: Normas ASME sección II parte D SA-240-304

Para determinar el espesor del cuerpo cilíndrico del reactor sometido a presión máxima permisible, se utilizó la norma ASME VIII División 1 en la Parte UG 27 y el manual de recipientes sometidos a presión del autor Megyesy. Dicho espesor se determina mediante la siguiente ecuación, además que el margen de corrosión según la norma ASME VIII División 1 en la Parte UG 27 para el caso presente se recomienda de 2 mm

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C.A. \quad (4.24)$$

Dónde:

t= Espesor de la pared del cilindro (mm)

P= Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida (Kg/mm<sup>2</sup>)

R= Radio del reactor (mm)

S= Valor del esfuerzo del material (11.74Kg/mm<sup>2</sup>)

E= Eficiencia de la junta (0.85)

C.A= Margen por corrosión (2 mm)

El valor de S se obtiene de la tabla 6.8. Luego se procede a convertir la presión máxima permisible a unidades de Kg/mm<sup>2</sup>

$$P_{MAX} = 4 \text{ bar} \times \frac{1 \text{ atm}}{1.01325 \text{ bar}} \times \frac{0.01033515 \text{ kg}_f/\text{mm}^2}{1 \text{ atm}} = 0.0408 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$$

Por último, se sustituyen los valores correspondientes en la ecuación (4.23). Donde por conveniencia se han realizado algunas conversiones en las unidades para dejar el espesor en mm. según el manual de recipientes a presión de Megyesy (1998) es recomendable diseñar los

recipientes con una presión mayor a la de operación, la cual se satisface Sumando una presión de diseño de 2 bar

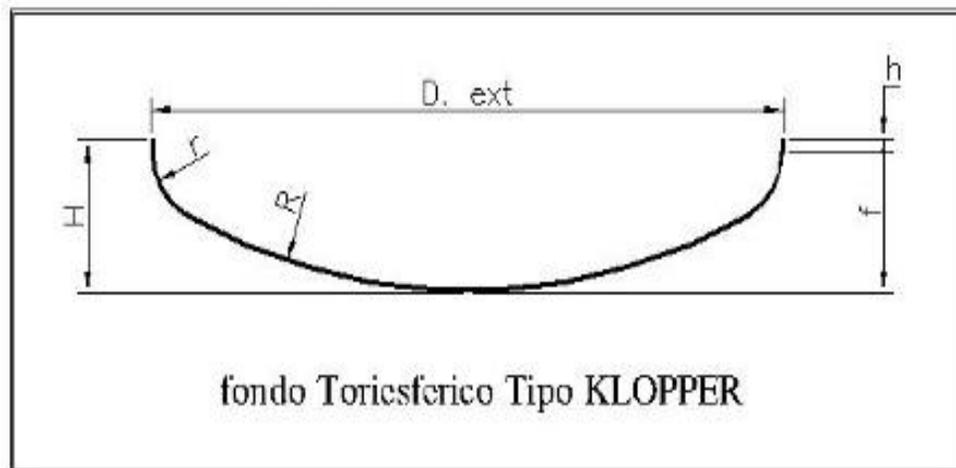
$$t = \frac{0.0408 \frac{kg_f}{mm^2} * 450 \text{ mm}}{11.74 \frac{kg_f}{mm^2} * 085 - 0.6 * 0.0408 \frac{kg_f}{mm^2}} + 2 \text{ mm}$$

$$t = 3.84 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm}$$

#### 4.1.6.3 CÁLCULO DEL FONDO TORRIESFERICO

Se decidió utilizar fondos tipos torriesfericos para el diseño del reactor batch con el objetivo de evitar puntos muertos al momento de realizarse el proceso de mezclado de los reactivos. El Cálculo de las dimensiones del fondo torriesferico se realizó siguiendo la norma DIN-28011

**Figura 4.4 Geometría de un fondo torriesferico tipo KLOPPER.**



Fuente: KLOPPER. norma DIN-28011

Para determinar las dimensiones del fondo torriesferico, primero es necesario determinar el espesor por presión interna basándonos en la norma ASME VIII División 1 en la Parte UG – 27 y el manual de recipientes sometidos a presión del autor Megyesy (2004). Dicho espesor se determina mediante la siguiente ecuación.

$$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + C.A. \quad (4.25)$$

Donde:

t= Espesor de la pared del cilindro (mm)

P= Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida (Kg/mm<sup>2</sup>)

L= Radio interior (mm)

S= Valor del esfuerzo del material (11.74 Kg/mm<sup>2</sup>)

E= Eficiencia de la junta (0.85)

C.A.= Margen por corrosión (2 mm)

Después al igual que para determinar el espesor del reactor, se sustituyen los valores en la ecuación (6.24).

$$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + C.A$$

Remplazando los datos se tiene:

$$t = \frac{0.885 * 0.0408 \left( \frac{kg_f}{mm^2} \right) * 450 (mm)}{11.74 \left( \frac{kg_f}{mm^2} \right) * 0.85 - 0.1 * 0.0408 \left( \frac{kg_f}{mm^2} \right)} + 2 mm$$
$$t = 3.63mm \approx 4 mm$$

Posteriormente se determinan las dimensiones del fondo torriesferico mediante las siguientes relaciones de la norma DIN-28011.

|                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| RELACIONES        | $h_1 = 3.5 * S$                  |
| $r_1 = D_a$       | $h_2 = 0.1935 * D_a - 0.455 * S$ |
| $r_2 = 0.1 * D_a$ | $h_T = h_1 + h_2$                |

Donde:

r = Radios de curvatura cm.

h = Altura en cm.

S = Espesor del material en mm.

$D_a$  = Diámetro exterior del tanque en cm.

$h_T$  = Altura total del fondo torriesferico cm

En este caso el diámetro del reactor es de 90 cm, por lo que:

$$r_1 = D_a = 90 \text{ cm}$$

$$r_2 = 0.1 * D_a = 9 \text{ cm}$$

El espesor del material, previamente determinado es de 4 mm, de ahí que la altura sea

$$h_1 = 3.5 * S$$

$$h_1 = 3.5 * 4 \text{ mm}$$

$$h_1 = 14 \text{ mm} = 1.4 \text{ cm}$$

$$h_2 = 0.1935 * D_a - 0.455 * S$$

$$h_2 = 0.1935 * 90 \text{ cm} - 0.455 * 0.4 \text{ cm}$$

$$h_2 = 0.1935 * 90 \text{ cm} - 0.455 * 0.4 \text{ cm}$$

$$h_2 = 17.233 \text{ cm} \approx 17.3 \text{ cm}$$

Por último, la altura total del fondo torriesferico es:

$$h_T = h_1 + h_2$$

$$h_T = 1.4 \text{ cm} + 17.3 \text{ cm}$$

$$h_T = 18.7 \text{ cm}$$

## 4.2 SISTEMA DE CONDENSACIÓN

### 4.2.1 CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DEL CONDENSADORES

Para el cálculo de los condensadores es importante conocer la perdida de calor necesaria para que el fluido deseado salga del intercambiador de calor a la temperatura deseada.

**Tabla 4.9 Perdida de calores en intercambiadores de calor**

| FLUIDO | CALOR<br>CONDENSADOR 1 | CALOR<br>CONDENSADOR 2 | CALOR<br>TOTAL         |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| PS     | 240420 $\frac{KJ}{Hr}$ | 266043 $\frac{KJ}{Hr}$ | 506463 $\frac{KJ}{Hr}$ |
| PP     | 274967 $\frac{KJ}{Hr}$ | 305366 $\frac{KJ}{Hr}$ | 580333 $\frac{KJ}{Hr}$ |
| HDPE   | 309344 $\frac{KJ}{Hr}$ | 307504 $\frac{KJ}{Hr}$ | 616848 $\frac{KJ}{Hr}$ |

Fuente: Datos obtenidos de la simulación de Aspen plus

Los valores de calor necesarios para los intercambiadores de calor se encuentran resumidos en la tabla 4.9 obtenidos de la simulación del proceso en Aspen plus. Se debe seleccionar la pérdida de calor más grande para cada intercambiador y se procederá a realizar los cálculos para los casos más altos

Se observa en la tabla que las pérdidas de calor más grandes para cada intercambiador suceden para el Polietileno de alta densidad (HDPE), por esta razón se utilizarán estos valores para el diseño del equipo.

Primero se escogerá una configuración inicial para los condensadores en caso de que no cumpla el requerimiento se cambiará la configuración.

Para una configuración estándar para condensadores se utiliza tubing de 1 pulgada de diámetro externo ( $D_o$ ) con un diseño cuadrado de paso de tubos que es el aconsejado. Además, que la tubería de todo el sistema del proceso de la planta se pretende utilizar tubería de 1 pulgada

$$D_o = 1 \text{ in}$$

De acuerdo a la tabla 6.10 para la selección de un BWG = 14 el diámetro interno del tubing sería de  $D_i = 0.834 \text{ in}$

**Tabla 4.10 Relación de diámetro de tubería externa con interna estándar**

| Tubería<br>Diámetro<br>Externo (OD) | BWG | Tubería<br>Diámetro<br>interno (ID) | Área<br>Interna    | Superficie<br>Externa por pie<br>de longitud | OD/ID |
|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|--------------------|--|-------|
| (in)                                |     | (in)                                | (in <sup>2</sup> ) | (ft <sup>2</sup> /ft)                        |       |
| 1                                   | 8   | 0.670                               | 0.3526             | 0.2618                                       | 1.493 |
|                                     | 10  | 0.732                               | 0.4208             | 0.2618                                       | 1.366 |
|                                     | 11  | 0.760                               | 0.4536             | 0.2618                                       | 1.316 |
|                                     | 12  | 0.782                               | 0.4803             | 0.2618                                       | 1.279 |
|                                     | 13  | 0.810                               | 0.5153             | 0.2618                                       | 1.235 |
|                                     | 14  | 0.834                               | 0.5463             | 0.2618                                       | 1.199 |
|                                     | 15  | 0.856                               | 0.5755             | 0.2618                                       | 1.168 |
|                                     | 16  | 0.870                               | 0.5945             | 0.2618                                       | 1.149 |
|                                     | 18  | 0.902                               | 0.6390             | 0.2618                                       | 1.109 |
|                                     | 20  | 0.930                               | 0.6793             | 0.2618                                       | 1.075 |

Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

Para un diseño cuadrado de paso de tubos (tube pitch) y de diámetro externo de  $D_o = 1 \text{ (in)}$  es aconsejable que el paso de tubos sea de  $1 \frac{1}{4} \text{ (in)}$ , como se observa en la tabla 4.11

**Tabla 4.11 Relación de diámetro de tubería externa con Tube Pitch estándar**

| DISEÑO     | TUBERÍA O.D. (in) | TUBERÍA PITCH (in) |
|------------|-------------------|--------------------|
| Cuadrado   | 3/4               | 1                  |
| Cuadrado   | 1                 | 1 1/4              |
| Triangular | 3/4               | 1 5/16             |
| Triangular | 3/4               | 1                  |
| Triangular | 1                 | 1 1/4              |

Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

Entonces la configuración inicial para ambos condensadores estaría resumida en la tabla 4.12

**Tabla 4.12 Configuración inicial**

|                               |          |         |
|-------------------------------|----------|---------|
| Diámetro externo tubing       | 1        | pulgada |
| Diámetro interno tubing       | 0.834    | Pulgada |
| BWG                           | 14       |         |
| Diseño de Tubería Pitch       | Cuadrado |         |
| Tubería Pitch (paso de tubos) | 1 ¼      | Pulgada |

Fuente: elaboración propia

#### **4.2.1.1 CÁLCULO PARA EL PRIMER CONDENSADOR**

Se pretende diseñar un condensador para que cumpla las siguientes condiciones que fueron simuladas en el software Aspen plus

**Tabla 4.13 Valores de entrada y salida para primer condensador**

|                               |              |               |
|-------------------------------|--------------|---------------|
| CALOR                         | 309344 KJ/hr | 293202 Btu/hr |
| TEMPERATURA DEL GAS ENTRANTE  | 450.027 °C   | 842.0486 °F   |
| TEMPERATURA DEL GAS SALIENTE  | 210 °C       | 410 °F        |
| TEMPERATURA DEL AGUA ENTRANTE | 15 °C        | 59 °F         |
| TEMPERATURA DEL AGUA SALIENTE | 64.2883 °C   | 147.71894 °F  |

Fuente: Datos obtenidos de la simulación de Aspen plus

Además, que se tienen los siguientes valores de las propiedades necesarias de los fluidos involucrados en el condensador

PARA EL AGUA

**Tabla 4.14 Propiedades del agua para el primer condensador**

|                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| PROPIEDADES           |                           |
| Calor específico      | 4.186 J/g K               |
| Conductividad térmica | 0.6 W/m K                 |
| Viscosidad            | $1 \times 10^{-3} Pa - s$ |

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| Densidad     | 1000 kg / m <sup>3</sup> |
| Flujo másico | 1500 Kg / hr             |

Fuente: elaborado en base a datos recopilados de CME materials

PARA EL CONDENSADO (gas oíl)

**Tabla 4.15 Propiedades del gasoil para el primer condensador**

|                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| PROPIEDADES           |                           |
| Calor específico      | 2100 J/Kg K               |
| Conductividad térmica | 0.13 W / m K              |
| Viscosidad            | 5x10 <sup>-3</sup> Pa – s |
| Densidad              | 850 kg / m <sup>3</sup>   |
| Flujo másico          | 500 Kg / hr               |

Fuente: elaborado en base a datos recopilados de CME materials

Teniendo los datos de propiedades y flujos de los fluidos se procede con el diseño para las especificaciones del Primer Condensador

Primero se procede a calcular cada una de las variables de la ecuación general de calor

$$Q = AUf\Delta T_{LTMD}$$

#### 4.2.1.1.1 CÁLCULO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA ( $\Delta T_{LTMD}$ )

De la ecuación

$$\Delta T_{LTMD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (4.26)$$

Primero se procede a calcular la diferencia de temperatura

$$\Delta T_1 = T_{GAS\ ENTRANTE} - T_{AGUA\ SALIENTE}$$

$$\Delta T_1 = 450.027\text{ °C} - 64.2883\text{ °C} = 385.7387\text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = T_{GAS\ SALIENTE} - T_{AGUA\ ENTRANTE}$$

$$\Delta T_2 = 210\text{ °C} - 15\text{ °C} = 195\text{ °C}$$

Remplazar los valores de las diferencias de temperaturas en la ecuación

$$\Delta T_{LTMD} = \frac{195 \text{ }^{\circ}\text{C} - 385.7387 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{195 \text{ }^{\circ}\text{C}}{385.7387 \text{ }^{\circ}\text{C}}\right)}$$

$$\Delta T_{LTMD} = 279.609 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

#### 4.2.1.1.2 CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN (f)

Se procede a hallar los valores de variables R y P para después encontrar el valor del factor de corrección

$$R = \frac{T_{AGUA\ ENTRANTE} - T_{AGUA\ SALIENTE}}{T_{GAS\ SALIENTE} - T_{GAS\ ENTRANTE}}$$

$$R = \frac{15 \text{ }^{\circ}\text{C} - 64.2883 \text{ }^{\circ}\text{C}}{210 \text{ }^{\circ}\text{C} - 450.027^{\circ}\text{C}}$$

$$R = 0.2$$

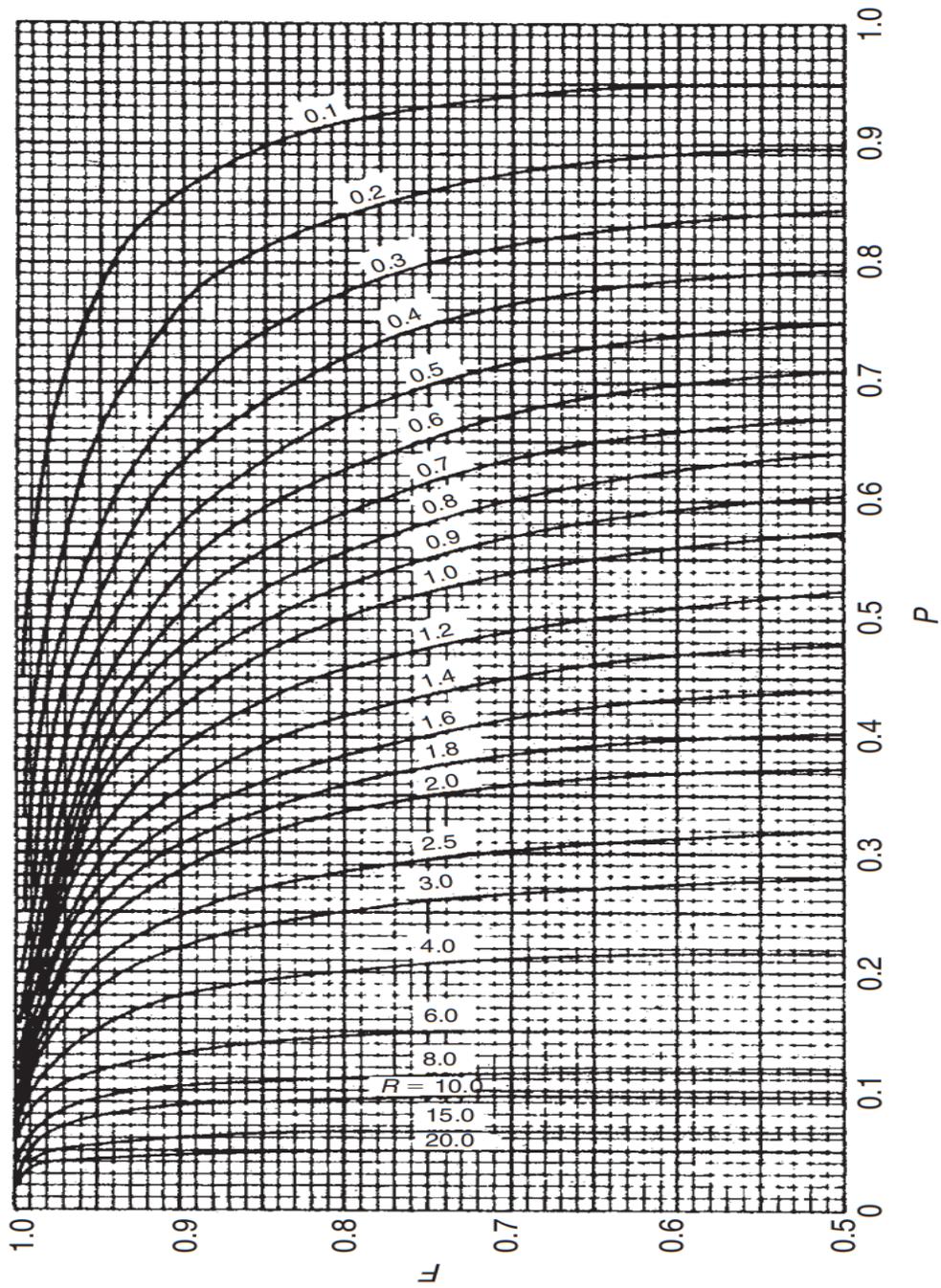
$$P = \frac{T_{GAS\ SALIENTE} - T_{GAS\ ENTRANTE}}{T_{AGUA\ ENTRANTE} - T_{GAS\ ENTRANTE}}$$

$$P = \frac{210 \text{ }^{\circ}\text{C} - 450.027 \text{ }^{\circ}\text{C}}{15 \text{ }^{\circ}\text{C} - 450.027^{\circ}\text{C}}$$

$$P = 0.55$$

De la figura 4.5 utilizando los valores hallados de P y R se halla el valor del coeficiente de corrección f

Figura 4.5 Factor de corrección de LMTD para 1-2,4,6



Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

$$F = 0.98$$

Luego se procede a asumir un valor de diseño del coeficiente global de transferencia de acuerdo a los fluidos involucrados en el caso del fluido caliente que llegaría a ser el gas procedente de la pirólisis y el fluido refrigerante que llegaría a ser el agua.

