

Impacto de las tecnologías de reciclaje energético de Residuos Plásticos en los índices de  
contaminación del Área Metropolitana de Bucaramanga

Ivon Liliana Bonilla Triana

Juan Pablo Afanador Reyes

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov

P.h.D Ingenier Hábil, P.h.D Technical Science

Director del Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en la Industria y Energía-

CIDES

Codirector

Dr. Giovanni Morales Medina

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

### **Agradecimientos**

*A mi madre y hermanos con todo mi corazón, pues sin su apoyo, entrega y sacrificio no habría logrado culminar esta etapa de mi vida.*

*A Dios por regalarme oportunidades maravillosas a lo largo del camino.*

*A mi familia por su apoyo incondicional, cariño y consejos brindados.*

*Al cuerpo docente del programa de pregrado de Ingeniería Química, por cada una de las enseñanzas dadas durante la carrera.*

*A mis compañeros por ayudarme en cada una de las dificultades presentadas contribuyendo a nivel personal y profesional.*

*Al Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov, director, por su apoyo durante el desarrollo del proyecto.*

*A mi compañera de tesis Ivon Liliana Bonilla Triana por su trabajo y dedicación.*

*A todas esas personas que hicieron parte de esta trayectoria.*

*Juan Pablo Afanador Reyes*

*En primer lugar, quiero agradecerle a Dios por guiarme a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino. Por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad. Les agradezco a Luis y mi María, mis padres, a mi hermana Viviana que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos.*

*Le agradezco muy profundamente al Doctor Kafarov y al profesor Giovanni por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados para siempre en la memoria en mi futuro profesional.*

*Son muchos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes los conceptos serían sólo palabras, y las palabras ya sabemos quién se las lleva, el viento*

*Agradecerles a todos mis compañeros los cuales muchos de ellos se han convertido en mis amigos, cómplices y hermanos. Pao, Magda, Juan Pa y Jayson, gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto, las historias vividas y por el apoyo incondicional.*

*Por último, agradecer a la universidad Industrial de Santander que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título. Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos.*

*Ivon Liliana Bonilla Triana*

**Tabla de contenido**

Introducción .....	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo General.....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Estado del arte.....	12
3. Metodología .....	14
4. Resultados.....	15
4.1 Caracterización de los residuos plásticos.....	15
4.2 Simulación de la tecnología de reciclaje energético .....	19
4.2.1 Análisis comparativo de las tecnologías de Incineración, Gasificación y Pirólisis.....	19
4.2.2 Ecuaciones de Balance.....	24
4.2.3 Simulación mediante el software ASPEN – HYSYS .....	26
4.2.4 Realización del cálculo de la huella de residuos plásticos (HRP) .....	32
4.3 Análisis de viabilidad.....	36
4.3.1 Viabilidad Técnica.....	36
4.3.2 Viabilidad Social.....	40
4.3.3 Viabilidad Económica.....	40
4.3.4 Viabilidad Ambiental.....	44
Conclusiones .....	45
Recomendaciones .....	45
Referencias bibliográficas.....	46
Apéndices.....	50

**Lista de tablas**

Tabla 1. Cantidad de residuos plásticos generados 2020 y 2021 empresa DESCONT S.A.S.....	16
Tabla 2. Toneladas anuales generadas de basuras sólidas en el AMB en 2020.....	17
Tabla 3. Plásticos producidos por municipio.....	18
Tabla 4. Precios promedio por kilogramo de comercialización de materiales por presentación a nivel nacional .....	18
Tabla 5. Ventajas y desventajas de procesos de Incineración, Pirólisis y Gasificación. ....	19
Tabla 6. Características principales de los 3 procesos térmicos .....	21
Tabla 7. Evaluación y ponderación de procedimientos calientes con parámetros establecidos ...	24
Tabla 8. Variaciones y Balances .....	31
Tabla 9. Análisis de Sensibilidad.....	31
Tabla 10. Composición del Gas de Pirólisis .....	34
Tabla 11. Materia prima y los resultantes de la pirólisis - Composiciones por elementos.....	35
Tabla 12. Huella de CO <sub>2</sub> de Colombia.....	35
Tabla 13. Relación de maquinaria a instalar en la planta .....	38
Tabla 14. Presupuesto para instalación de la planta física y su distribución. ....	38
Tabla 15. Costo operacional .....	40
Tabla 16. Costos de capacidad instalada.....	41
Tabla 17. Evaluación financiera del proyecto.....	41
Tabla 18. Flujo de caja.....	42