**Tabla 4.16 Relación de fluido de coraza y de tubo para el coeficiente global de transferencia de diseño**

| FLUIDO LADO DE LA CORAZA | FLUIDO LADO DEL TUBO | U DE DISEÑO | SUCIEDAD TOTAL |
|--------------------------|----------------------|-------------|----------------|
| Kerosene o gas oíl       | Agua                 | 25 - 50     | 0.005          |
| Kerosene o gas oíl       | Oíl                  | 20 - 35     | 0.005          |
| Kerosene o jet fuel      | Tricloroetileno      | 40 - 50     | 0.0015         |
| Naphhta                  | Agua                 | 50 - 70     | 0.005          |
| Naphhta                  | Oíl                  | 25 - 35     | 0.005          |

Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

Se utiliza la relacion de gas oil y agua porque es el producto que e pretende obtener en este proceso y que circulara por el shell y el liquido refrigerante sera agua que circulara por los tubos

$$U = 25 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

Después de obtener los valores de las variables se procede despejar la variable de área de la ecuación 4.27

$$Q = AUf\Delta T_{LTMD} \quad (4.27)$$

$$A = \frac{Q}{Uf\Delta T_{LTMD}}$$

Remplazando los valores de las variables

$$A = \frac{293202 \frac{BTU}{h}}{25 \left( \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F} \right) * 0.98 * 503.29 \text{ } ^\circ F}$$

$$A = 23.7784 ft^2$$

Utilizando la siguiente ecuación 4.28 del área de un cilindro

$$A = \pi n_T D_O L \quad (4.28)$$

Teniendo el valor del área se procede a hallar el número de tubos ( $n_T$ )

$$n_T = \frac{A}{\pi D_O L}$$

$$n_T = \frac{23.7784 (ft^2)}{\pi * \frac{1}{12} (ft) * 3 (ft)}$$

$$n_T = 30.2755 \approx 31$$

Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{4m\dot{n}_p}{\mu_{agua}\pi d_i n_T} \quad (4.29)$$

$$Re = \frac{4 * 0.4167 (kg/s) * n_p}{1 \times 10^{-3} (Pa \cdot s) * \pi * 0.0212 (m) * 31}$$

El número de Reynolds debe ser mayor a  $Re \geq 4000$ , por esta razón se necesita darle un valor a  $n_p$  de tal forma que cumpla con la condición. El valor de  $n_p$  puede ser 2, 4 y 6

Se realiza una tabla del valor del número de Reynolds para cada valor de  $n_p$

**Tabla 4.17 Resultados del número de Reynolds en función del número de pasos**

| Re       | $n_p$ |
|----------|-------|
| 1614.604 | 2     |
| 3229.208 | 4     |
| 4843.812 | 6     |

Fuente: Elaboración propia

Cumple la condición para un numero de fases  $n_p = 6$ , luego, teniendo los valores del número de tubos  $n_T$  y numero de fases  $n_p$  puede determinarse los valores estándar del diámetro interno del Shell en la tabla 4.18

**Tabla 4.18 Recuento de tubos de 1in de OD en 1.25 in Cuadrado Pitch**

| CORAZA<br>ID (in) | TEMA P o S      |      |      |      | TEMA U          |      |      |
|-------------------|-----------------|------|------|------|-----------------|------|------|
|                   | Numero de pasos |      |      |      | Numero de pasos |      |      |
|                   | 1               | 2    | 4    | 6    | 2               | 4    | 6    |
| 8                 | 17              | 12   | 8    | 12   | 14              | 8    | 6    |
| 10                | 30              | 30   | 16   | 18   | 30              | 24   | 12   |
| 12                | 52              | 48   | 42   | 24   | 44              | 40   | 32   |
| 13                | 61              | 56   | 52   | 50   | 60              | 48   | 44   |
| 15                | 85              | 78   | 62   | 64   | 80              | 72   | 74   |
| 17                | 108             | 108  | 104  | 96   | 104             | 100  | 100  |
| 19                | 144             | 136  | 130  | 114  | 132             | 132  | 120  |
| 21                | 173             | 166  | 154  | 156  | 172             | 168  | 148  |
| 23                | 217             | 208  | 194  | 192  | 212             | 204  | 198  |
| 25                | 252             | 240  | 230  | 212  | 244             | 240  | 230  |
| 27                | 296             | 280  | 270  | 260  | 290             | 284  | 274  |
| 29                | 345             | 336  | 310  | 314  | 340             | 336  | 328  |
| 31                | 402             | 390  | 366  | 368  | 400             | 384  | 372  |
| 33                | 461             | 452  | 432  | 420  | 456             | 444  | 440  |
| 35                | 520             | 514  | 494  | 484  | 518             | 504  | 502  |
| 37                | 588             | 572  | 562  | 548  | 584             | 576  | 566  |
| 39                | 661             | 640  | 624  | 620  | 664             | 644  | 640  |
| 42                | 776             | 756  | 738  | 724  | 764             | 748  | 750  |
| 45                | 900             | 882  | 862  | 844  | 902             | 880  | 862  |
| 48                | 1029            | 1016 | 984  | 972  | 1028            | 1008 | 1004 |
| 54                | 1310            | 1296 | 1268 | 1256 | 1320            | 1296 | 1284 |
| 60                | 1641            | 1624 | 1595 | 1576 | 1634            | 1616 | 1614 |

Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

$$D_{SHELL} = 12 \text{ in}$$

TEMA "U"

$$n_T = 32$$

Con los valores estándar hallados se procede a calcular el coeficiente global de transferencia requerido  $U_{REQ}$

$$U_{REQ} = \frac{Q}{Af\Delta T_{LTMD}} \quad (4.30)$$

$$U_{REQ} = \frac{Q}{\pi D_o n_T L f \Delta T_{LTMD}}$$

$$U_{REQ} = \frac{293202 \frac{BTU}{h}}{\pi * \left(\frac{1}{12}\right) ft * 32 * 3(ft) * 0.98 * 503.29 \text{ } ^\circ F}$$

$$U_{REQ} = 23.653 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

#### 4.2.1.1.3 CÁLCULO PARA EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASFERENCIA DE CALOR $U_{CAL}$

##### 4.2.1.1.3.1 CÁLCULO DE $h_i$ PARA LOS TUBOS

Primero se procede a calcular el Número de Reynolds ( $Re$ ) de la ecuación 6.29

$$Re = \frac{4m\dot{n}_p}{\mu_{agua}\pi d_i n_T}$$

$$Re = \frac{4 * 0.4167(kg/s) * 6}{1 \times 10^{-3}(Pa - s) * \pi * 0.0212(m) * 31}$$

$$Re = 4843.812$$

Luego se procede utilizar la siguiente ecuación para calcular el Número de Prandtl ( $P_T$ )

$$P_T = \frac{C_P \mu_{AGUA}}{k} \quad (4.31)$$

$$P_T = \frac{4186 \left(\frac{J}{Kg K}\right) * 1 \times 10^{-3}(Pa - s)}{0.6 \left(\frac{W}{m K}\right)}$$

$$P_T = 6.976$$

Con los valores de Numero de Reynolds ( $Re$ ) y Numero de Prandtl ( $P_T$ ). Se procede a calcular el Numero de Nusselt ( $Nu$ )

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} P_T^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.32)$$

$$Nu = 0.023 * (4843.812)^{0.8} * (6.976)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \right)^{0.14}$$

$$Nu = 39.001$$

Para determinar el valor de  $h_i$  para los tubos del condensador empleamos la ecuación 4.33

$$h_i = \frac{Nuk}{d_i} \quad (6.33)$$

$$h_i = \frac{39.001 * 0.6 \left( \frac{W}{m K} \right)}{0.0212(m)}$$

$$h_i = 1103.802 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) = 629.859 \left( \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F} \right)$$

#### 4.2.1.1.3.2 CÁLCULO DE $h_0$ PARA EL SHELL

Para poder calcular el Numero de Reynolds para el flujo dentro del Shell primero se necesita calcular las siguientes relaciones obtenidas de la Figura 4.6

$$\frac{B}{D_{SHELL}} = 0.5 \quad (4.34)$$

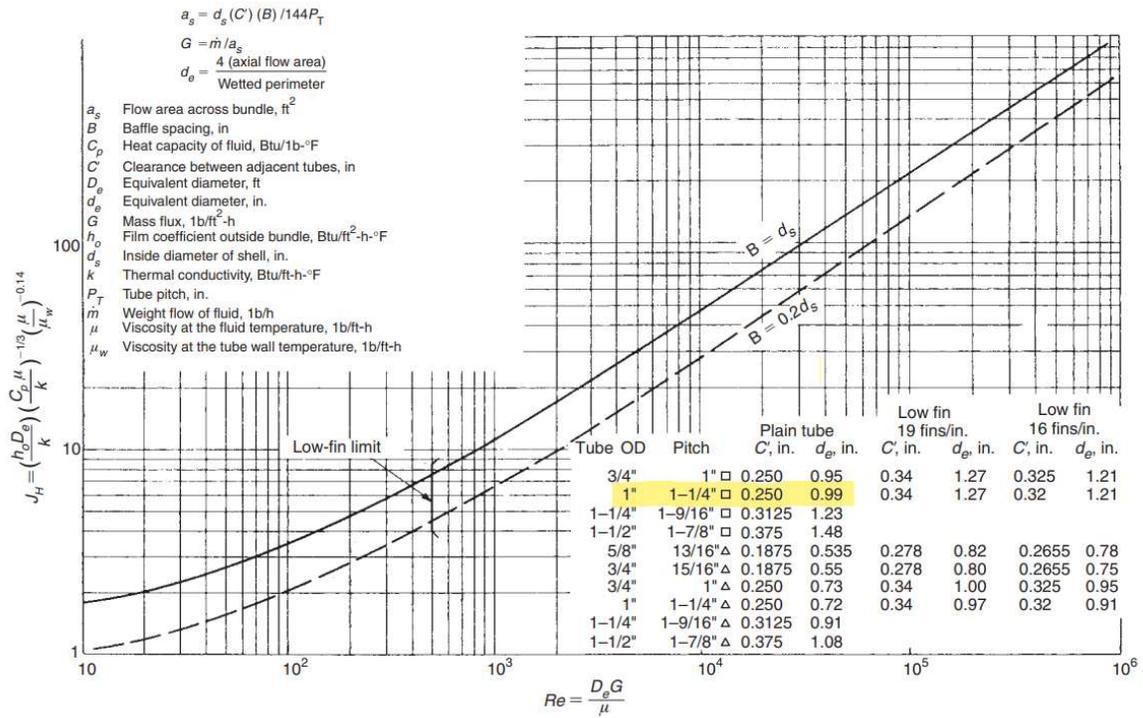
$$a_s = \frac{D_{SHELL} C' B}{144 P_T} \quad (4.35)$$

$$G = \frac{\dot{m}}{a_s} \quad (4.36)$$

$$Re = \frac{d_e G}{12\mu} \quad (4.37)$$

$$j = 0.5 \left( 1 - \frac{B}{D_{SHELL}} \right) (0.08 Re^{0.6821} + 0.7 Re^{0.1772}) \quad (4.38)$$

**Figura 4.6 Correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor del lado del Shell**



Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

Los valores que nos proporciona la tabla son los siguientes

$$C' = 0.25$$

$$d_e = 0.99$$

También se calculó el valor del diámetro del Shell

$$D_{SHELL} = 12 \text{ in}$$

Primero se debe calcular el valor del Numero de Prandtl ( $P_T$ )

$$P_T = \frac{C_p \mu_{GAS OIL}}{k_{GAS OIL}}$$

$$P_T = \frac{2100 \left( \frac{J}{Kg K} \right) * 5 \times 10^{-3} (Pa \cdot s)}{0.13 \left( \frac{W}{m K} \right)}$$

$$P_T = 80.769$$

Remplazando los valores obtenidos en la ecuación 4.34 para obtener el valor del espaciamiento de baffles (B)

$$\frac{B}{12 (in)} = 0.5$$

$$B = 6 (in)$$

Remplazando el valor de B en 4.35 para calcular el área de flujo a través del haz ( $a_s$ )

$$a_s = \frac{D_{SHELL} C' B}{144 P_T}$$

$$a_s = \frac{12 (in) * 0.25 * 6 (in)}{144 * 80.769}$$

$$a_s = 1.547 \times 10^{-3} (ft^2)$$

Remplazando el valor de ( $a_s$ ) en 4.36 para calcular el flujo másico en el Shell (G)

$$G = \frac{\dot{m}}{a_s}$$

$$G = \frac{1102.29 \left(\frac{Lb}{hr}\right)}{1.547 \times 10^{-3} (ft^2)}$$

$$G = 712533.937 \left(\frac{Lb}{ft hr}\right)$$

Remplazando el valor de (G) en 4.37 para calcular el Numero de Reynolds para el flujo dentro del Shell (Re)

$$Re = \frac{d_e G}{12\mu}$$

$$Re = \frac{0.99(in) * 712533.937 \left(\frac{Lb}{ft hr}\right)}{12 * 12.095}$$

$$Re = 4860.194$$

Una vez hallando el valor del Numero de Reynolds para el flujo dentro del Shell (Re) se procede a calcular el valor del coeficiente “J” con la ecuación 4.38

$$j = 0.5 \left( 1 - \frac{B}{D_{SHELL}} \right) (0.08 Re^{0.6821} + 0.7 Re^{0.1772})$$

$$j_H = 0.5(1 - 0.5) * (0.08 * (4860.194)^{0.6821} + 0.7 * (4860.194)^{0.1772})$$

$$j_H = 7.3294$$

Después de calcular el factor j y utilizando todos los valores de las variables calculadas Procedemos a calcular el  $h_0$

$$h_0 = j_H \left( \frac{k}{D_e} \right) P_T^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.39)$$

$$h_0 = 7.3294 \left( \frac{0.0751 \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F}}{\frac{0.99}{12} (ft)} \right) (80.769)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{5 \times 10^{-3} (Pa - s)}{1 \times 10^{-3} (Pa - s)} \right)^{0.14}$$

$$h_0 = 36.129 \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

Finalmente se procede a calcular el coeficiente global de transferencia de calor calculado con la ecuación. Para que el diseño sea aceptado debe cumplirse la condición de que  $U_{CAL} > U_{REQ}$

$$U_{CAL} = \frac{1}{\frac{D_0}{h_i D_i} + \frac{D_0 \ln \left( \frac{D_0}{D_i} \right)}{2k} + \frac{1}{h_0}} \quad (4.40)$$

$$U_{CAL} = \frac{1}{\frac{1(in)}{629.859 \left( \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F} \right) * 0.834(in)} + \frac{1}{12} (ft) * \ln \left( \frac{1}{0.834} \right)} + \frac{1}{36.129 \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F}}$$

$$U_{CAL} = 33.487 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

Cumple la condición de diseño

$$U_{CAL} > U_{REQ}$$

$$33.487 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} > 23.653 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

#### 4.2.1.2 CÁLCULO PARA EL SEGUNDO CONDENSADOR

De la misma manera se pretende diseñar el segundo condensador para que cumpla las siguientes condiciones que fueron simuladas en el software Aspen plus

**Tabla 4.19 Valores de entrada y salida para primer condensador**

|                               |                |                 |
|-------------------------------|----------------|-----------------|
| CALOR                         | 307504 (KJ/hr) | 291457 (Btu/hr) |
| TEMPERATURA DEL GAS ENTRANTE  | 210 C          | 410 F           |
| TEMPERATURA DEL GAS SALIENTE  | 60 C           | 140 F           |
| TEMPERATURA DEL AGUA ENTRANTE | 15 C           | 59 F            |
| TEMPERATURA DEL AGUA SALIENTE | 64.0032 C      | 147.2 F         |

Fuente: Datos obtenidos de la simulación de Aspen plus

Además, que se tienen los siguientes valores de las propiedades necesarias de los fluidos involucrados en el condensador no cambian u son la siguientes:

PARA EL AGUA

**Tabla 4.20 Propiedades del agua para el segundo condensador**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| PROPIEDADES           |  |
| Calor específico      | 4.186 J/g K                                  |
| Conductividad térmica | 0.6 W/m K                                    |
| Viscosidad            | $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| Densidad              | $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$               |
| Flujo másico          | 1500 Kg/ hr                                  |

Fuente: elaborado en base a datos recopilados de CME materials

PARA EL CONDENSADO (gas oíl)

**Tabla 4.21 Propiedades del agua para el segundo condensador**

| PROPIEDADES           |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| Calor específico      | 2100 J/Kg K               |
| Conductividad térmica | 0.13 W/m K                |
| Viscosidad            | $5 \times 10^{-3}$ Pa – s |
| Densidad              | 850 Kg / m <sup>3</sup>   |
| Flujo másico          | 500 Kg/ hr                |

Fuente: elaborado en base a datos recopilados de CME materials

Teniendo los datos de propiedades y flujos de los fluidos se procede con el diseño para las especificaciones del Segundo Condensador

De igual manera, primero se procede a calcular cada una de las variables de la ecuación general de calor

$$Q = AUf\Delta T_{LTMD}$$

#### 4.2.1.2.1 CÁLCULO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA ( $\Delta T_{LTMD}$ )

De la ecuación 4.26

$$\Delta T_{LTMD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Primero se procede a calcular la diferencia de temperatura

$$\Delta T_1 = T_{GAS\ ENTRANTE} - T_{AGUA\ SALIENTE}$$

$$\Delta T_1 = 210\text{ °C} - 64.0032\text{ °C} = 145.997\text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = T_{GAS\ SALIENTE} - T_{AGUA\ ENTRANTE}$$

$$\Delta T_2 = 60\text{ °C} - 15\text{ °C} = 45\text{ °C}$$

Remplazar los valores de las diferencias de temperaturas en la ecuación

$$\Delta T_{LTMD} = \frac{45\text{ °C} - 145.997\text{ °C}}{\ln\left(\frac{45\text{ °C}}{145.997\text{ °C}}\right)}$$

$$\Delta T_{LTMD} = 85.8144\text{ °C}$$

#### 4.2.1.2.2 CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN (f)

Se procede a hallar los valores de variables R y P para después encontrar el valor del factor de corrección

$$R = \frac{T_{AGUA\ ENTRANTE} - T_{AGUA\ SALIENTE}}{T_{GAS\ SALIENTE} - T_{GAS\ ENTRANTE}}$$

$$R = \frac{15\text{ °C} - 64.0032\text{ °C}}{60\text{ °C} - 210\text{ °C}}$$

$$R = 0.32$$

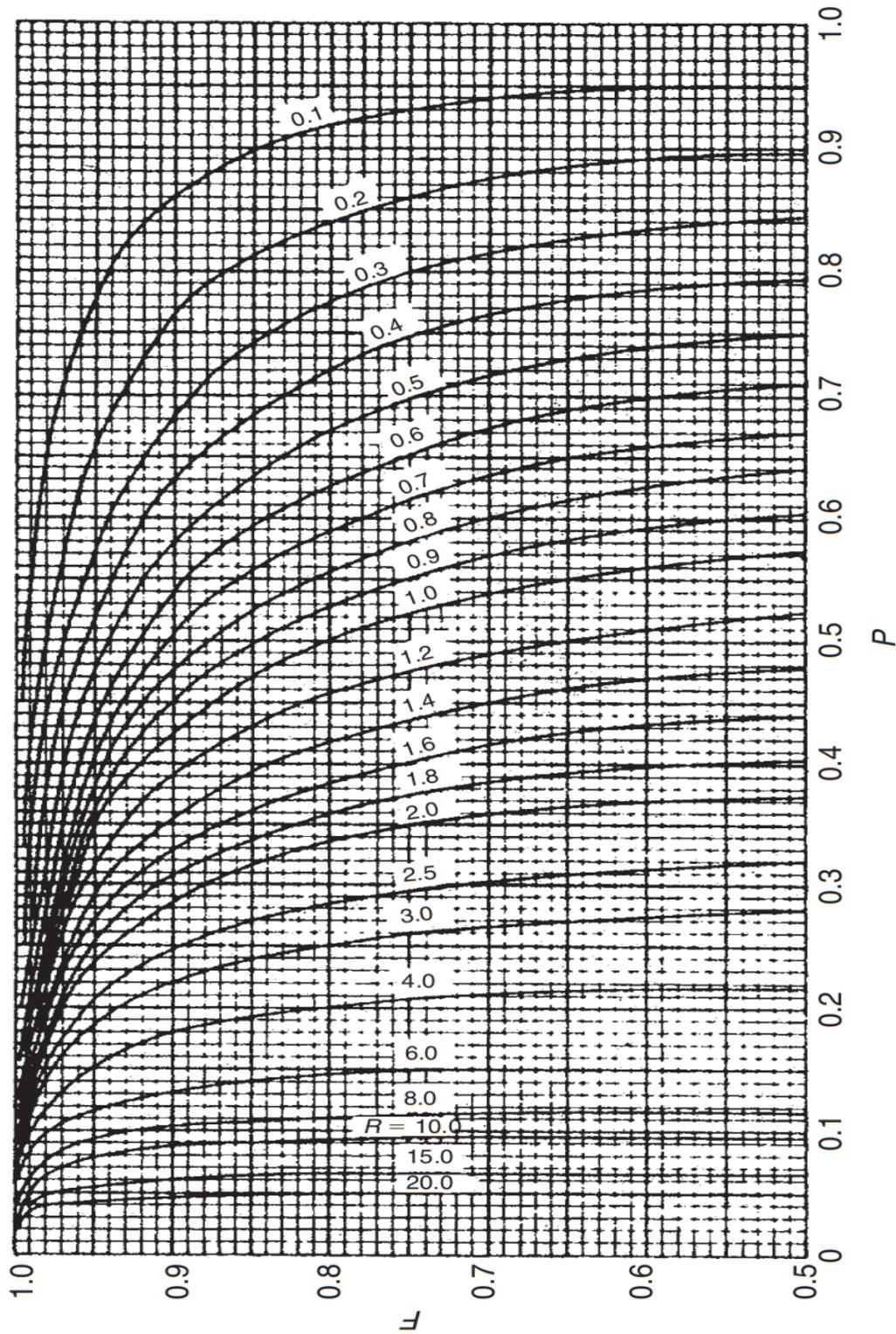
$$P = \frac{T_{GAS\ SALIENTE} - T_{GAS\ ENTRANTE}}{T_{AGUA\ ENTRANTE} - T_{GAS\ ENTRANTE}}$$

$$P = \frac{60\text{ °C} - 210\text{ °C}}{15\text{ °C} - 210\text{ °C}}$$

$$P = 0.77$$

De la figura 4.7 utilizando los valores hallados de P y R se halla el valor del coeficiente de corrección f

Figura 4.7 Factor de corrección de LMTD para 1-2,4,6



Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

$$F = 0.81$$

Luego se procede a asumir un valor de diseño del coeficiente global de transferencia de acuerdo a los fluidos involucrados en el caso del fluido caliente que llegaría a ser el gas procedente de la pirolisis y el fluido refrigerante que llegaría a ser el agua.