**Lista de figuras**

Figura 1. Reciclaje mecánico y valorización energética se complementan a la hora de procesar residuos plásticos en una economía circular. ....	13
Figura 2. Esquema del método utilizado.....	14
Figura 3. Disposición de basuras sólidas en el AMB. ....	16
Figura 4. Comparación de cantidad de residuos plásticos para el año 2020 y 2021.....	17
Figura 5. Procesos de conversión térmica.....	22
Figura 6. Diagrama iconográfico del proceso de pirólisis del PE con adición de gasificador en Aspen Plus .....	26
Figura 7. Distribución de la planta física primer piso.....	37
Figura 8. Distribución de la planta física segundo piso .....	37
Figura 9. Planta de pirólisis para el tratamiento de residuos plásticos .....	40

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Caracterización de plásticos .....	50
Apéndice B.. Simulación de la Tecnología de reciclaje energético.....	60
Apéndice C. Viabilidad Económica.....	109

## Resumen

**Título:** Impacto de las tecnologías de reciclaje energético de Residuos Plásticos en los índices de contaminación del Área Metropolitana de Bucaramanga.\*

**Autor:** Ivon Liliana Bonilla Triana, Juan Pablo Afanador Reyes.\*\*

**Palabras Clave:** Valorización de residuos plástico, generación de energía, pandemia de covid-19, Huella de Residuos Plásticos (HRP).

### Descripción:

Bucaramanga es la ciudad ubicada en la región andina con una población total del área metropolitana de un millón trescientos dieciséis mil ciento noventa y dos habitantes (1.316.192) (DANE, 2023), es una típica ciudad latinoamericana con problemas relacionados con la utilización y beneficio de los residuos plásticos.

El aumento de los desechos plásticos por la pandemia que provienen de las actividades domésticas, de salud y sanitarias, es un problema grave desde el 2019 (Klemeš et al., 2020). Es necesario controlar el impacto del plástico (Flores, 2021) en el medio ambiente, para facilitar el esbozo de procedimientos de tratamiento de basuras y la comparación de alternativas como la incineración, pirólisis, gasificación, entre otras. Los estudios han informado que se puede lograr una reducción del volumen del 80% al 95% para los desechos generados utilizando tecnologías de conversión térmica (Singh et al., 2011).

Es posible que al implementar conceptos de huellas ambientales y ACV, en el asunto de toma de disposiciones sobre la ejecución de nuevas tecnologías hacia el tratamiento de residuos plásticos, se permitirá mermar los peligros hacia la salud humana y los impactos hacia el ambiente que provienen de desechos plásticos relacionados con el COVID-19, especialmente en países de desarrollo intermedio como Colombia (Afanador et al., 2022).

---

\* Impacto de las tecnologías de reciclaje energético de Residuos Plásticos en los índices de contaminación del Área Metropolitana de Bucaramanga

\*\* Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov, P.h.D Ingenier Hábil, P.h.D Technical Science.

### Abstract

**Title:** Impact of Plastic Waste energy recycling technologies on pollution rates in the Metropolitan Area of Bucaramanga.\*

**Author (s):** Ivon Liliana Bonilla Triana, Juan Pablo Afanador Reyes.\*\*

**Key Words:** Plastic waste valorization, energy generation, covid-19 pandemic, Plastic Waste Footprint (PWF).

### Description:

Bucaramanga is the city located in the Andean region with overall population of metropolitan area one million three hundred sixteen thousand one hundred ninety-two inhabitants (1,316,192) (DANE, 2023), is a typical Latin-American city with problems related to plastic waste utilization and valorization.

The increase in plastic waste due to the pandemic that comes from domestic, health, and sanitary activities has been a serious problem since 2019 (Klemeš et al., 2020). It is necessary to control the plastic brand (Flores, 2021) in the natural environment, to facilitate the design of waste treatment systems and the comparison of alternatives such as incineration, pyrolysis, gasification, and others. Through scientific studies, it is possible to show that a reduction of 80% to 95% in the volume of waste is achieved through thermal conversion technologies (Singh et al., 2011).

The feasibility of implementing the environmental footprint based on life cycle analysis - LCA, for true decision-making in the implementation of new technologies in the treatment of solid plastic waste related to COVID-19, in order to minimize the marks in the environment as well as risks to human health, especially in intermediate development countries like Colombia. (Afanador et al., 2022).

---

\* Impact of Plastic Waste energy recycling technologies on pollution rates in the Metropolitan Area of Bucaramanga

\*\* Industrial University of Santander, Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering. Director: Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov, P.h.D Ingenier Hábil, P.h.D Technical Science.

## Introducción

Desde la aparición de los plásticos como derivados del petróleo, se constituyeron en una oportunidad como artículos para diversos usos, siendo en muchos casos una solución de diversas situaciones, para conformar y hacer presencia de la vida de los habitantes de la tierra, siendo un espacio la salud, ya que han servido para el desarrollo médico, como también en los diferentes campos de la industria, beneficiando su desarrollo por cualidades como el peso y el tamaño de los productos, generando beneficios de producción y productividad, sin contemplar la evolución de los mismos como residuos sólidos convertidos en desechos, convirtiéndose en un problema de tal magnitud, que se han conformado los continentes de plásticos en los diferentes océanos (Lahoz, 2022), y las montañas de plástico resultados de los campos abiertos de residuos sólidos urbanos, siendo no degradables puesto que cuentan con una vida aproximada de 100 años. De acuerdo con Klemes et al. (2020), antes de los tres años de restricciones por la pandemia, el manejo de los residuos plásticos se considera un problema ambiental importante, debido a la creciente preocupación por la contaminación en los ecosistemas terrestres y marítimos (Flores Arévalo, 2021), (Rajmohan et al., 2019). Durante el periodo de pandemia las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> se disminuyeron en un 17% con relación al año anterior (Le Quéré et al., 2020), debido a la restricción de dos factores muy importantes: la industria y el transporte, muy a pesar del crecimiento de otros sectores gracias al consumo, como el de plásticos, herramientas quirúrgicas, materiales de alto rendimiento para cirugía mínimamente invasiva y dispositivos desechables médicos, los dos últimos constituyen los Equipos de Protección Personal y generan un incremento de cuatro veces de residuos (Saadat et al., 2020) mientras que surgen problemas críticos de gestión de estos, debido a la necesidad de garantizar la destrucción de patógenos residuales en los desechos domésticos y médicos.

El acopio de residuos plásticos en la AMB, van a diferentes sitios, una parte van para el reciclaje y otra mayor para el botadero de basura a campo abierto “El Carrasco”, el cual ya cumplió su límite de expansión siendo un problema doblemente crítico porque ya alberga más de su capacidad quedando expuesto los desechos orgánicos y plásticos, convirtiéndose en una contaminación del aire, produciendo olores nauseabundos que llegan a la ciudad de Bucaramanga, tal como se manifiesta el Burgomaestre encargado del municipio de Bucaramanga en el Decreto 0070 (2023), planteándose como problemática actual; de igual manera los residuos plásticos hospitalarios son recogidos por empresas especializadas como SANDESOL S.A. E.S.P. (2023) y DESCONT S.A.S. E.S.P. (2023), las cuales realiza el tratamiento de residuos mediante desactivación de alta eficiencia por calor húmedo y tratamiento de incineración. El aumento de estos residuos ha sido inevitable, justificando su análisis minucioso para considerar desde la ingeniería química alternativas que sean sostenibles para el ser humano en cuanto a su salud y al medio en el que vive, manteniendo una buena administración de estos residuos plásticos con el fin de minimizar los efectos del cambio climático; por tanto, es necesario para controlar el impacto del plástico (Klemeš et al., 2020) sobre el ambiente, conocer y saber sobre los procesos de sistemas tecnológicos de residuos sólidos de plásticos tales como la incineración, la pirólisis, y la gasificación, soportado en estudios en donde manifiestan que se puede lograr una reducción del volumen de 80 a 95% para desechos generados mediante tecnologías de conversión térmica (Singh et al., 2011), procurando el cuidado del planeta tierra y sus seres vivos, para que los esfuerzos medioambientales previos no se vean frustrados por eventos mundiales no previsibles.