**Tabla 4.22 Relación de fluido de coraza y de tubo para el coeficiente global de transferencia de diseño**

| FLUIDO LADO DE LA CORAZA | FLUIDO LADO DEL TUBO | U DE DISEÑO | SUCIEDAD TOTAL |
|--------------------------|----------------------|-------------|----------------|
| Kerosene o gas oíl       | Agua                 | 25 - 50     | 0.005          |
| Kerosene o gas oíl       | Oíl                  | 20 - 35     | 0.005          |
| Kerosene o jet fuel      | Tricloroetileno      | 40 - 50     | 0.0015         |
| Naphhta                  | Agua                 | 50 - 70     | 0.005          |
| Naphhta                  | Oíl                  | 25 - 35     | 0.005          |

Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

Se utiliza la relacion de gas oil y agua porque es el producto que e pretende obtener en este proceso y que circulara por el shell y el liquido refrigerante sera agua que circulara por los tubos

$$U = 25 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

Después de obtener los valores de las variables se procede despejar la variable de área de la ecuación 4.27

$$Q = AUf\Delta T_{LTMD}$$

$$A = \frac{Q}{Uf\Delta T_{LTMD}}$$

Remplazando los valores de las variables

$$A = \frac{291457 \frac{BTU}{h}}{25 \left( \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F} \right) * 0.81 * 154.466 \text{ } ^\circ F}$$

$$A = 93.18 ft^2$$

Utilizando la ecuación 4.28

$$A = \pi n_T D_O L$$

Teniendo el valor del área se procede a hallar el número de tubos ( $n_T$ )

$$n_T = \frac{A}{\pi D_O L}$$

$$n_T = \frac{93.18 (ft^2)}{\pi * \frac{1}{12} (ft) * 4.5 (ft)}$$

$$n_T = 118.640 \approx 119 \text{ tubos}$$

Calculo del número de Reynolds con la ecuación 4.29

$$Re = \frac{4m\dot{n}_p}{\mu_{agua}\pi d_i n_T}$$

$$Re = \frac{4 * 0.4167 (kg/s) * n_p}{1 \times 10^{-3} (Pa - s) * \pi * 0.0212 (m) * 119}$$

El número de Reynolds debe ser mayor a  $Re \geq 4000$ , por esta razón se necesita darle un valor a  $n_p$  de tal forma que cumpla con la condición. El valor de  $n_p$  puede ser 2, 4 y 6

Se realiza una tabla del valor del número de Reynolds para cada valor de  $n_p$

**Tabla 4.23 Resultados del número de Reynolds en función del número de pasos**

| Re       | $n_p$ |
|----------|-------|
| 420.611  | 2     |
| 841.222  | 4     |
| 1261.833 | 6     |

Fuente: Elaboración propia

Se observa que no cumple la condición para ninguno de los números de fases. Entonces se procede a cambiar la configuración de inicial del condensador. Se tomará el valor extremo superior del coeficiente global de transferencia de calor de diseño de la tabla 4.22

$(U_{DISEÑO} = 50 \frac{BTU}{h ft^2 °F})$  y se procederá a aumentar el valor de la longitud de tubos en rangos de 0.5 ft hasta encontrar el valor que se acomode a la condición  $Re \geq 4000$

Entonces el nuevo valor del Área de transferencia de calor utilizando el otro valor extremo de diseño  $(U_{DISEÑO} = 50 \frac{BTU}{h ft^2 °F})$  es el siguiente:

$$A = \frac{291457 \frac{BTU}{h}}{50 \left( \frac{BTU}{h ft^2 °F} \right) * 0.81 * 154.466 °F}$$

$$A = 38.01 ft^2$$

Utilizando el nuevo valor del área de transferencia de calor y las ecuaciones 4.28 y 4.29 se realiza la tabla 4.24

**Tabla 4.24 Cambio se la configuración inicial del intercambiador para  $Re \geq 4000$**

| A (ft)       | L (ft)   | $n_T$                                | Re ( $n_p = 6$ ) |
|--------------|----------|--------------------------------------|------------------|
| 38.01        | 3        | 48.39 $\approx$ 49                   | 3128.295         |
| 38.01        | 3.5      | 41.48 $\approx$ 42                   | 3662.39          |
| <b>38.01</b> | <b>4</b> | <b>36.29 <math>\approx</math> 37</b> | <b>4058.339</b>  |

Fuente Elaboración propia

Se observa que para esa configuración el Numero de Reynolds (Re) cumple con la condición ( $Re \geq 4000$ ). Entonces con los siguientes valores de configuración se procede a buscar los valores estándar en la tabla 4.25

$$Re = 4058.339$$

$$A = 38.01 ft^2$$

$$A = 4 ft$$

$$n_T = 37$$

$$n_p = 6$$

Tabla 4.25 Recuento de tubos de 1in de OD en 1.25 in Square Pitch

| CORAZA<br>ID (in) | TEMA P o S      |      |      |      | TEMA U          |      |      |
|-------------------|-----------------|------|------|------|-----------------|------|------|
|                   | Numero de pasos |      |      |      | Numero de pasos |      |      |
|                   | 1               | 2    | 4    | 6    | 2               | 4    | 6    |
| 8                 | 17              | 12   | 8    | 12   | 14              | 8    | 6    |
| 10                | 30              | 30   | 16   | 18   | 30              | 24   | 12   |
| 12                | 52              | 48   | 42   | 24   | 44              | 40   | 32   |
| 13                | 61              | 56   | 52   | 50   | 60              | 48   | 44   |
| 15                | 85              | 78   | 62   | 64   | 80              | 72   | 74   |
| 17                | 108             | 108  | 104  | 96   | 104             | 100  | 100  |
| 19                | 144             | 136  | 130  | 114  | 132             | 132  | 120  |
| 21                | 173             | 166  | 154  | 156  | 172             | 168  | 148  |
| 23                | 217             | 208  | 194  | 192  | 212             | 204  | 198  |
| 25                | 252             | 240  | 230  | 212  | 244             | 240  | 230  |
| 27                | 296             | 280  | 270  | 260  | 290             | 284  | 274  |
| 29                | 345             | 336  | 310  | 314  | 340             | 336  | 328  |
| 31                | 402             | 390  | 366  | 368  | 400             | 384  | 372  |
| 33                | 461             | 452  | 432  | 420  | 456             | 444  | 440  |
| 35                | 520             | 514  | 494  | 484  | 518             | 504  | 502  |
| 37                | 588             | 572  | 562  | 548  | 584             | 576  | 566  |
| 39                | 661             | 640  | 624  | 620  | 664             | 644  | 640  |
| 42                | 776             | 756  | 738  | 724  | 764             | 748  | 750  |
| 45                | 900             | 882  | 862  | 844  | 902             | 880  | 862  |
| 48                | 1029            | 1016 | 984  | 972  | 1028            | 1008 | 1004 |
| 54                | 1310            | 1296 | 1268 | 1256 | 1320            | 1296 | 1284 |
| 60                | 1641            | 1624 | 1595 | 1576 | 1634            | 1616 | 1614 |

Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

$$D_{SHELL} = 13^{1/4} \text{ in}$$

TEMA "U"

$$n_T = 44$$

Con los valores estándar hallados se procede a calcular con la ecuación 4.30 el coeficiente global de transferencia requerido  $U_{REQ}$

$$U_{REQ} = \frac{Q}{Af \Delta T_{LTMD}}$$

$$U_{REQ} = \frac{Q}{\pi D_o n_T L f \Delta T_{LTMD}}$$

$$U_{REQ} = \frac{291457 \frac{BTU}{h}}{\pi * \left(\frac{1}{12}\right) ft * 44 * 4(ft) * 0.81 * 154.466 \text{ }^\circ\text{F}}$$

$$U_{REQ} = 50.556 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ }^\circ\text{F}}$$

#### 4.2.1.2.3 CÁLCULO PARA EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASFERENCIA DE CALOR $U_{CAL}$

##### 4.2.1.2.3.1 CÁLCULO DE $h_i$ PARA LOS TUBOS

Primero se procede a calcular el Número de Reynolds ( $Re$ ) con la ecuación 4.29

$$Re = \frac{4m\dot{n}_p}{\mu_{agua}\pi d_i n_T}$$

$$Re = \frac{4 * 0.4167(kg/s) * 6}{1 \times 10^{-3}(Pa - s) * \pi * 0.0212(m) * 44}$$

$$Re = 4058.339$$

Luego se procede a calcular el Número de Prandtl ( $P_T$ ) con la ecuación 4.31

$$P_T = \frac{C_p \mu_{AGUA}}{k}$$

$$P_T = \frac{4186 \left(\frac{J}{Kg K}\right) * 1 \times 10^{-3}(Pa - s)}{0.6 \left(\frac{W}{m K}\right)}$$

$$P_T = 6.976$$

Con los valores de Numero de Reynolds ( $Re$ ) y Numero de Prandtl ( $P_T$ ). Se procede a calcular el Numero de Nusselt ( $Nu$ ) con la ecuación 4.32

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} P_T^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

$$Nu = 0.023 * (4058.339)^{0.8} * (6.976)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \right)^{0.14}$$

$$Nu = 33.853$$

Para determinar el valor de  $h_i$  para los tubos del condensador empleamos la ecuación 4.33

$$h_i = \frac{Nuk}{d_i}$$

$$h_i = \frac{33.853 * 0.6 \left( \frac{W}{mK} \right)}{0.0212(m)}$$

$$h_i = 958.104 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) = 546.719 \left( \frac{BTU}{hr ft^2 ^\circ F} \right)$$

#### 4.2.1.2.3.2 CÁLCULO DE $h_0$ PARA EL SHELL

Para poder calcular el Numero de Reynolds para el flujo dentro del Shell primero se necesita calcular las siguientes relaciones (4.34), (4.35), (4.36), (4.37) y (4.38)

$$\frac{B}{D_{SHELL}} = 0.5$$

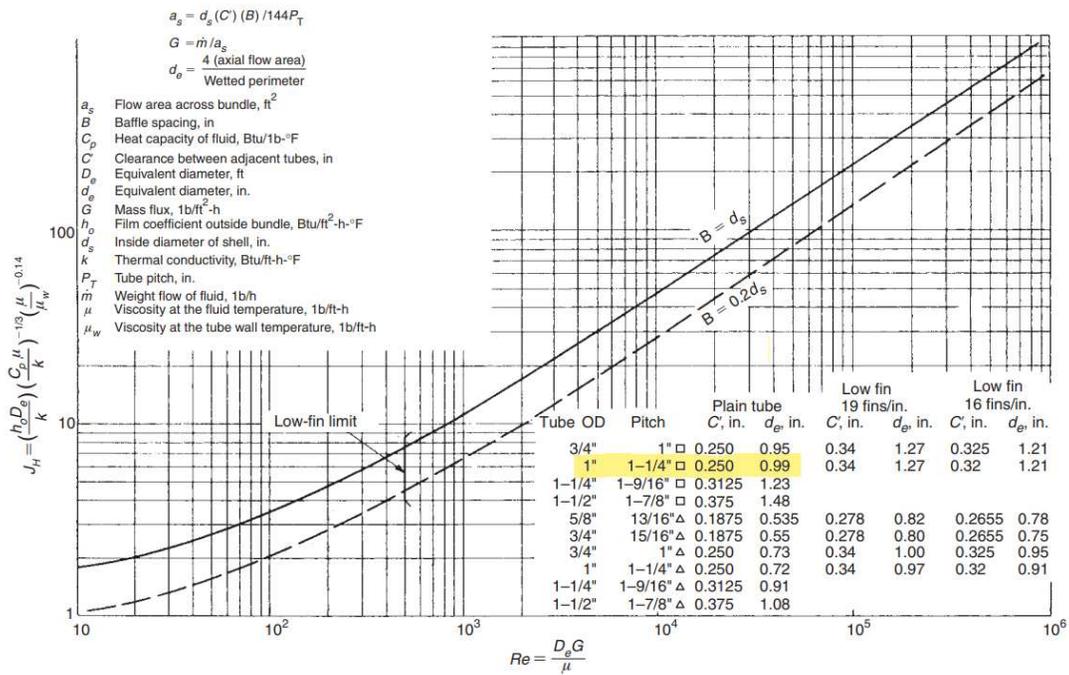
$$a_s = \frac{D_{SHELL} C' B}{144 P_T}$$

$$G = \frac{\dot{m}}{a_s}$$

$$Re = \frac{d_e G}{12\mu}$$

$$j = 0.5 \left( 1 - \frac{B}{D_{SHELL}} \right) (0.08 Re^{0.6821} + 0.7 Re^{0.1772})$$

Figura 4.7 Correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor del lado del Shell



Fuente: Process heat transfer principles and application, Robert W Serth

Los valores que nos proporciona la tabla son los siguientes

$$C' = 0.25$$

$$d_e = 0.99$$

También se calculó el valor del diámetro del Shell

$$D_{SHELL} = 13.25 \text{ in}$$

Primero se debe calcular el valor del Numero de Prandtl ( $P_T$ )

$$P_T = \frac{C_P \mu_{GAS OIL}}{k_{GAS OIL}}$$

$$P_T = \frac{2100 \left( \frac{J}{Kg K} \right) * 5 \times 10^{-3} (Pa - s)}{0.13 \left( \frac{W}{m K} \right)}$$

$$P_T = 80.769$$

Remplazando los valores obtenidos en la ecuación 4.34 para obtener el valor del espaciamiento de baffles (B)

$$\frac{B}{13.25 \text{ (in)}} = 0.5$$

$$B = 6.625 \text{ (in)}$$

Remplazando el valor de B en 4.35 para calcular el área de flujo a través del haz ( $a_s$ )

$$a_s = \frac{D_{SHELL} C' B}{144 P_T}$$

$$a_s = \frac{13.25 \text{ (in)} * 0.25 * 6.625 \text{ (in)}}{144 * 80.769}$$

$$a_s = 1.8868 \times 10^{-3} \text{ (ft}^2\text{)}$$

Remplazando el valor de ( $a_s$ ) en 4.36 para calcular el flujo másico en el Shell (G)

$$G = \frac{\dot{m}_L}{a_s}$$

$$\dot{m}_L = 0.1 \dot{m}$$

$$G = \frac{1102.29 * 0.1 \left(\frac{Lb}{hr}\right)}{1.547 \times 10^{-3} \text{ (ft}^2\text{)}}$$

$$G = 26499.89 \left(\frac{Lb}{ft \text{ hr}}\right)$$

Remplazando el valor de (G) en 4.37 para calcular el Numero de Reynolds para el flujo dentro del Shell (Re)

$$Re = \frac{d_e G}{12 \mu}$$

$$Re = \frac{0.99 \text{ (in)} * 26499.89 \left(\frac{Lb}{ft \text{ hr}}\right)}{12 * 12.095}$$

$$Re = 180.75$$

Una vez hallando el valor del Numero de Reynolds para el flujo dentro del Shell (Re) se procede a calcular el valor del coeficiente “J” con la ecuación 4.38

$$j = 0.5 \left( 1 - \frac{B}{D_{SHELL}} \right) (0.08 Re^{0.6821} + 0.7 Re^{0.1772})$$

$$j_H = 0.5(1 - 0.5) * (0.08 * (180.75)^{0.6821} + 0.7 * (180.75)^{0.1772})$$

$$j_H = 1.1323$$

Después de calcular el factor j y utilizando todos los valores de las variables calculadas Procedemos a calcular el  $h_0$  con la ecuación 4.39

$$h_0 = j_H \left( \frac{k}{D_e} \right) P_T^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$h_0 = 1.132 \left( \frac{0.0751 \frac{BTU}{hr ft^{\circ}F}}{\frac{0.99}{12} (ft)} \right) (80.769)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{5 \times 10^{-3} (Pa - s)}{1 \times 10^{-3} (Pa - s)} \right)^{0.14}$$

$$h_0 = 5.58 \frac{BTU}{hr ft^2 \circ F}$$

Se procede a calcular el parámetro lockhart-Martinelli 4.41 para relacionar la transferencia de calor con el cambio de fase que se produce en el intercambiador

$$X_{tt} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_v}{\mu_L} \right)^{0.1} \quad (4.41)$$

$$X_{tt} = \left( \frac{1-0.9}{0.9} \right)^{0.9} \left( \frac{2.65}{850} \right)^{0.5} \left( \frac{5 \times 10^{-3}}{7.437 \times 10^{-12}} \right)^{0.1}$$

$$X_{tt} = 0.059$$

Una vez calculado el parámetro lockhart-Martinelli se procede a remplazar en la ecuación

$$\frac{h}{h_L} = 1.26(X_{tt})^{-0.78}$$

$$\frac{h}{5.58 \frac{BTU}{hr ft^2 \circ F}} = 1.26(0.059)^{-0.78}$$

$$h = 63.935 \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

Finalmente se procede a calcular el coeficiente global de transferencia de calor calculado con la ecuación 4.40. Para que el diseño sea aceptado debe cumplirse la condición de que  $U_{CAL} > U_{REQ}$

$$U_{CAL} = \frac{1}{\frac{D_0}{h_i D_i} + \frac{D_0 \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)}{2k} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_{CAL} = \frac{1}{\frac{1(in)}{546.719 \left(\frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F}\right) * 0.834(in)} + \frac{\frac{1}{12}(ft) * \ln\left(\frac{1}{0.834}\right)}{2 * 27 \left(\frac{BTU}{hr ft \text{ } ^\circ F}\right)} + \frac{1}{63.935 \frac{BTU}{hr ft^2 \text{ } ^\circ F}}$$

$$U_{CAL} = 55.205 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

Cumple la condición de diseño

$$U_{CAL} > U_{REQ}$$

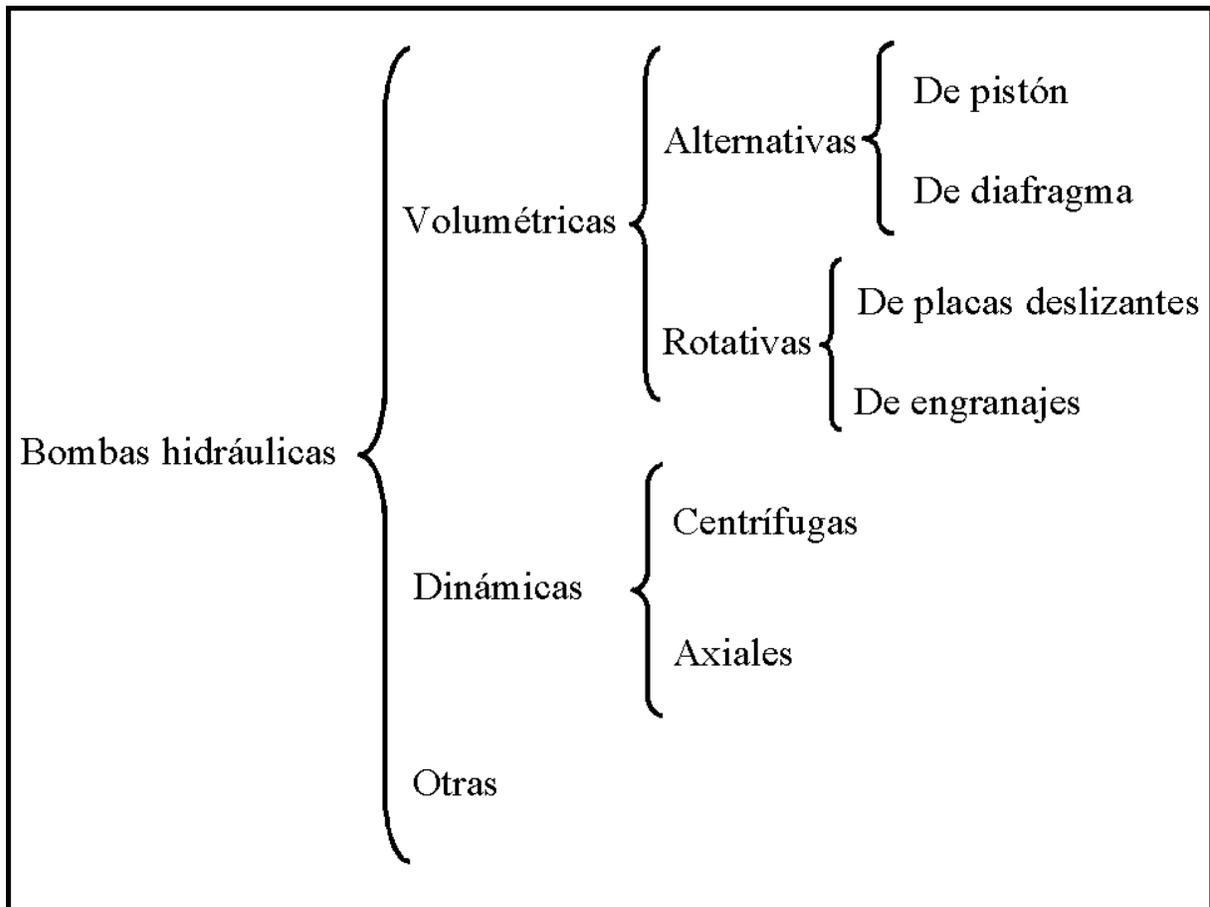
$$55.205 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F} > 50.556 \frac{BTU}{h ft^2 \text{ } ^\circ F}$$