Por tal motivo, se propone como pregunta de investigación: ¿Cómo impactarían las tecnologías de reciclaje energético de residuos plásticos en los índices de contaminación del Área Metropolitana de Bucaramanga - AMB?

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Analizar las tecnologías de reciclaje energético de residuos plásticos para determinar su impacto en los índices de contaminación del Área Metropolitana de Bucaramanga.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las basuras plásticas urbanas generados en el AMB que servirán como materia prima para alimentar los tratamientos de residuos.
- Simular la transferencia tecnológica del reciclaje energético por medio de desechos plásticos que tenga mayores beneficios de las tres tecnologías analizadas (incineración, pirólisis, y gasificación); mediante el software ASPEN PLUS, permitiendo determinar los impactos que pueda tener sobre la humanidad, en cuanto a su salud y el ambiente en el que vive.
- Realizar un estudio de factibilidad económica de la transferencia tecnológica con menor impacto ambiental.

## 2. Estado del arte

Existen medidas para controlar el impacto del plástico en el medio ambiente que se han estudiado durante décadas, como las tácticas de las 4R de “reducción, reutilización, reciclaje y reutilización”. (Klemeš et al., 2020). El reciclaje se utiliza en utensilios plásticos de larga durabilidad. Sin embargo, esto no se aplica a todos los productos, especialmente a los sanitarios o dispositivos médicos que son difíciles de recuperar cuando se exponen a agentes biológicos contaminantes.

Con la ayuda del reciclamiento obtenemos materias primas para fabricar otros productos. Este proceso comienza con la primera etapa de clasificación de los residuos, que se denomina

tratamiento primario. El procesamiento secundario consiste en fundir estos residuos para convertirlos en productos distintos a los originales, lo que incluye trituración física, lavado, secado y homogeneización. (Arandes et al., 2004). Un tercer método de un proceso que transforma residuos de plásticos cambiando su estructura química mediante reacciones para producir sustancias que se utilizan como materia prima en la fabricación de nuevos productos, excluyendo herramientas para la producción de combustible o la generación de electricidad. Entre las reacciones químicas están la metanólisis, hidrólisis, glucólisis y aminólisis. (Arandes et al., 2004), (Elgegren et al., 2012). El cuarto tipo de reciclaje es la degradación térmica de los plásticos, como la pirólisis, la incineración y la gasificación para producir energía. Ahora, la recuperación de energía es una alternativa al reciclaje mecánico llamado reciclaje de energía. (La Trinchera - Reciclados, 2019). Se trata de un proceso en el que los residuos plásticos se utilizan como combustible para generar electricidad y calor mediante incineración mediante tecnologías como la incineración de residuos, la pirólisis y la gasificación de acuerdo con la legislación sobre emisiones.

### Figura 1.

*Reciclaje mecánico y valorización energética se complementan a la hora de procesar residuos plásticos en una economía circular.*



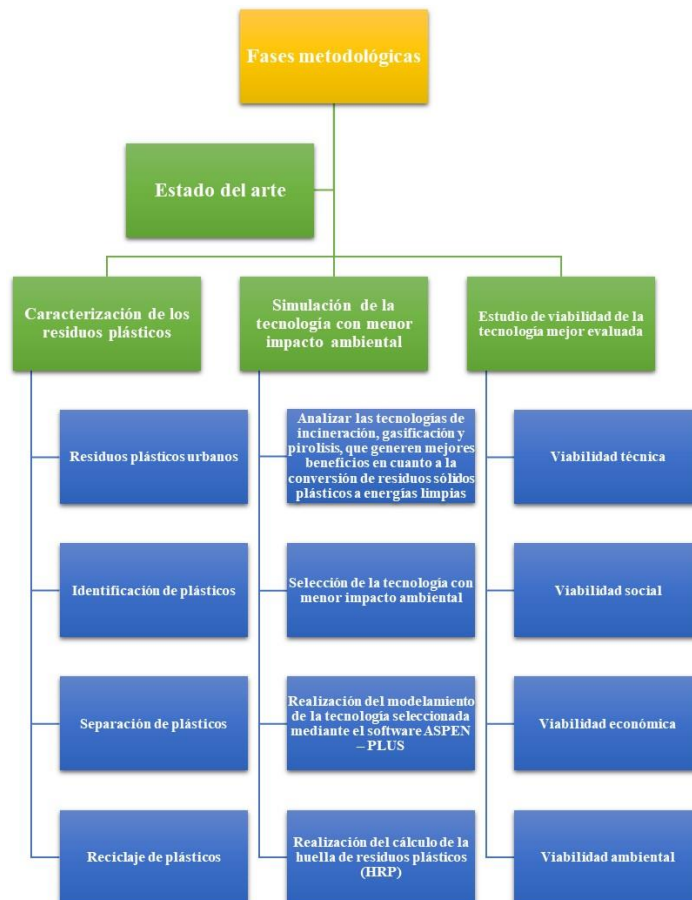
*Nota.* Tomado de (Ecoplas, 2020)

Dentro de la gran variedad de plásticos reciclados se encuentran los plásticos termoestables y los termoplásticos, cuya diferencia radica su procedimiento a altas temperaturas: mientras que los termoplásticos se pueden transformar y calentar tantas veces como se desee, siendo ideales para el reciclado mecánico, mientras que los termoestables lo hacen una sola vez, por tal motivo se idealizan para le recuperación energética. Ahora bien, se podría decir que los termoplásticos son materia prima para cualquier proceso de recuperación, sin embargo, para considerarlo como producto de ciclo de vida constante y de economía circular, la primera opción es aquella que cumpliría.

### 3. Metodología

**Figura 2.**

*Esquema del método utilizado*



Para el desarrollo de este estudio se considera que la metodología más adecuada es la investigación bibliográfica, la cual se conoce como uno de los métodos de la investigación fenomenológica, que se encarga de recolectar, organizar y seleccionar datos de los materiales de lección de cada tema de investigación, previa unos. imagen, para ello es necesario clasificar documentos informativos que permitan discutir los objetos de observación, analizar datos, identificar, seleccionar y asociar con objetos de estudios. (Guerrero Dávila, 2015). Los estudios documentos se caracterizan por el uso de datos secundarios como fuente de información, en donde su principal fin es guiar el estudio a partir de dos perspectivas, primero correlacionando el conocimiento existente de diferentes fuentes y luego proporcionando una medición panorámica y revisión sistémica (Barraza, 2018).

## **4. Resultados**

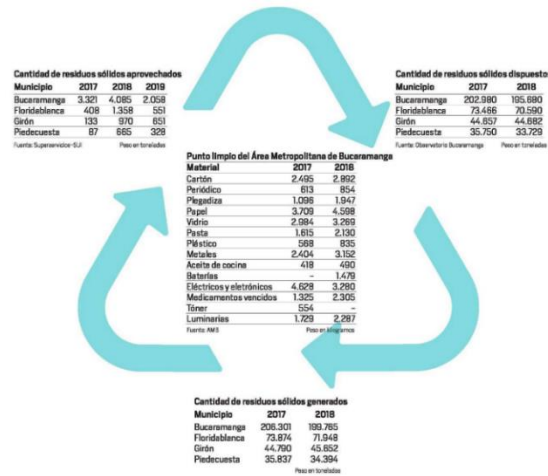
### **4.1 Caracterización de los residuos plásticos**

El impacto antrópico de los vertederos y vertederos a la intemperie es significativo y la colocación final de estos residuos sigue una gráfica de crecimiento, a pesar de los esfuerzos de algunos actores por minimizar la generación de basuras. La colocación final de basuras fue quizás el problema socio-ambiental más apremiante en el AMB, ya que no cuentan con un lugar para aceptar las basuras, estado que refleja la falta de administración de las autoridades responsables (Franco et al., 2018).

En el informe sobre las toneladas de plástico realmente utilizadas en Colombia, el material más utilizado son otros plásticos (29%), seguido del PET (27%), seguido de pastas y materiales soplados (12%). El quinto material es plástico blanco con un 6%, seguido del PVC y PE cada uno al 5%, PP al 3% y finalmente PMMA al 1% de toda la familia de plásticos 2020.