### 4.3 SELECCIÓN DE BOMBAS

Las bombas se seleccionarán bajo los siguientes criterios

Para la selección del tipo de bomba en el caso de una pequeña instalación industrial se pretende hacer énfasis en 2 tipos de bombas denominadas rotodinámicas que son centrífugas y axiales de la figura 4.8

Figura 4.8 Tipo de bombas



Fuente: Robert L Mott, Mecánica de fluidos

#### 4.3.1 CÁLCULO DE LA ALTURA DE SUCCIÓN REQUERIDO

$$NPSH_{DISPONIBLE} > 1.1 NPSH_{REQUERIDO} \quad (4.42)$$

$$NPSH_{DISPONIBLE} = H_S + H_A - H_{VP} - H_F \quad (6.43)$$

Donde:

$H_S$ : Presión estática del fluido

$H_A$ : Altura de Aspiración

$H_{VP}$ : Presión de Vapor

$H_F$ : Perdidas debido a la sección de aspiración

Primero se procede a calcular el valor de  $NPSH_{DISPONIBLE}$  de la bomba de acuerdo la ecuación

Como el tanque de almacenaje de agua se encuentra abierto al ambiente se encuentra sometido a la presión atmosférica por esta razón la presión estática del fluido es considerada la presión atmosférica del lugar correspondiente. La ciudad de La Paz se encuentra a 3600 m del nivel del mar por esta razón la presión atmosférica es menor los valores se encuentran en la siguiente tabla 4.26

**Tabla 4.26 Variación de la presión atmosférica con respecto a la altura del nivel del mar**

| <b>DISMINUCIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA</b> |           |                                 |           |
|--|-----------|---------------------------------|-----------|
| <b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>         |           | <b>PRESIÓN ATMOSFÉRICA (Pa)</b> |           |
| <b>m</b>                                     | <b>ft</b> | <b>m</b>                        | <b>Pa</b> |
| 0  | 0         | 10.33                           | 14.69     |
| 250  | 820       | 10.03                           | 14.26     |
| 500  | 1640      | 9.73                            | 13.83     |
| 750  | 2640      | 9.43                            | 13.41     |
| 1000   | 3280      | 9.13                            | 12.98     |
| 1250   | 4101      | 8.83                            | 12.55     |
| 1500   | 4291      | 8.53                            | 12.13     |
| 1750   | 5741      | 8.25                            | 11.73     |
| 2000   | 6561      | 8.00                            | 11.38     |
| 2250   | 7381      | 7.75                            | 11.02     |
| 2500   | 8202      | 7.57                            | 10.68     |
| 2750   | 9022      | 7.28                            | 10.35     |
| 3000   | 9842      | 7.05                            | 10.02     |
| 3250   | 10662     | 6.83                            | 9.71      |
| 3500   | 11483     | 6.62                            | 9.42      |

Fuente: International Critical Tables vol 5 McGraw Hill book Company

Como no se encuentra en la tabla el valor en metros de columna de agua a 3600 m se procede a interpolar el valor:

$$3250 \text{ m (Altura)} = 6.83 \text{ m (columna de H}_2\text{O)}$$

$$3500 \text{ m (Altura)} = 6.62 \text{ m (columna de H}_2\text{O)}$$

$$3600 \text{ m (Altura)} = X \text{ m (columna de H}_2\text{O)}$$

$$\frac{3250 \text{ m} - 3600 \text{ m}}{3250 \text{ m} - 3500 \text{ m}} = \frac{6.83 \text{ m} - X}{6.83 \text{ m} - 6.62 \text{ m}}$$

$$X = 6.536 = H_s$$

Luego se procede a calcular la presión de vapor del fluido que en este caso es agua

**Tabla 4.27 Presion de vapor de agua a diferentes temperaturas**

| TEMPERATURA<br>(°C) | PRESIÓN DE<br>VAPOR (KPa) | PESO<br>ESPECIFICO<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | CARGA DE<br>PRESIÓN DE<br>VAPOR (m) |
|---------------------|---------------------------|--|-------------------------------------|
| 0                   | 0.6105                    | 9.806                                      | 0.06226                             |
| 5                   | 0.8722                    | 9.807                                      | 0.08894                             |
| 10                  | 1.228                     | 9.804                                      | 0.1253                              |
| 20                  | 2.338                     | 9.789                                      | 0.2388                              |
| 30                  | 4.243                     | 9.765                                      | 0.4345                              |
| 40                  | 7.376                     | 9.731                                      | 0.7580                              |
| 50                  | 12.33                     | 9.690                                      | 1.272                               |
| 60                  | 19.92                     | 9.642                                      | 2.066                               |
| 70                  | 31.16                     | 9.589                                      | 3.250                               |
| 80                  | 47.34                     | 9.530                                      | 4.967                               |
| 90                  | 70.10                     | 9.467                                      | 7.405                               |
| 100                 | 101.3                     | 9.399                                      | 10.78                               |

Fuente: International Critical Tables vol 5 McGraw Hill book Company

Como no se encuentra en la tabla el valor en metros de columna de agua a 15 °C m se procede a interpolar el valor aproximado

$$10 \text{ (}^\circ\text{C)} = 0.1253 \text{ m (columna de H}_2\text{O)}$$

$$15 \text{ (}^\circ\text{C)} = X \text{ m (columna de H}_2\text{O)}$$

$$20\text{ (}^\circ\text{C)} = 0.2388\text{ m (columna de H}_2\text{O)}$$

$$\frac{10\text{ (}^\circ\text{C)} - 15\text{ (}^\circ\text{C)}}{10\text{ (}^\circ\text{C)} - 20\text{ (}^\circ\text{C)}} = \frac{0.1253\text{ m} - X}{0.1253\text{ m} - 0.2388\text{ m}}$$

$$X = 0.18205 = H_{VP}$$

### 4.3.2 PERDIDA POR LONGITUD DE TUBERÍA Y ACCESORIOS

Para poder determinar el valor de la pérdida a lo largo de la tubería primero se procede a calcular el número de Reynolds para el agua con la ecuación 6.44

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi D i \mu} \quad (6.44)$$

$$Re = \frac{4 * 4.1667 * 10^{-4} \left(\frac{m^3}{s}\right) * 1000\text{ (Kg/m}^3\text{)}}{\pi * 0.0254\text{ (m)} * 1 * 10^{-3}\text{ (Pa-s)}}$$

$$Re = 20886.4755$$

Como el fluido sigue un régimen turbulento  $Re > 4000$  se procede a utilizar la ecuación de Colebrook 6.45 para determinar el factor de fricción de la tubería

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \left( \frac{\epsilon}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6.45)$$

Donde:

$\epsilon$ : Coeficiente de rugosidad

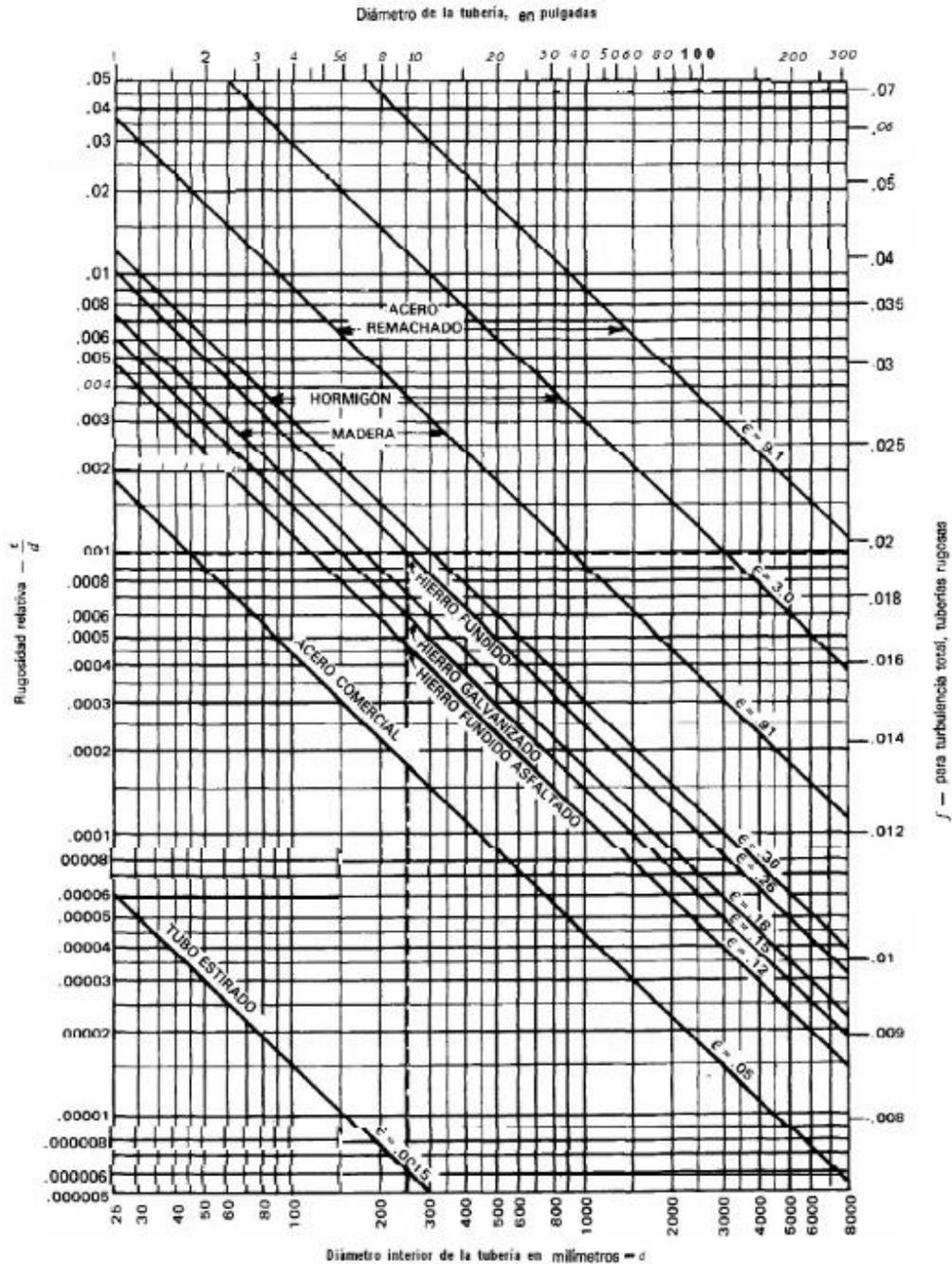
$Re$ : Número de Reynolds

$f$ : Factor de fricción

El valor de  $\epsilon$  se determina mediante la figura

Se necesita determinar el valor de la rugosidad relativa del material que se pretende utilizar para las tuberías de agua para el sistema de bombeo

Figura 4.9 Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías



Fuente: Crane, Apéndice A, Propiedades físicas de algunos fluidos y características del flujo en válvulas, accesorios y tuberías

De la figura se determina el valor del coeficiente de rugosidad ( $\epsilon$ )

$$\epsilon = 0.005$$

Remplazando en la ecuación 6.42

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \left( \frac{0.005}{3.7} + \frac{2.51}{20886.4755 \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.034$$

Luego se procede a calcular la velocidad del fluido con la siguiente ecuación

$$Q = A * v$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4.1667 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} * [0.0254(m)]^2}$$

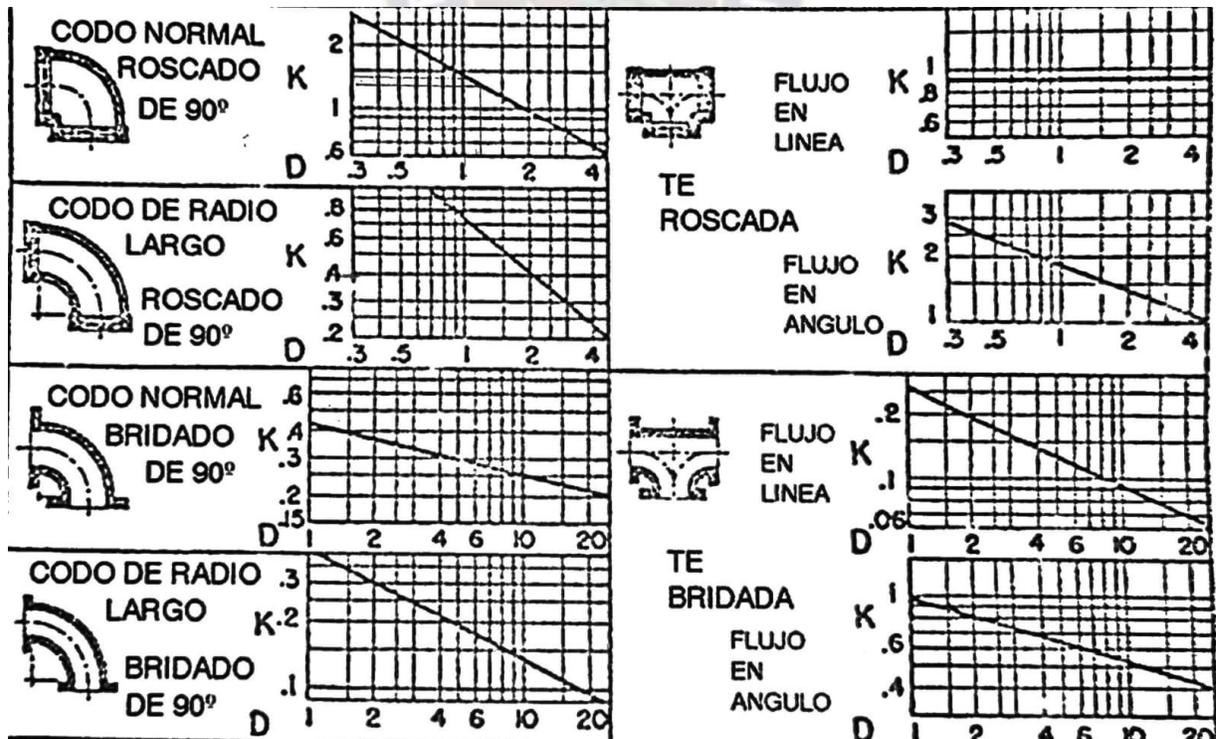
$$v = 0.822 \frac{m}{s}$$

Reemplazando todos los valores determinados en la ecuación

$$H_F = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g} + 2K_{CODO\ 90^\circ} \frac{v^2}{2g} + K_{VALVULA\ COMP} \frac{v^2}{2g}$$

Para determinar los valores de  $K_{CODO\ 90^\circ}$  y  $K_{VALVULA\ COMP}$  se utilizan las siguientes figuras

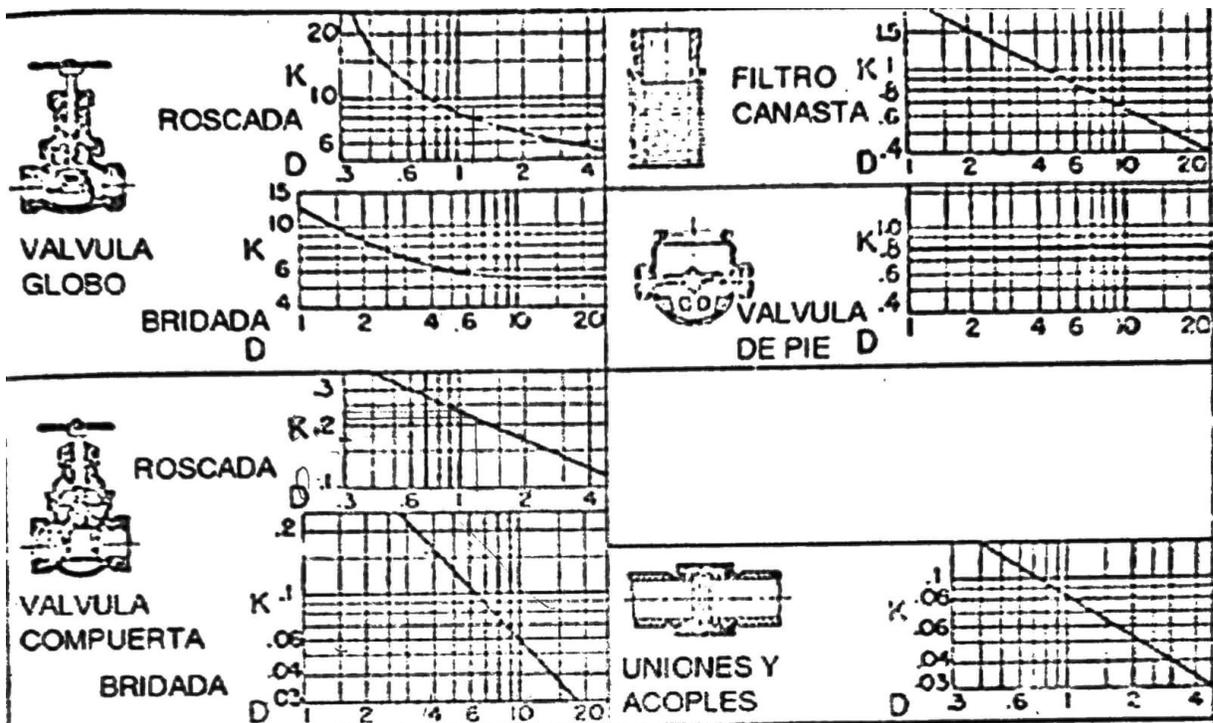
Figura 4.10 Coeficientes de resistencia para codos



Fuente: Hydraulics Institute para método de cargas

$$K_{CODO 90^\circ} = 1.5$$

Figura 4.11 Coeficientes de resistencia para válvulas, uniones y acoples



Fuente: Hydraulics Institute para método de cargas

$$K_{VALVULA COMP} = 0.25$$

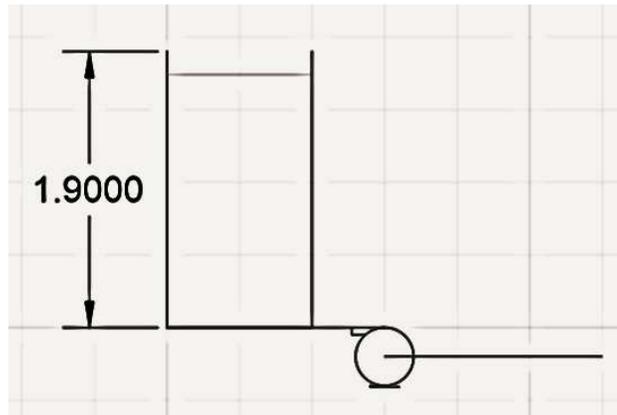
Remplazando en la ecuación

$$H_F = 0.034 \left( \frac{5 \text{ m}}{0.0254 \text{ m}} \right) \frac{(0.822 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 2 * 1.5 * \frac{(0.822 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0.25 \frac{(0.822 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_F = 0.342 \text{ m}$$

Para determinar el valor de  $H_A$  se debe definir la ubicación de la bomba con respecto al tope del nivel de succión de la bomba en el caso que estuviera por encima de la bomba este valor es positivo y si estuviera por debajo el valor es negativo. La ubicación se observa en la figura 6.12 en este caso el valor es de 1.9 m de columna de agua

**Figura 4.12** Ubicación del nivel del agua del tanque con respecto a la bomba



Fuente: Elaboración propia

$$H_A = +1.9 \text{ m}$$

Remplazando todos los valores determinados en la ecuación 4.43

$$NPSH_{DISPONIBLE} = H_S + H_A - H_{VP} - H_F$$

$$NPSH_{DISPONIBLE} = 6.536 \text{ m} + 1.9 \text{ m} - 0.18205 \text{ m} - 0.342 \text{ m}$$

$$NPSH_{DISPONIBLE} = 7.912 \text{ m}$$

Remplazando en valor determinado en la ecuación 4.42

$$NPSH_{DISPONIBLE} > 1.1 NPSH_{REQUERIDO}$$

$$\frac{NPSH_{DISPONIBLE}}{1.1} > NPSH_{REQUERIDO}$$

$$\frac{7.912}{1.1} > NPSH_{REQUERIDO}$$

$$7.1927 > NPSH_{REQUERIDO}$$

#### 4.4 SIMULACIÓN DEL PROCESO

En esta sección se pretende analizar la operación de un reactor de pirólisis y equipos de condensación, que sería los equipos primordiales en una planta piloto. Así también se pretende analizar el comportamiento de los plásticos utilizados en la alimentación (PP, PS y HDPE) y los diferentes productos con fines energéticos dependiendo del Polímero. Por esta razón es indispensable el uso de herramientas computacionales que ayuden a simular y estimar la cantidad y la composición de los productos obtenidos de la pirólisis de plástico. Para este fin, uno de los softwares computacionales que son frecuentemente utilizados en procesos químicos y petroquímicos es el software Aspen Plus Debido a que el software Aspen plus no contiene en su biblioteca de compuestos los polímeros mencionados (PP, PS y HDPE) se necesita añadir de manera independiente cada polímero y sus propiedades. Por esta razón la tabla 1 se presenta una clasificación de estos materiales de acuerdo con su composición según análisis próximo, es decir, su contenido de humedad, carbono fijo, material volátil y cenizas, así como su análisis último o elemental (contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, etc).

**Tabla 4.28 Análisis próximo y ultimo de algunos plásticos comunes en los residuos sólidos**

| Caracterización           | PP     | PS     | HDPE   |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| Análisis próximo (% peso) |        |        |        |
| Humedad                   | 0,180  | 0,250  | 0,070  |
| Carbono fijo              | 0,200  | 0,120  | 0,030  |
| Material Volátil          | 97,620 | 99,630 | 98,500 |
| Cenizas                   | 2,000  | 0,100  | 1,400  |
| Análisis ultimo (% peso)  |        |        |        |
| C                         | 83,000 | 88,410 | 83,900 |
| H                         | 14,800 | 7,480  | 14,690 |
| O                         | 0,190  | 1,300  | 0,005  |
| N                         | 0,008  | 2,700  | 0,003  |
| S                         | 0,001  | 0,005  | 0,001  |
| CL                        | 0,001  | 0,005  | 0,001  |
| Cenizas                   | 2,000  | 0,100  | 1,400  |

Fuente: S. D. Sharuddin et al, A review on pyrolysis of plastic wastes, 2016;

#### 4.4.1 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN

Teniendo los valores de los análisis próximo y último de los polímeros involucrados se inicia el procedimiento ingresando en la sección de "Properties" todas las sustancias y compuestos necesarios para simular el proceso de pirolisis.

**Figura 4.13** Compuestos empleados para la simulación del proceso

| Component ID | Type            | Component name  | Alias   |
|--------------|-----------------|-----------------|---------|
| POLIESTI     | Nonconventional |                 |         |
| CARBO-01     | Solid           | CARBON-GRAPHITE | C       |
| HYDRO-01     | Conventional    | HYDROGEN        | H2      |
| OXYGE-01     | Conventional    | OXYGEN          | O2      |
| NITRO-01     | Conventional    | NITROGEN        | N2      |
| SULFU-01     | Solid           | SULFUR          | S       |
| WATER        | Conventional    | WATER           | H2O     |
| METHA-01     | Conventional    | METHANE         | CH4     |
| ETHAN-01     | Conventional    | ETHANE          | C2H6    |
| ETHYL-01     | Conventional    | ETHYLENE        | C2H4    |
| PROPA-01     | Conventional    | PROPANE         | C3H8    |
| PROPY-01     | Conventional    | PROPYLENE       | C3H6-2  |
| N-BUT-01     | Conventional    | N-BUTANE        | C4H10-1 |
| N-BUT-02     | Conventional    | N-BUTANE        | C4H10-1 |
| 1-PEN-01     | Conventional    | 1-PENTENE       | C5H10-2 |
| N-PEN-01     | Conventional    | N-PENTANE       | C5H12-1 |
| N-HEX-01     | Conventional    | N-HEXANE        | C6H14-1 |
| 1-HEX-01     | Conventional    | 1-HEXENE        | C6H12-3 |
| N-HEP-01     | Conventional    | N-HEPTANE       | C7H16-1 |

|          |              |                             |           |
|----------|--------------|-----------------------------|-----------|
| 1-HEP-01 | Conventional | 1-HEPTENE                   | C7H14-7   |
| 1-MET-01 | Conventional | 1-METHYLCYCLOPENTENE        | C6H10-D1  |
| 2:5-D-01 | Conventional | 2,5-DIMETHYL-1,5-HEXADIENE  | C8H14-D2  |
| 2:2:3-01 | Conventional | 2,2,3-TRIMETHYLPENTANE      | C8H18-12  |
| 1:1-D-01 | Conventional | 1,1-DIMETHYLCYCLOPENTANE    | C7H14-2   |
| N-OCT-01 | Conventional | N-OCTANE                    | C8H18-1   |
| 1-OCT-01 | Conventional | 1-OCTENE                    | C8H16-16  |
| 1:1-D-02 | Conventional | 1,1-DIMETHYLCYCLOHEXANE     | C8H16-1   |
| N-NON-01 | Conventional | N-NONANE                    | C9H20-1   |
| 1-NON-01 | Conventional | 1-NONENE                    | C9H18-3   |
| BENZE-01 | Conventional | BENZENE                     | C6H6      |
| TOLUE-01 | Conventional | TOLUENE                     | C7H8      |
| ETHYL-02 | Conventional | ETHYLBENZENE                | C8H10-4   |
| 1:2:3-01 | Conventional | 1,2,3-TRIMETHYLBENZENE      | C9H12-6   |
| PHENO-01 | Conventional | PHENOL                      | C6H6O     |
| ALPHA-01 | Conventional | ALPHA-METHYL-STYRENE        | C9H10     |
| 1-MET-02 | Conventional | 1-METHYL-4-ISOPROPYLBENZ... | C10H14-7  |
| N-BUT-03 | Conventional | N-BUTYLBENZENE              | C10H14-1  |
| 2-ISO-01 | Conventional | 2-ISOPROPYLPHENOL           | C9H12O-N1 |

|          |              |                       |           |
|----------|--------------|-----------------------|-----------|
| 2-ISO-01 | Conventional | 2-ISOPROPYLPHENOL     | C9H12O-N1 |
| NAPHT-01 | Conventional | NAPHTHALENE           | C10H8     |
| DIPHE-01 | Conventional | DIPHENYL              | C12H10    |
| 1-TET-01 | Conventional | 1-TETRADECENE         | C14H28-2  |
| 1-PEN-02 | Conventional | 1-PENTADECENE         | C15H30-2  |
| 2-PEN-01 | Conventional | 2-PENTADECENE         | C15H30-N7 |
| ANTHR-01 | Conventional | ANTHRACENE            | C14H10-1  |
| 1-NON-02 | Conventional | 1-NONADECENE          | C19H38-D1 |
| 2-MET-01 | Conventional | 2-METHYL-1-NONADECENE | C20H40-N5 |
| N-HEN-01 | Conventional | N-HENEICOSANE         | C21H44    |
| N-DOC-01 | Conventional | N-DOCOSANE            | C22H46    |
| N-TRI-01 | Conventional | N-TRICOSANE           | C23H48    |
| N-TET-01 | Conventional | N-TETRACOSANE         | C24H50    |
| CHLOR-01 | Conventional | CHLORINE              | CL2       |
| STYRE-01 | Conventional | STYRENE               | C8H8      |
| 1-MET-03 | Conventional | 1-METHYLNAPHTHALENE   | C11H10-1  |
| M-MET-01 | Conventional | M-METHYL-STYRENE      | C9H10-E2  |
| N-PRO-01 | Conventional | N-PROPYLBENZENE       | C9H12-1   |
| CARBO-02 | Conventional | CARBON-MONOXIDE       | CO        |

Fuente: Fuente: Simulación del proceso Aspen plus

Debe declararse a los polímeros como sólidos no convencionales para que luego se pueda introducir los valores del análisis próximo y último. Los valores de entalpía y densidad del polímero provendrán de dichos análisis realizados para el polímero. Posteriormente se declara el método que se utilizara, según la literatura al tratarse de polímeros de emplea el método ideal

**Figura 4.14 Declaración de Sólido no convencional para los polímeros**

Nonconventional component-POLIESTI

Component: POLIESTI

Property models for the selected nonconventional component

| Model name | Option code value |   |   |   |   |  |  |  |  |
|------------|-------------------|---|---|---|---|--|--|--|--|
| Enthalpy   | HCOALGEN          | 1 | 1 | 1 | 1 |  |  |  |  |
| Density    | DCOALIGT          |   |   |   |   |  |  |  |  |

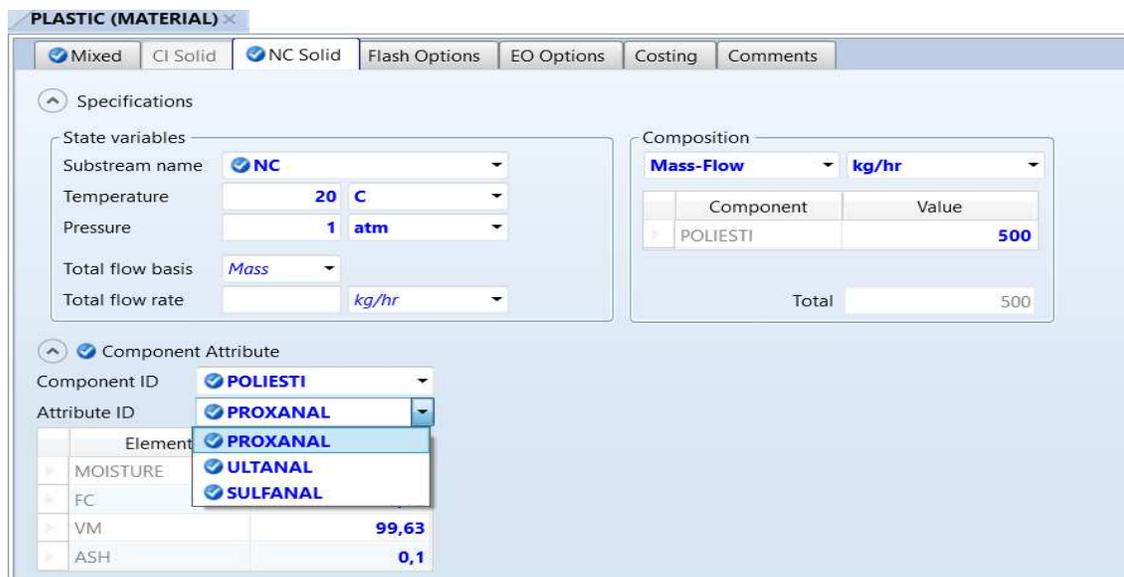
Required component attributes for the selected models

PROXANAL    ULTANAL    SULFANAL

En la sección de "Simulation" Para lograr habilitar la pestaña de "NC Solid" en la corriente "Plastic" debe escogerse la clase de corriente de alimentación como MIXNC para que pueda

ingresar compuestos no convencionales en la carpeta de "Setup". Para la corriente principal de alimentación del proceso "Plastic" debe especificarse con los valores de entrada del plástico

**Figura 4.15 Corriente de entrada del Plástico**



Fuente: Simulación del proceso Aspen plus

Se declara los valores de los análisis Próximo y Ultimo del polímero empleado que se encuentra en la tabla 4.28. Posteriormente se procede añadir los equipos necesarios para el proceso. En tabla 4.29 se realizó un resumen de los equipos utilizados en la simulación con sus especificaciones

**Tabla 4.29 Equipos utilizados en la simulación del proceso de pirolisis y especificaciones**

| Nombre equipo figura | Modelo Aspen Plus | OBSERVACIONES   |
|----------------------|-------------------|---|
| R1                   | RYIELD            | Reactor de rendimiento para descomposición de plásticos (T=450 C) dependiendo del plástico simulado, proceso isobárico (P=1 atm)  |
| R2                   | RGIBBS            | Reactor de pirolisis (T=450 C) predice los productos con más posibilidad de formación de acuerdo a la estabilidad de la energía libre de gibbs, proceso isobárico (P=1 atm) |
| B1                   | SEP               | Separador de solidos restantes, cenizas y gases provenientes de la pirolisis (T=450 C), procesos isobárico (P = 1 atm)  |

| Nombre equipo figura | Modelo Aspen Plus | OBSERVACIONES  |
|----------------------|-------------------|--|
| CD1                  | HEATX             | Intercambiador de calor o condensador a contracorriente, donde se enfría (450 C a 210 C) los gases provenientes de la pirolisis del plástico, el fluido refrigerante es una corriente de agua (15 C) y un caudal (1500 L/Hr)           |
| CD2                  | HEATX             | Intercambiador de calor o condensador a contracorriente, donde se enfría (210 C a 60 C) y condensa los gases provenientes de la pirolisis del plástico, el fluido refrigerante es una corriente de agua (15 C) y un caudal (1500 L/Hr) |

Fuente: Simulación del proceso Aspen plus

Se usó el modelo de reactor RGIBBS de Aspen Plus debida a que este modelo resulta útil para estimar el rendimiento de los productos en sus distintas fases (sólido, líquido y gaseoso) además que la composición de cada uno de ellos a partir de la materia prima que sería el plástico utilizado. La ventaja de este reactor es que no es necesario tener que especificar la cinética ni la estequiometría de la reacción durante el proceso de pirolisis ya que dentro de este se encuentran incluidos estos datos y cálculos que permiten estimar los equilibrios químicos y equilibrios de fase del proceso a partir de los átomos que constituyen las sustancias y compuestos involucrados en la pirolisis mediante la minimización de la energía libre de Gibbs. Por esta razón según las condiciones de operación se evalúa de entre una lista de posibles productos suministrada, los productos más posibles en formarse.

Entre los posibles productos obtenidos en los procesos de pirolisis de plásticos en general según la literatura son: hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, agua, metano, etano, eteno, propano, propeno, butano, pentano, penteno, hexano, hexeno, heptano, hepteno, metilciclopenteno, dimetilhexadeno, trimetilpentano, dimetilciclopentano, octano, octeno, dimetilciclohexano, nonano, noneno, benceno, tolueno, etilbenceno, trimetilbenceno, fenol, metilestireno, metil-isopropilbenceno, butilbenceno, isopropilfenol, naftaleno, difenil, tetradecano, pentadecano, antraceno, metilnoneno, metilnonadecano, estireno, metilnaftaleno, metilestireno, propilbenceno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, nonadecano.

A continuación, se procede a realizar un resumen de las corrientes de entrada para la simulación del proceso de pirolisis, así como las temperaturas y presiones de entrada de los compuestos y los flujos máxicos de las corrientes de entrada

**Tabla 4.30 Corrientes de Entrada del proceso y especificaciones**

| Nombre de corriente | Material de entrada | OBSERVACIONES  |
|---------------------|---------------------|--|
| PLASTIC             | POLIMERO            | La alimentación principal del proceso (m = 500 Kg/Hr) con los diferentes polímeros (Poliestireno, Polietileno de alta densidad y Polipropileno) ingresa a 15 C y a Presión atmosférica (P = 1 atm) |
| H2O-FRIA            | AGUA                | La alimentación de agua ingresa a CD1 (intercambiador 1) como el fluido refrigerante a 15 C y a presión atmosférica (P = 1atm), con un flujo másico (1500 kg/Hr)                                   |
| H2O-FRI2            | AGUA                | La alimentación de agua ingresa a CD2 (intercambiador 1) como el fluido refrigerante a 15 C y a presión atmosférica (P = 1atm), con un flujo másico (1500 kg/Hr)                                   |

Fuente: Fuente: Simulación del proceso Aspen plus

#### 4.4.1.1 CALCULATOR

En la tabla 4.31 se puede ver los valores iniciales de la de las variables introducidas en el sistema que tienen que ver con la composición en átomos de los análisis Próximo y Ultimo

**Tabla 4.31 Variables de ingreso para la descomposición en átomos del polímero**

|   |            |      |
|---|------------|------|
| MASS FLOW PLASTICO WET EN R1 (MFPWR1IN) | 500        | Kg/h |
| MASS FLOW PLASTICO DRY EN R1 (MFPDR1IN) | 498,75     | Kg/h |
| CONVERCION VM                           | 95         | %    |
| MASS FLOW PLASTICO IN OUTLET DE R1      | 25,3439813 | Kg/h |
| ANALISIS PROXIMO DE PLASTICO IN LET     |            |      |
| MOISTURE (MR1IN)                        | 0,25       |      |
| FC (FCR1IN)                             | 0,12       |      |
| VM (VMR1IN)                             | 99,63      |      |
| ASH (AR1IN)                             | 0,1        |      |
| ANALISIS ULTIMO DE PLASTICO IN LET      |            |      |
| ASH (AR1IN2)                            | 0,1        |      |
| CARBON (CR1IN)                          | 88,41      |      |
| HIDROGENO (HR1IN)                       | 7,48       |      |
| NITROGENO (NR1IN)                       | 2,7        |      |
| CLORO (CLR1IN)                          | 0,005      |      |

|                                     |       |  |
|-------------------------------------|-------|--|
| ASUFRE (SR1IN)                      | 0,005 |  |
| OXIGENO (OR1IN)                     | 1,3   |  |
| ANALISIS SUFANAL DE PLASTICO IN LET |       |  |
| ORGANICO (ORR1IN)                   | 0,005 |  |

Fuente: Simulación del proceso en Aspen plus

Posteriormente se realizó un recalcu de las composiciones Tabla 4.32 se pretende no tomar en cuenta la humedad (MOISTURE) y el carbón fijo (FC) debido a que estos no son parte de la reacción de pirolisis que se lleva acabo. Además, se introdujo las variables de salida del reactor RYIELD

**Tabla 4.32 Variables de salida para la descomposición en átomos del polímero**

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| ANÁLISIS PROXIMO DE PLASTICO OUT LET |            |
| MOISTURE (MR1OUT)                    | 0          |
| FC (FCR1OUT)                         | 0          |
| VM (VMR1OUT)                         | 98,0320771 |
| ASH (AR1OUT)                         | 1,96792286 |
| ANALISIS ULTIMO DE PLASTICO OUT LET  |            |
| ASH (AR1OUT2)                        | 1,96792286 |
| CARBON (CR1OUT)                      | 86,7569163 |
| HIDROGENO (HR1OUT)                   | 7,34013951 |
| NITROGENO (NR1OUT)                   | 2,6495156  |
| CLORO (CLR1OUT)                      | 0,00490651 |
| ASUFRE (SR1OUT)                      | 0,00490651 |
| OXIGENO (OR1OUT)                     | 1,2756927  |
| ANALISIS SUFANAL DE PLASTICO IN LET  |            |
| ORGANICO (ORR1OUT)                   | 0,00490651 |

Fuente: Simulación del proceso en Aspen plus

Se realizó el mismo procedimiento para los 3 polímeros (Poliestireno, Polipropileno, Polietileno de alta densidad) y a continuación se presentarán los valores de los bloques (equipos) en la simulación, también las corrientes de salida y los productos obtenidos para cada simulación

## 4.4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

### 4.4.2.1 RESULTADOS POLIESTIRENO

Tabla 4.33 Resultado de las corrientes de salida del Poliestireno después de cada bloque

|                      |         | <b>GASES</b> | <b>RESTO</b>       | <b>CALIENTE</b>    | <b>CONDENSADOR 2</b> |
|----------------------|---------|--------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Description          |         |              |                    |                    |                      |
| From                 |         | R2           | B1                 | B1                 | CD2                  |
| To                   |         | B1           |                    | CD1                |                      |
| Total Stream         |         |              |                    |                    |                      |
| Temperature          | C       | 450          | 450,1739206        | 450,1739206        | 60                   |
| Pressure             | bar     | 1,01325      | 1,01325            | 1,01325            | 1,01325              |
| Mass Vapor Fraction  |         | 0,94931      | 0,24451514         | 1                  | 0,0520634            |
| Mass Liquid Fraction |         | 0            | 0                  | 0                  | 0,947936             |
| Mass Solid Fraction  |         | 0,050687962  | 0,75548486         | 0                  | 0                    |
| Mass Enthalpy        | cal/gm  | 289,4759262  | 567,898525158      | 351,1988401        | 89,539210463         |
| Mass Density         | gm/cc   | 0,00174281   | 0,0012430464       | 0,001794594        | 0,01547791236        |
| Enthalpy Flow        | cal/sec | 40204,98975  | -5296,9167088      | 45501,906460       | 11600,8491875        |
| <b>Mass Flows</b>    | kg/hr   | <b>500</b>   | <b>33,57800611</b> | <b>466,4219939</b> | <b>466,4219939</b>   |
| POLIESTI             | kg/hr   | 25,34398125  | 25,34398125        | 0                  | 0                    |
| C                    | kg/hr   | 0            | 0                  | 0                  | 0                    |
| H2                   | kg/hr   | 0,678141632  | 0                  | 0,678141632        | 0,678141632          |
| O2                   | kg/hr   | 2,90E-28     | 0                  | 0                  | 0                    |
| N2                   | kg/hr   | 12,79475725  | 0                  | 12,79475725        | 12,79475725          |
| S                    | kg/hr   | 0,023693995  | 0,023693995        | 0                  | 0                    |
| H2O                  | kg/hr   | 8,186636879  | 8,186636879        | 0                  | 0                    |
| CH4                  | kg/hr   | 0            | 0                  | 0                  | 0                    |
| C2H6                 | kg/hr   | 8,031637782  | 0                  | 8,031637782        | 8,031637782          |
| C2H4                 | kg/hr   | 0,054785154  | 0                  | 0,054785154        | 0,054785154          |
| C3H8                 | kg/hr   | 0,168349376  | 0                  | 0,168349376        | 0,168349376          |
| C3H6-2               | kg/hr   | 0,016298668  | 0                  | 0,016298668        | 0,016298668          |
| C6H6                 | kg/hr   | 0            | 0                  | 0                  | 0                    |
| C7H8                 | kg/hr   | 48,086642693 | 0                  | 48,086642693       | 48,086642693         |
| C8H10-4              | kg/hr   | 0,646996291  | 0                  | 0,646996291        | 0,646996291          |
| CL2                  | kg/hr   | 0,023693995  | 0,023693995        | 0                  | 0                    |
| C8H8                 | kg/hr   | 0,057879771  | 0                  | 0,057879771        | 0,057879771          |
| C11H10               | kg/hr   | 395,875539   | 0                  | 395,875539         | 395,875539           |
| C9H10-E2             | kg/hr   | 0            | 0                  | 0                  | 0                    |
| C9H12                | kg/hr   | 0,010965847  | 0                  | 0,010965847        | 0,010965847          |
| CO                   | kg/hr   | 0            | 0                  | 0                  | 0                    |

Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

**Figura 4.16 Resultados del segundo condensador para el Poliestireno**

| Heatx results             |          |     |  |          |     |  |
|---------------------------|----------|-----|--|----------|-----|--|
| Calculation Model         | Shortcut |     |  |          |     |  |
|                           | Inlet    |     |  | Outlet   |     |  |
| Hot stream:               | CONDENS1 |     |  | CONDENS2 |     |  |
| Temperature               | 210      | C   |  | 60       | C   |  |
| Pressure                  | 1,01325  | bar |  | 1,01325  | bar |  |
| Vapor fraction            | 0,951786 |     |  | 0,23294  |     |  |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |     |  | 1        |     |  |
| Cold stream               | H2O-FRI2 |     |  | H2O-CAL2 |     |  |
| Temperature               | 15       | C   |  | 57,5524  | C   |  |
| Pressure                  | 1,01325  | bar |  | 1,01325  | bar |  |
| Vapor fraction            | 0        |     |  | 0        |     |  |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |     |  | 1        |     |  |
| Heat duty                 | 266043   |     |  | kJ/hr    |     |  |

Fuente: Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

**Figura 4.17 Resultados del primer condensador para el Poliestireno**

| Heatx results             |          |     |  |          |     |  |
|---------------------------|----------|-----|--|----------|-----|--|
| Calculation Model         | Shortcut |     |  |          |     |  |
|                           | Inlet    |     |  | Outlet   |     |  |
| Hot stream:               | CALIENTE |     |  | CONDENS1 |     |  |
| Temperature               | 450,174  | C   |  | 210      | C   |  |
| Pressure                  | 1,01325  | bar |  | 1,01325  | bar |  |
| Vapor fraction            | 1        |     |  | 0,951786 |     |  |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |     |  | 1        |     |  |
| Cold stream               | H2O-FRIA |     |  | H2O-CAL  |     |  |
| Temperature               | 15       | C   |  | 53,5388  | C   |  |
| Pressure                  | 1,01325  | bar |  | 1,01325  | bar |  |
| Vapor fraction            | 0        |     |  | 0        |     |  |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |     |  | 1        |     |  |
| Heat duty                 | 240420   |     |  | kJ/hr    |     |  |

Fuente: Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

#### 4.4.2.2 RESULTADOS DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Tabla 4.34 Resultado de las corrientes de salida del Polietileno de alta densidad después de cada bloque

|                      |              | <b>GASES</b> | <b>RESTO</b>       | <b>CALIENTE</b>    | <b>CONDENSADOR<br/>2</b> |
|----------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Description          |              |              |                    |                    |                          |
| From                 |              | R2           | B1                 | B1                 | B3                       |
| To                   |              | B1           |                    | B2                 |                          |
| Stream Class         |              | MIXNC        | MIXNC              | MIXNC              | MIXNC                    |
| Total Stream         |              |              |                    |                    |                          |
| Temperature          | C            | 450          | 450,0265064        | 450,0265064        | 60                       |
| Pressure             | bar          | 1,01325      | 1,01325            | 1,01325            | 1,01325                  |
| Mass Vapor Fraction  |              | 0,936794275  | 0,011925071        | 1                  | 0                        |
| Mass Liquid Fraction |              | 0            | 0                  | 0                  | 1                        |
| Mass Solid Fraction  |              | 0,063205725  | 0,988074929        | 0                  | 0                        |
| Mass Enthalpy        | cal/gm       | -144,4258719 | -576,4006103       | -114,8999046       | -429,7035274             |
| Mass Density         | gm/cc        | 0,001905709  | 0,024662005        | 0,001792642        | 0,686792327              |
| Enthalpy Flow        | cal/sec      | -20059,14888 | -5121,812803       | -14937,33608       | -55862,76182             |
| <b>Mass Flows</b>    | <b>kg/hr</b> | <b>500</b>   | <b>31,98908148</b> | <b>468,0109185</b> | <b>468,0109185</b>       |
| HDPE                 | kg/hr        | 31,60286248  | 31,60286248        | 0                  | 0                        |
| C                    | kg/hr        | 0            | 0                  | 0                  | 0                        |
| H2                   | kg/hr        | 0            | 0                  | 0                  | 0                        |
| O2                   | kg/hr        | 0            | 0                  | 0                  | 0                        |
| N2                   | kg/hr        | 0,014240785  | 0                  | 0,014240785        | 0,014240785              |
| S                    | kg/hr        | 0,004746928  | 0,004746928        | 0                  | 0                        |
| H2O                  | kg/hr        | 0,376725141  | 0,376725141        | 0                  | 0                        |
| C5H10-2              | kg/hr        | 3,404109974  | 0                  | 3,404109974        | 3,404109974              |
| C7H16-1              | kg/hr        | 321,971573   | 0                  | 321,971573         | 321,971573               |
| C8H14-D2             | kg/hr        | 7,48E-05     | 0                  | 7,48E-05           | 7,48E-05                 |
| C8H18-1              | kg/hr        | 69,31652058  | 0                  | 69,31652058        | 69,31652058              |
| C10H14-7             | kg/hr        | 25,42933644  | 0                  | 25,42933644        | 25,42933644              |
| C10H14-1             | kg/hr        | 10,06276837  | 0                  | 10,06276837        | 10,06276837              |
| C15H30               | kg/hr        | 6,70E-07     | 0                  | 6,70E-07           | 6,70E-07                 |
| C22H46               | kg/hr        | 6,93E-09     | 0                  | 6,93E-09           | 6,93E-09                 |
| C23H48               | kg/hr        | 1,25E-09     | 0                  | 1,25E-09           | 1,25E-09                 |
| CL2                  | kg/hr        | 0,004746928  | 0,004746928        | 0                  | 0                        |
| C8H8                 | kg/hr        | 0,072547235  | 0                  | 0,072547235        | 0,072547235              |
| C11H10-1             | kg/hr        | 37,73974662  | 0                  | 37,73974662        | 37,73974662              |

Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus



#### 4.4.2.3 RESULTADOS DEL POLIPROPILENO

Tabla 4.35 Resultado de las corrientes de salida del Polipropileno después de cada bloque

|                      |              | GASES        | RESTO              | CALIENTE          | CONDENSADOR<br>2  |
|----------------------|--------------|--------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Description          |              |              |                    |                   |                   |
| From                 |              | R2           | B1                 | B1                | CD2               |
| To                   |              | B1           |                    | CD1               |                   |
| Stream Class         |              | MIXNC        | MIXNC              | MIXNC             | MIXNC             |
| Total Stream         |              |              |                    |                   |                   |
| Temperature          | C            | 425          | 425,0268974        | 425,0268974       | 60                |
| Pressure             | bar          | 1,01325      | 1,01325            | 1,01325           | 1,01325           |
| Mass Vapor Fraction  |              | 0,93132762   | 0,029598766        | 1                 | 0,002652369       |
| Mass Liquid Fraction |              | 0            | 0                  | 0                 | 0,997347631       |
| Mass Solid Fraction  |              | 0,06867238   | 0,970401234        | 0                 | 0                 |
| Mass Enthalpy        | cal/gm       | -185,3507854 | -727,4941511       | -144,0569887      | -442,3922635      |
| Mass Density         | gm/cc        | 0,002322374  | 0,010487624        | 0,002192366       | 0,289724848       |
| Enthalpy Flow        | cal/sec      | -25743,16464 | -7151,345099       | -18591,81954      | -57094,60679      |
| <b>Mass Flows</b>    | <b>kg/hr</b> | <b>500</b>   | <b>35,38838397</b> | <b>464,611616</b> | <b>464,611616</b> |
| HDPE                 | kg/hr        | 34,33619     | 34,33619           | 0                 | 0                 |
| C                    | kg/hr        | 0            | 0                  | 0                 | 0                 |
| H2                   | kg/hr        | 0            | 0                  | 0                 | 0                 |
| O2                   | kg/hr        | 0            | 0                  | 0                 | 0                 |
| N2                   | kg/hr        | 0,900878815  | 0                  | 0,900878815       | 0,900878815       |
| S                    | kg/hr        | 0,004741467  | 0,004741467        | 0                 | 0                 |
| H2O                  | kg/hr        | 1,042711034  | 1,042711034        | 0                 | 0                 |
| C5H10-2              | kg/hr        | 10,59833498  | 0                  | 10,59833498       | 10,59833498       |
| C8H14-D2             | kg/hr        | 0,000298214  | 0                  | 0,000298214       | 0,000298214       |
| C9H20-1              | kg/hr        | 403,7309472  | 0                  | 403,7309472       | 403,7309472       |
| C10H14-1             | kg/hr        | 49,31219495  | 0                  | 49,31219495       | 49,31219495       |
| C14H28-2             | kg/hr        | 5,86E-05     | 0                  | 5,86E-05          | 5,86E-05          |
| C15H30               | kg/hr        | 7,28E-05     | 0                  | 7,28E-05          | 7,28E-05          |
| C19H38               | kg/hr        | 1,76E-07     | 0                  | 1,76E-07          | 1,76E-07          |
| C22H46               | kg/hr        | 2,30E-05     | 0                  | 2,30E-05          | 2,30E-05          |
| C23H48               | kg/hr        | 5,90E-06     | 0                  | 5,90E-06          | 5,90E-06          |
| CL2                  | kg/hr        | 0,004741467  | 0,004741467        | 0                 | 0                 |
| C8H8                 | kg/hr        | 0,068801349  | 0                  | 0,068801349       | 0,068801349       |

Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

**Figura 4.20 Resultados del primer condensador para el Polipropileno**

| Heatx results             |          |         |  |          |     |
|---------------------------|----------|---------|--|----------|-----|
| Calculation Model         | Shortcut |         |  |          |     |
|                           | Inlet    |         |  | Outlet   |     |
| Hot stream:               | CALIENTE |         |  | CONDENS1 |     |
| Temperature               | 425,027  | C       |  | 210      | C   |
| Pressure                  | 1,01325  | bar     |  | 1,01325  | bar |
| Vapor fraction            | 1        |         |  | 1        |     |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |         |  | 1        |     |
| Cold stream               | H2O-FRIA |         |  | H2O-CAL  |     |
| Temperature               | 15       | C       |  | 58,9455  | C   |
| Pressure                  | 1,01325  | bar     |  | 1,01325  | bar |
| Vapor fraction            | 0        |         |  | 0        |     |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |         |  | 1        |     |
| Heat duty                 | 18243    | cal/sec |  |          |     |

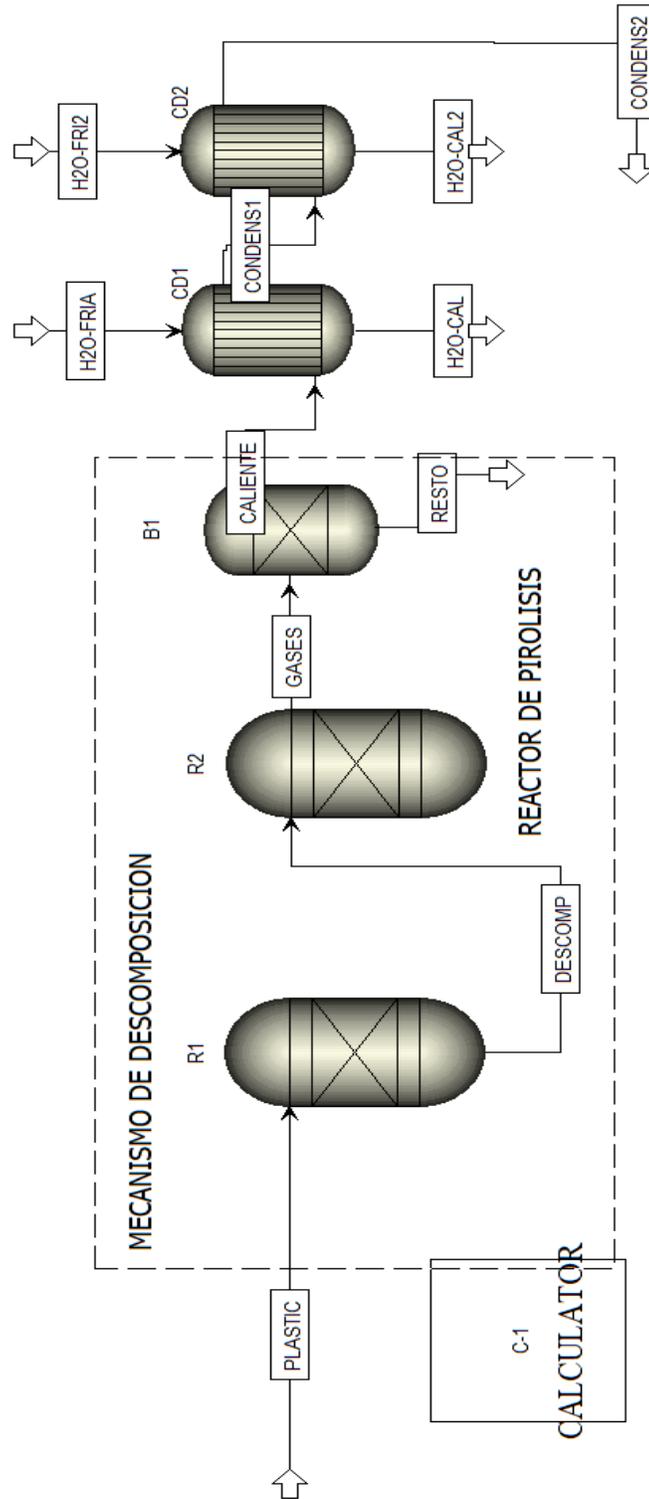
Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

**Figura 4.21 Resultados del primer condensador para el Polipropileno**

| Heatx results             |          |         |  |           |     |
|---------------------------|----------|---------|--|-----------|-----|
| Calculation Model         | Shortcut |         |  |           |     |
|                           | Inlet    |         |  | Outlet    |     |
| Hot stream:               | CONDENS1 |         |  | CONDENS2  |     |
| Temperature               | 210      | C       |  | 60        | C   |
| Pressure                  | 1,01325  | bar     |  | 1,01325   | bar |
| Vapor fraction            | 1        |         |  | 0,0092949 |     |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |         |  | 1         |     |
| Cold stream               | H2O-FRI2 |         |  | H2O-CAL2  |     |
| Temperature               | 15       | C       |  | 63,6719   | C   |
| Pressure                  | 1        | bar     |  | 1         | bar |
| Vapor fraction            | 0        |         |  | 0         |     |
| 1st liquid / Total liquid | 1        |         |  | 1         |     |
| Heat duty                 | 20259,8  | cal/sec |  |           |     |

Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

Figura 4.22 Planta Piloto de Pirolisis de Polimeros



Fuente: Fuente: Simulación del proceso de pirolisis en Aspen plus

## 4.5 RESULTADOS Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE REACCIÓN

Tabla 4.36 Resultados de parámetros cinéticos

| RESULTADOS DE PARÁMETROS CINÉTICOS |                       |                                 |                    |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------|
| POLÍMEROS                          | ENERGÍA DE ACTIVACIÓN | A                               | K                  |
| POLIESTIRENO                       | 140115 KJ/Hr          | $1.0497 \times 10^8 s^{-1}$     | $0,0030899 s^{-1}$ |
| POLIPROPILENO                      | 168258 KJ/Hr          | $2.8266 \times 10^9 s^{-1}$     | $0,0013309 s^{-1}$ |
| POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD       | 186940 KJ/Hr          | $2.00726 \times 10^{11} s^{-1}$ | $0,001226 s^{-1}$  |

Fuente Elaboración propia

Tabla 4.37 Resultados de cinética y tiempo de reacción

| RESULTADOS CINÉTICA Y TIEMPO DE REACCIÓN Y CICLO |                     |                    |                 |
|--|---------------------|--------------------|-----------------|
| POLÍMEROS  | ECUACIÓN CINÉTICA   | TIEMPO DE REACCIÓN | TIEMPO DE CICLO |
| POLIESTIRENO                                     | $0,0030899 C_{PS}$  | 16,2 min           | 91,2 min        |
| POLIPROPILENO                                    | $0,0013309 C_{PP}$  | 38 min             | 113 min         |
| POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD                     | $0,001226 C_{HDPE}$ | 30 min             | 105 min         |

Fuente Elaboración propia

Tabla 4.38 Dimensionamiento del reactor

| DIMENSIONES DEL REACTOR          |                  |
|----------------------------------|------------------|
| DIÁMETRO EXTERNO                 | 0,9 m            |
| ALTURA                           | 1,2 m            |
| PRESIÓN MÁXIMA PERMITIDA         | 4 bar            |
| ESPESOR                          | 4 mm             |
| MATERIAL                         | Acero Inoxidable |
| FONDO TORRIESFEREICO DEL REACTOR |                  |
| ESPESOR                          | 4 mm             |
| RADIO (R2)                       | 90 cm            |
| ALTURA (H1)                      | 1,4 cm           |
| ALTURA (H2)                      | 17,3 cm          |
| ALTURA TOTAL (HT)                | 18,7 cm          |

|            |                     |
|------------|---------------------|
| RADIO (R1) | 9 cm                |
| MATERIAL   | Acero<br>Inoxidable |

Fuente Elaboración propia

#### 4.6 RESULTADOS Y PROPUESTA DE LOS CONDENSADORES

**Tabla 4.39 Resultados característicos del primer condensador**

| <b>RESULTADOS CARACTERÍSTICOS DEL CONDENSADOR 1</b> |              |
|---|--------------|
| PERDIDA DE CALOR                                    | 309344 KJ/Hr |
| DIÁMETRO EXTERNO DE TUBOS                           | 1 pulg       |
| DIÁMETRO INTERNO DE TUBOS                           | 0,834 pulg   |
| TUBE PITCH  | 1,25 pulg    |
| MODELO DE TUBE PITCH                                | square       |
| NUMERO DE TUBOS                                     | 32 tubos     |
| NUMERO DE PASOS                                     | 6 pasos      |
| DIÁMETRO INTERNO DE SHELL                           | 12 pulg      |
| TEMA  | U            |
| LONGITUD DE TUBOS                                   | 3 pies       |
| CAUDAL MÁSIICO DEL FLUIDO                           | 500 Kg/Hr    |
| TEMPERATURA DE ENTRADA DE FLUIDO                    | 450 C        |
| TEMPERATURA DE SALIDA DE FLUIDO                     | 210 C        |
| CAUDAL MÁSIICO DEL AGUA                             | 1500 Kg/Hr   |
| TEMPERATURA DE ENTRADA DE AGUA                      | 15 C         |
| TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA                      | 64,2883 C    |

Fuente Elaboración propia

**Tabla 4.40 Resultados característicos del segundo condensador**

| <b>RESULTADOS CARACTERÍSTICOS DEL CONDENSADOR 2</b> |              |
|---|--------------|
| PERDIDA DE CALOR                                    | 307504 KJ/Hr |
| DIÁMETRO EXTERNO DE TUBOS                           | 1 pulg       |
| DIÁMETRO INTERNO DE TUBOS                           | 0,834 pulg   |
| TUBE PITCH  | 1,25 pulg    |
| MODELO DE TUBE PITCH                                | square       |
| NUMERO DE TUBOS                                     | 44 tubos     |
| NUMERO DE PASOS                                     | 6 pasos      |
| DIÁMETRO INTERNO DE SHELL                           | 13,25 pulg   |
| TEMA  | U            |
| LONGITUD DE TUBOS                                   | 4 pies       |
| CAUDAL MÁSIICO DEL FLUIDO                           | 500 Kg/Hr    |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| TEMPERATURA DE ENTRADA DE FLUIDO | 210 C      |
| TEMPERATURA DE SALIDA DE FLUIDO  | 60 C       |
| CAUDAL MÁSIKO DEL AGUA           | 1500 Kg/Hr |
| TEMPERATURA DE ENTRADA DE AGUA   | 15 C       |
| TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA   | 64,0032 C  |

Fuente Elaboración propia

#### 4.7 RESULTADOS Y PROPUESTA DE LAS BOMBAS

**Tabla 4.41 Resultados característicos de las bombas hidráulicas**

| <b>RESULTADOS CARACTERÍSTICOS DE LAS BOMBAS</b> |             |
|---|-------------|
| TIPO DE BOMBA                                   | CENTRIFUGA  |
| ALTURA MÁXIMA                                   | 10 m        |
| CAUDAL  | 1500 L / Hr |
| VELOCIDAD                                       | 0,822 m/s   |
| NPSH REQ  | 7,1927 m    |
| ALTURA DE SUCCIÓN                               | 1,9 m       |

Fuente Elaboración propia

#### 4.8 RESULTADOS DE CONVERSIÓN DE MATERIA PRIMA

**Tabla 4.42 Resultados de conversión de los polímeros a diésel**

| <b>POLÍMERO</b>              | <b>CONVERSIÓN DE POLÍMERO A DIÉSEL</b> |
|------------------------------|--|
| POLIESTIRENO                 | 79.30%                                 |
| POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD | 14.90%                                 |
| POLIPROPILENO                | 84.25%                                 |

Fuente Elaboración propia

**Tabla 4.43 Producción de la planta piloto**

| <b>PRODUCCIÓN DE LA PLANTA PILOTO</b> |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| MATERIA PRIMA                         | 500 KG / TURNO   |
| VOLUMEN DIÉSEL POR TURNO              | 495.635 L/ TURNO |
| VOLUMEN DE DIÉSEL POR DÍA             | 991.27 L / DÍA   |
| TEMPERATURA                           | 450 C            |
| PRESIÓN                               | 1 ATM            |

Fuente Elaboración propia

## CAPÍTULO 5 ESTUDIO ECONÓMICO

En el presente capítulo se tiene el objetivo de realizar un análisis económico del proyecto, el cual solo será una estimación de la adecuación de la planta piloto de pirolisis de plástico, empleando los indicadores financieros que nos mostrarán si el proyecto es rentable.

### 5.1 COSTOS DE INVERSIÓN DEL PROYECTO

El proyecto contemplará la adquisición de materiales mecánicos, eléctricos, de instrumentación, control y comunicaciones para la ejecución de obras; de forma enunciativa más no limitativa. En la siguiente tabla 5.1 se comprende los equipos necesarios para la instalación de la planta además que la cantidad de piezas necesarias para que el proceso de pirolisis se lleve correctamente a cabo y los costos de cada equipo o implemento

**Tabla 5.1 Costo de Equipos e Implementos necesarios**

| N  | COMPONENTES                       | Costo Unitario (usd) | Cantidad de Piezas (PZA) | Costo Total (usd) |
|----|-----------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|
| 1  | REACTOR DISCONTINUO BATCH         | 25000                | 1                        | 25000             |
| 2  | MEZCLADOR MECÁNICO                | 5500                 | 1                        | 5500              |
| 3  | SEPARADOR O DECANTADOR            | 10000                | 1                        | 10000             |
| 4  | TOBERAS                           | 48                   | 10                       | 480               |
| 5  | MANÓMETRO                         | 2000                 | 1                        | 2000              |
| 6  | VÁLVULA DE ALIVIO                 | 1000                 | 1                        | 1000              |
| 7  | TUBOS DE CIRCULACIÓN DE PRODUCTOS | 40                   | 10                       | 400               |
| 8  | CONDENSADOR                       | 5000                 | 1                        | 5000              |
| 9  | INTERCAMBIADOR DE CALOR           | 5000                 | 1                        | 5000              |
| 10 | BOMBA HIDRÁULICA TIPO TURBINA     | 2000                 | 2                        | 4000              |
| 11 | MEDIDOR DE TEMPERATURA            | 500                  | 1                        | 500               |
| 12 | TANQUE DE AGUA                    | 2400                 | 2                        | 4800              |
| 13 | TANQUE DE NITRÓGENO               | 250                  | 1                        | 250               |
| 14 | TRITURADORA DE PLÁSTICO           | 2500                 | 1                        | 2500              |
|    |                                   |                      | <b>COSTO TOTAL</b>       | <b>66430</b>      |

Fuente: a partir de datos recopilados en mercados online

Tomando en cuenta el costo de los equipos e implementos necesarios para el funcionamiento de la planta se elabora la tabla 5.2 de la inversión necesaria para el proyecto

**Tabla 5.2 Inversión del proyecto**

| <b>COSTO DE INVERSIÓN</b>               | <b>COSTOS TOTAL USD</b> |
|---|-------------------------|
| Diseño y Estudios de ingeniería         | 2200                    |
| Gastos de organización                  | 3000                    |
| Gastos legales y contratos para montaje | 5200                    |
| Capacitación de personal                | 5800                    |
| Costo de equipos y implementos          | 66430                   |
| Imprevistos                             | 10000                   |
| <b>COSTO TOTAL</b>                      | <b>92630</b>            |

Fuente: elaborado a partir de datos recopilados Estudio económico de Planta de Tecnología KDV de desecho orgánico, 2019

### 5.1.1 COSTOS DE OPERACIÓN DEL PROYECTO

Los costos por operación del proyecto se dividirán de la siguiente manera

#### 5.1.1.1 COSTOS DE PERSONAL

Se tiene planificado contar con personal para la operación de la planta piloto de pirolisis, que se encargue de la producción y buen funcionamiento de la planta, así también el llenado de la alimentación de plástico dentro del reactor así también del retiro de material no reaccionante dentro del reactor para cada turno del proceso

**Tabla 5.3 Costos por personal de operación de la planta**

| <b>N</b>                           | <b>PERSONAL PARA PROYECTO DE 3 AÑOS</b>             | <b>MODALIDAD DE CONTRATO</b> | <b>SALARIO MENSUAL</b> | <b>SALARIO ANUAL (USD)</b> |
|------------------------------------|---|------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Personal de planta                 |   |                              |                        |                            |
| 1                                  | Técnico operador de planta                          | Plazo fijo                   | 7000                   | 12068.965                  |
| 1                                  | Auxiliar de técnico (alimentación del proceso)      | Plazo fijo                   | 4000                   | 6896.552                   |
| 1                                  | Auxiliar de técnico (materia prima no reaccionante) | Plazo fijo                   | 4000                   | 6896.552                   |
| <b>COSTO DE OPERACIÓN PERSONAL</b> |   |                              |                        | <b>25862.069</b>           |

Fuente: Elaborado en base a datos recopilados de Planta de Tecnología KDV de desecho orgánico, 2019

#### 5.1.1.2 COSTOS DE MATERIA PRIMA

Se tiene planificado realizar 2 turnos de funcionamiento de la planta cada 1 de 5 horas por lo que la planta requeriría alimentación total para los 2 turnos de 1000 kg por día. Los desechos

de plástico que se generan en la ciudad de La Paz diariamente cubre los 1000 kg de plástico necesario para la producción por día

**Tabla 5.4 Costos por materia prima anual**

| <b>COSTOS DE MATERIA PRIMA Y ALIMENTACIÓN</b>      | <b>KG POR DÍA DE PLÁSTICO</b> | <b>COSTO (Bs) POR 1 Kg</b> | <b>COSTO(BS ) POR DÍA</b> | <b>COSTO (USD) ANUAL</b> |
|--|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Poliestireno reciclado de residuos                 | 1000                          | 1                          | 1000                      | 52442.52874              |
| Polietileno de alta densidad reciclado de residuos | 1000                          | 1                          | 1000                      | 52442.52874              |
| Polipropileno reciclado de residuos                | 1000                          | 1.2                        | 1200                      | 62931.03448              |
| <b>PROMEDIO DE COSTO</b>                           |                               |                            |                           | <b>55938.69732</b>       |

Fuente: Elaborado en base a datos recopilados de Acopio de Plásticos en La Paz

## 5.2 INGRESOS DEL PROYECTO

En esta sección se analizará el volumen diario de producción debido que como es un sistema discontinuo tiene que pasar un tiempo para volver a iniciar el proceso por este motivo se toma en cuenta 2 turnos por día de 5 horas

**Tabla 5.5 de la producción de combustible (diésel y gasolina) diario**

| <b>VOLUMEN / TURNO (L)</b> | <b>N DE TURNOS / DÍA</b> | <b>VOLUMEN (L) / DÍA</b> |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 495.905                    | 2                        | 991.27                   |

Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a calcular el ingreso anual de la producción de combustibles tomando en cuenta la tarifa de venta en el mercado interno de combustibles de La Paz

**Tabla 5.6 Ingreso de la producción Anual**

| <b>INGRESOS PROYECTO</b> |             |
|--------------------------|-------------|
| Volumen Dia (L)          | 991.27      |
| Volumen Anual (L)        | 361813.55   |
| Tarifa (Bs)              | 3.72        |
| Ingresos (Bs)            | 1345946,406 |
| Ingresos (Usd)           | 193383.1043 |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza el Flujo Neto de fondo tomando en cuenta el ingreso anual además que los impuestos involucrados

**Tabla 5.7 Tabla Flujo Neto de Fondo**

| <b>AÑO</b>                           | <b>0</b> | <b>1</b>         | <b>2</b>         | <b>3</b>         |
|--------------------------------------|----------|------------------|------------------|------------------|
| <b>INGRESOS</b>                      |          | <b>193383.1</b>  | <b>193383.1</b>  | <b>193383.1</b>  |
| COSTOS DE PERSONAL                   |          | 25862.069        | 25862.069        | 25862.069        |
| COSTOS DE MATERIA PRIMA              |          | 55938.697        | 55938.697        | 55938.697        |
| <b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>           |          | <b>81800.766</b> | <b>81800.766</b> | <b>81800.766</b> |
| <b>FLUJO NETO ANTES DE IMPUESTOS</b> |          | <b>111582.34</b> | <b>111582.34</b> | <b>111582.34</b> |
| <b>IMPUESTOS</b>                     |          | <b>31243.055</b> | <b>31243.055</b> | <b>31243.055</b> |
| Impuesto a las Transacciones IT (3%) |          | 3347.4701        | 3347.4701        | 3347.4701        |
| impuesto a la utilidad - IUE (25%)   |          | 27895.585        | 27895.585        | 27895.585        |
| INVERSIÓN                            | 92630    |                  |                  |                  |
| <b>FLUJO NETO MENOS IMPUESTOS</b>    |          | <b>80339.283</b> | <b>80339.283</b> | <b>80339.283</b> |
| <b>FLUJO NETO</b>                    | -92630   | -12290.71        | 68048.567        | 148387.85        |

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN), se refiere al rendimiento actualizado de los flujos positivos y negativos originados por una inversión. Es el criterio financiero que evalúa las inversiones y se lo calcula mediante la siguiente formula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Donde:

$t$ : 3 años (número de periodos)

$F_t$ : Flujos de caja futuros ya sean positivos o negativos

$i$ : Tasa mínima de interés (10%)

$I_0$ : Inversión inicial a realizar

De acuerdo al VAN que se vaya a obtener, se lo puede interpretar este valor de la siguiente manera:

VAN < 0 La inversión genera pérdidas. La utilidad económica de proyecto es negativa

VAN = 0 La inversión no genera ningún beneficio. La utilidad económica del proyecto es nula

VAN > 0 La inversión planificada genera beneficios. Utilidad económica del proyecto es Positiva

Se calcula el VAN del proyecto con los valores obtenidos en la tabla de flujos de fondos se tiene lo siguiente:

$$VAN = \frac{-12290.71}{(1 + 0.1)^1} + \frac{68048.567}{(1 + 0.1)^2} + \frac{148387.85}{(1 + 0.1)^3} - 92630$$

$$VAN = 63921.1$$

Como se cumple la condición de VAN > 0 se puede decir que la inversión que ha sido planificada genera una utilidad Positiva por tanto genera beneficios

#### 5.4 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR) es la rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficios o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que todavía no se han retirado del proyecto. Es la tasa de descuento cuando el VAN es igual a 0

$$TIR = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + i)^t} - I_0 = 0$$

El valor del resultado se compara comparara con el valor de  $i = 10\%$  Si:

TIR <  $i$  Proyecto económicamente no rentable

TIR =  $i$  Proyecto económicamente no concluyente

TIR >  $i$  Proyecto económicamente recomendable.

Calculando el TIR del proyecto se tiene lo siguiente:

$$TIR = \frac{-12290.71}{(1 + i)^1} + \frac{68048.567}{(1 + i)^2} + \frac{148387.85}{(1 + i)^3} - 92630 = 0$$

$$TIR = 0.328$$

$$TIR = 32.8\%$$

Dado que el TIR obtenido es mayor a la tasa mínima de rentabilidad del 10% el proyecto es económicamente recomendable.



## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

Se realizó un evaluación del proceso de pirolisis para obtención de combustibles a partir de plástico para 3 polímeros en específico, el proceso resulta viable para polímeros como Poliestireno (PS), Polipropileno (PP) y Polietileno de alta densidad (HDPE), el análisis solo se realizó para estos polímeros y fueron descartados el Policloruro de vinilo (PVC) porque entre los productos principales de este polímero está el ácido Clorhídrico que es altamente corrosivo y podría causar daños a los equipos empleados y también está el caso del Teraftalato de Polietileno (PET) porque entre sus principales productos se forma el ácido benzoico que también es muy corrosivo para los equipos empleados.

Se Estimó la cantidad de plástico que puede ser obtenida de los desechos sólidos abastece la alimentación del proceso de pirolisis propuesto debido a que en la ciudad de La Paz se generan 698.11 Toneladas / día de desechos plásticos de los cuales el 0.59% corresponde a Polietileno de alta densidad, 0.63% de Polipropileno y 0.50% tomando en cuenta la individualidad de cada polímero empleado (PS, HDPE, PP).

Se realizó un análisis de la importación de combustible de acuerdo a los datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) sobre las cantidades de importación entre los años 2005 a 2019 haciendo un mayor énfasis en diésel y con dichos datos se calculó que anualmente la importación de diésel crece un 11% con respecto al volumen del anterior año. Tomando en cuenta el valor del crecimiento promedio anual en los volúmenes de importación el volumen para el siguiente año 2023 se estima que será de 13.163.062 barriles que será necesario importar para cubrir el mercado interno del país

Se determinó el rendimiento de los 3 polímeros (PS, PP, HDPE) utilizados en los datos de simulación se tienen los siguientes porcentajes conversión donde el Poliestireno tuvo una conversión a diésel de 79.30%, el Polietileno de alta densidad tuvo una conversión a diésel del 14.90% pero tiene un alto porcentaje de conversión a gasolina y el Polipropileno tuvo una conversión a diésel de 84.25% siendo este el polímero que mayor conversión a diésel presentó.

Se analizó técnicamente que a condiciones de temperatura de 450 °C y 1 atm de presión es posible producir de la planta piloto de 1000 kilogramos de polímero a 991.27 Litro de diésel por día de la misma manera se analizó la rentabilidad del proyecto teniendo los valores de las

variables VAN y TIR aceptables para una inversión con generación de beneficios y una Taza de retorno de 32.8% lo que permite generar beneficios considerables a partir del segundo año de operación

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda que en la pirolisis no se use como materia prima los siguientes polímeros: Policloruro de vinilo y Teraftalato de Polietileno porque entre los productos principales de estos polímeros se obtiene ácido clorhídrico y ácido benzoico que son altamente corrosivo y podría causar daños a los equipos.

Se recomienda no sobrecalentar el proceso de pirolisis a una temperatura mayor a los 450 °C a presiones atmosféricas, debido a que produciría un mayor craqueo en las cadenas largas de los polímeros causando una formación menor de combustibles líquidos.



## **BIBLIOGRAFÍA**

Agrowaste, Pirólisis, 2013

Agustín Torroba, atlas de los biocombustibles, 2020

Almeida D. & Marques M, Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. Polimeros, 2016

Alphakat, combustibles por despolimerización catalítica, 2012

Andagua, Origen de combustibles sintéticos, 2009

Antonio Colino Martínez y Rafael Caro, Fuentes Energéticas, 2010

Aracil Saez I. Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirolisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC, PCP), Tesis Doctoral. Alicante: Universidad de Alicante. (2008)

Banco Mundial, What a Waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050, 2018

Beltran y Marcilla, Tecnologia de Polimeros, 2012

Beyond Petroleum, Statistical Review of World Energy, 2018

Botello F, Avalos F. & Camporredondo E. Pirolisis del polimero en presencia y ausencia de catalizadores arcillosos. (2010)

Businesswire Company, Cynar PLC Green fuel, 2012

Combustibles, Universidad Nacional del Sur-Conicet, 2016

Conesa, J. A.. 1996. Estudio de la Pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. Alicante: Universidad de Alicante.

Contreras Canteros F. E., Estudio de la pirolisis catalitica de polietileno en un reactor semi-batch, Departamento de ingeniería Química y Biotecnoogia, 2014

Contreras Francisico, Estudio de la pirolisis catalitica de polietileno en un reactor semi-batch, Universidad de Chile, (2014)

Coronel, Química General, 2009

Cortazar Maria, Estudio comparativo de tecnologia comerciales de valorizacion de residuos solidos urbanos, Universidad del Pais Vasco. (2014)

Crespo. 2013. Obtaining fuel from plastic waste

Cunliffe, A. Jones & Williams, P. T. Pyrolysis of composite plastic waste. Environmental Technology (2013)

Eco Creation, 2016

Espinoza Naranjo. 2014. Modelo de Gestión de Residuos Plásticos. Mensoza Argentina: II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos

F. Paradela, F. Pinto, "Study of the co- pyrolysis of biomass and plastic wastes," 2009 Beltrán M. & Mancilla A. (2012). Tecnología de Polímeros. Universidad de Alicante

Fabiola Serna, Journal of Technology Management and Innovation, Social and economic impact in the use of biofuels, 2011

Ga Hoole.srl, Caracterización de residuos, 2020

Garrido Alex, Diseño en implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros, Universidad de Chile (2019)

Garrido Alex, Estudio experimental de desarrollo de plásticos Ignífugos, Universidad Politécnica de Catalunya. (2015)

Gustavo Aron Campos Cano, Estudio preliminar de la pirolisis, Instituto Politécnico Nacional, 2017

K Mulder and M. Knot, Polymer Technology, 2001

Ley Integral de Gestión de Residuos, 2015

Maria Jesus Martinez Conde, Fuentes Energéticas, 2018

MAVDT. 2008. Construcción de Criterios Técnicos para el Aprovechamiento y Valorización de Residuos Sólidos Orgánicos don Alta Tasa de Biodegradación, Plásticos, Vidrio, Papel y Cartón. Bogotá.

Miandad R & Barakat M. Aburizaiza A, Rehan M, Nizami A. Catalytic PYrolysis of plastic Waste, Process safety and environment Protection, 2016

Millan Tania, Estudio de factibilidad tecnica y economica de una planta de pirolisis para la valoracion energetica de residuos solidos urbanos en el distrito federal, Universidad Autonoma Metropolitana, (2014)

Moreno, Angie & Saenz Paula, Evaluacion de la obtencion de diesel a nivel laboratorio mediante pirolisis a partir de residuos plasticos provenientes del proceso de empacado en la empresa atlantic s.a. Bogota (2013)

Natural Geographic, Combustibles Fosiles, 2010

National Geographic, medio ambiente y combustibles, 2010

OCTave Lévensele, ingeniería de reacciones, 1986

PK Clean Technology, 2017

Plastic2Oil, 2016

Poblete Olivares E., Pirolisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre Departamento de ingeniería Química Universidad de Chile, 2013

Reservorios I, Ing. Hermas, 2013

Rincon Jose Maria & Silva Electo, Bioenergía conversión y sustentabilidad, Bogota, 2019

Salinas Callejas Edmar, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Mexico, Los biocombustibles, 2009

Siremu, problema de basura, 2020

T.P. Chang, Estudio de las propiedades y aplicaciones del polietileno, 2005

Technology Management and Innovation, 2011

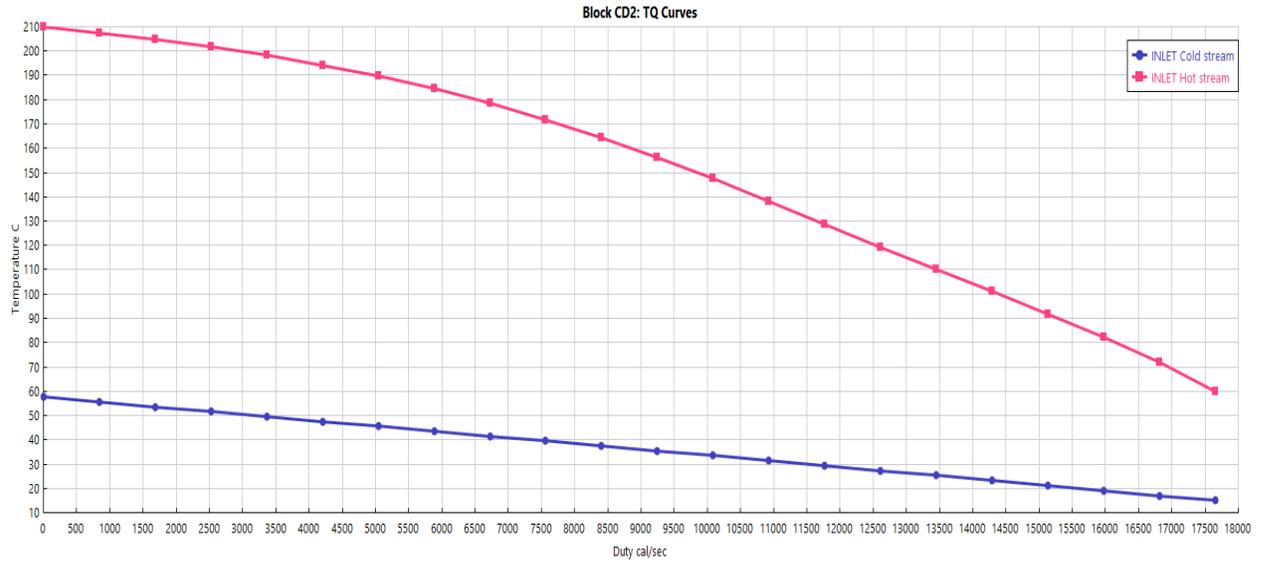
Tecnología de gas Natural, Ing. Mario Daza, 2019

UN Environment Programme, 2019

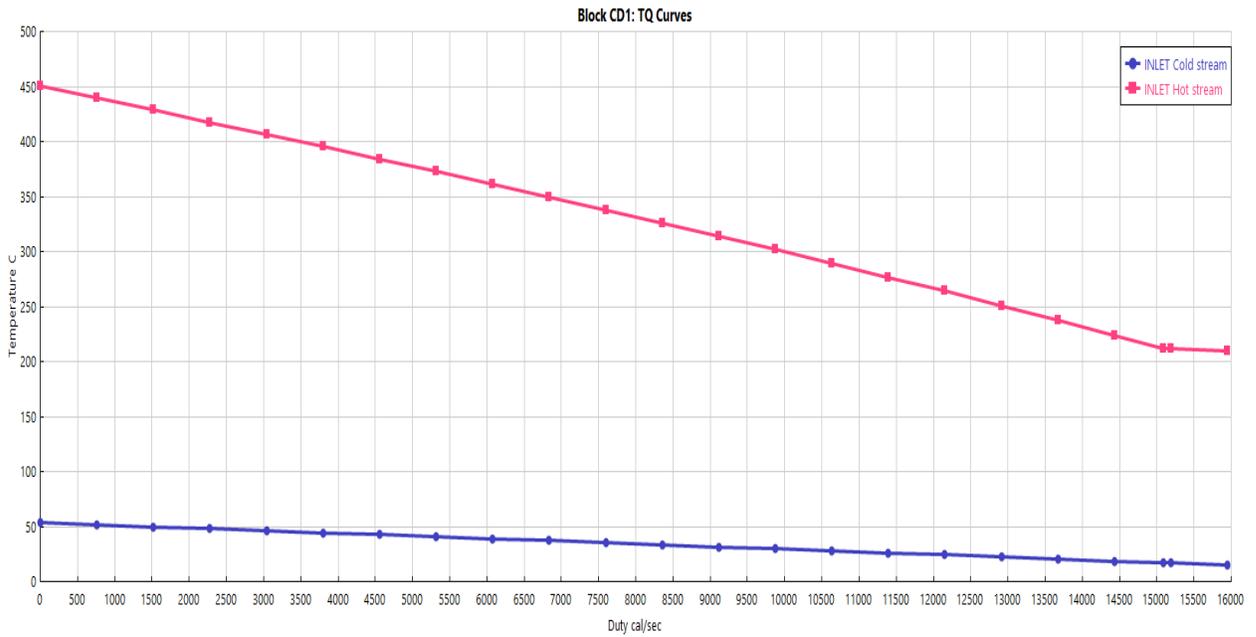
# ANEXOS

## ANEXO A - CURVA DE TEMPERATURA PARA LOS INTERCAMBIADORES DEL POLIESTIRENO

### SEGUNDO INTERCAMBIADOR

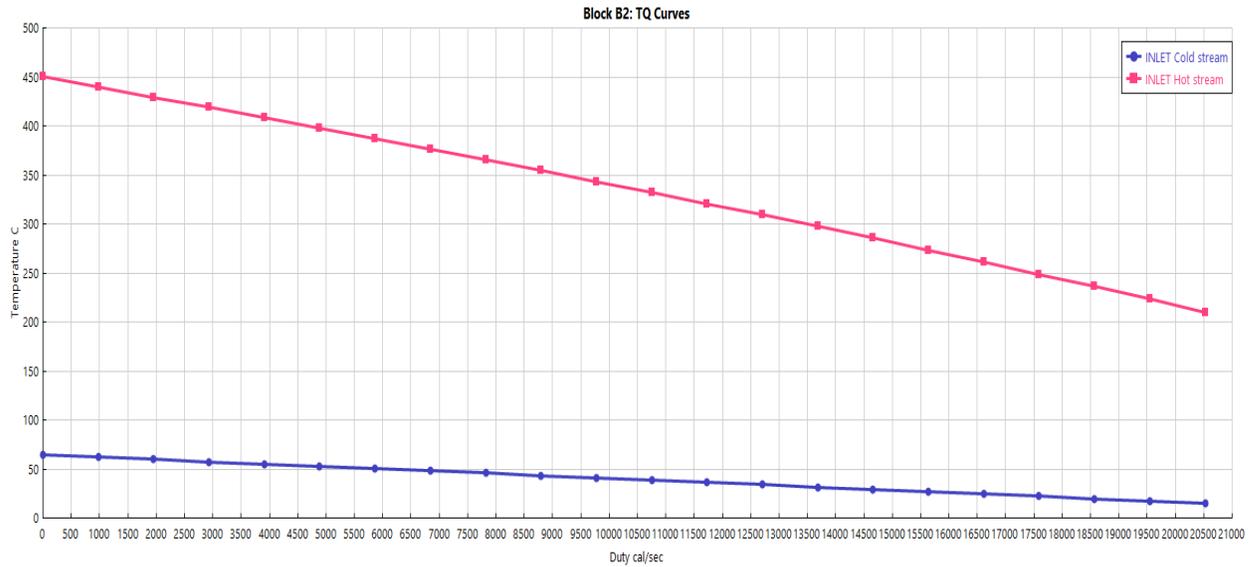


### PRIMER INTERCAMBIADOR

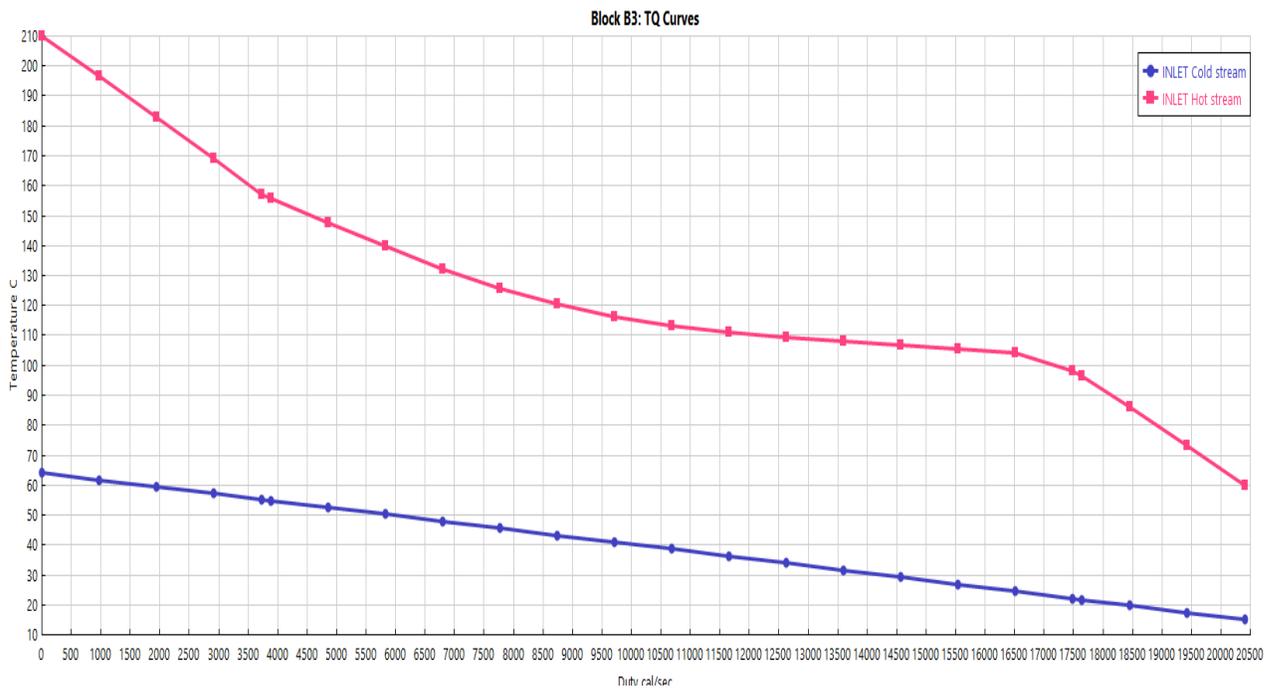


# ANEXO B - CURVA DE TEMPERATURA PARA LOS INTERCAMBIADORES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

## PRIMER INTERCAMBIADOR

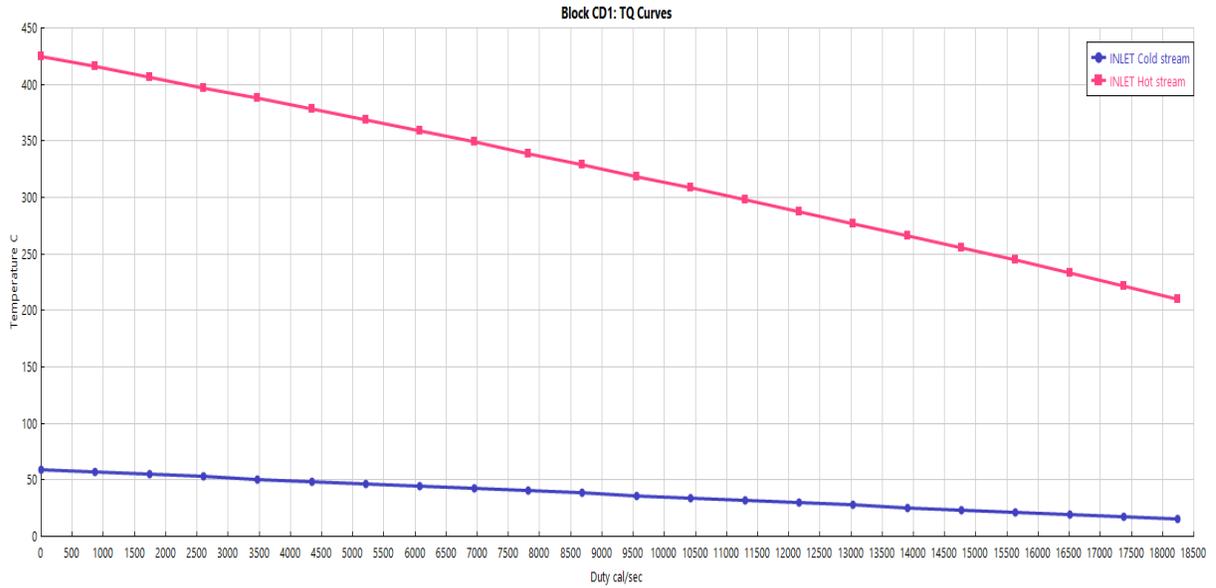


## SEGUNDO INTERCAMBIADOR

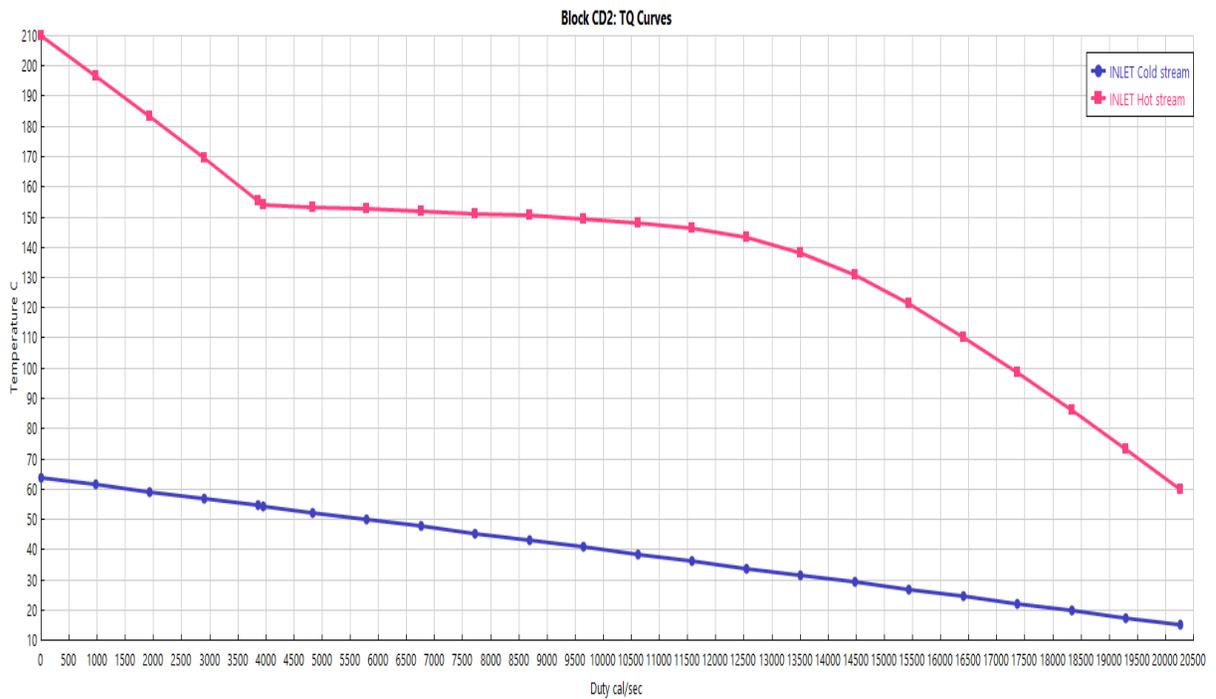


# ANEXO C - CURVA DE TEMPERATURA PARA LOS INTERCAMBIADORES DEL POLIPROPILENO

## PRIMER INTERCAMBIADOR



## SEGUNDO INTERCAMBIADOR



## ANEXOS D EQUIPO E IMPLEMENTOS CARACTERÍSTICAS Y PRECIOS

|   |   |
|---|---|
|  <p>REACTOR DISCONTINUO BATH<br/>CAP. 750 L<br/>PRECIO 20100 SUS</p> |  <p>MEZCLADOR MECÁNICO<br/>TIPO ROTATIVO<br/>PRECIO 5500 SUS</p>   |
|  <p>DECANTADOR DE PRODUCTO<br/>CAP 600 L<br/>PRECIO 8750 SUS</p>    |  <p>TOBERA ACERO INOXIDABLE<br/>1 ¼ PULG<br/>PRECIO 47.99 SUS</p> |

**GRITHERM**



MANOMETRO  
PRECIO 2000 SUS



TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE  
1 PULG  
PRECIO 40 SUS

**MADAS**



VALVULA DE ALIVIO DE PRESION  
1 PULG  
PRECIO 1000 SUS



INTERCAMBIADOR DE CALOR  
TIPO TUBO CORAZA "U"  
PRECIO 5000 SUS



BOMBA DE HIDRAULICA  
TIPO CENTRIFUGA  
PRECIO 2000 SUS



TANQUE DE AGUA  
CAP 3000 L  
PRECIO 2400 SUS



SENSOR DE TEMPERATURA  
TIPO MULTIPUNTO  
PRECIO 500 SUS



TANQUE DE NITRÓGENO  
CAP. 6 m<sup>3</sup>  
PRECIO 250 SUS