**Figura 3.**

*Disposición de basuras sólidas en el AMB.*



Nota. Tomado de: (Albis Pérez, 2019)

En la Figura 3, se evidencia: El 100% de las basuras sólidas generadas en el AMB en el año 2017, el 98% son basuras sólidas dispuestas y de estos el 1,1% son basuras sólidas aprovechables; muy similar sucede con el 100% de las basuras sólidas generadas en el AMB en el año 2018, el 97% son basuras sólidas dispuestas y de estos el 2% son basuras sólidas aprovechables. Ahora bien, con respecto a lo recolectado en los puntos limpios que se encuentran ubicados en el AMB, en el 2017 el 2,4% es plástico, y en el 2018 es el 2,8%.

**Tabla 1.**

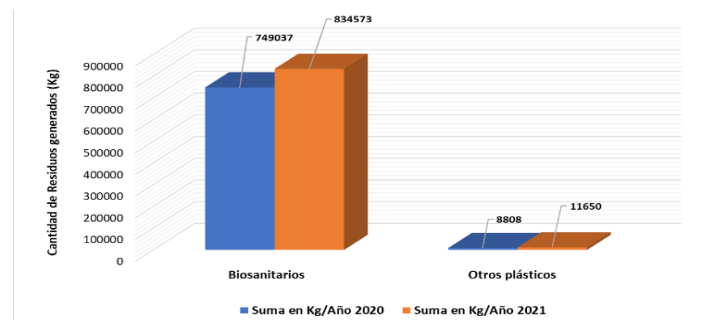
*Cantidad de residuos plásticos generados 2020 y 2021 empresa DESCONT S.A.S.*

Tipo de Residuo	Cantidad de basuras plásticas generadas (Kg) 2020	Cantidad de basuras plásticas generadas (Kg) 2021
Biosanitarios (Biosanitarios vacunas COVID-19, Biosanitarios residuos hospitalarios).	749.036,68	837.692,4
Otros plásticos (Bolsas de gel, Envases vacíos de insumos médicos, Plástico contaminado, Plástico reciclable).	413,8	45,2
<b>Total</b>	<b>757.844,305</b>	<b>849.341,965</b>

Nota. Adaptado del informe nacional de DESCONT S.A.S. E.S.P. (2023)

**Figura 4.**

*Comparación de cantidad de residuos plásticos para el año 2020 y 2021*



*Nota.* Tomado de: (DESCONT S.A.S. E.S.P., 2023).

En la Tabla 1 y la Figura 4, se relaciona los kilogramos por año recolectados de plástico generados en los años 2020 y 2021 en el AMB en los puntos donde está autorizado la empresa DESCONT S.A.S. E.S.P. Evidenciando claramente un aumento debido a la emergencia sanitaria.

**Tabla 2.**

*Toneladas anuales generadas de basuras sólidas en el AMB en 2020.*

Municipio atendido	Toneladas/año
Bucaramanga	188.230,005
Floridablanca	75.786,4
Girón	48.096,6
Piedecuesta	37.742,37
	<b>349.855,375</b>

*Nota.* Adaptado del informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2020 (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022).

En la Tabla 2. Se registra las toneladas que se producen anualmente para el año 2020 de basuras sólidas en los municipios que conforman el AMB, con un total de 349.855,375. En el Plan General de Gestión de Residuos Sólidos (PGIRS) 2016-2027 de Bucaramanga, se evidencia el 10% del total de residuos enviados a relleno sanitario es plástico. De los cuales sólo se utiliza el 6%. El resto son rechazados porque el plástico está contaminado, no tiene mercado o es de

difícil recuperación. Del total de basuras plásticas finales procesados, el 15,79% son envases de PET, el 10,89% son PEAD, el 4,59% PVC, el 38,59% PEBD, el 16,69% PS, el 13,09% son otros plásticos y algunas partes del PP (Concejo Municipal de Bucaramanga, 2021). En el segundo trimestre del 2023 el carrasco recibió 85.690 toneladas, es decir, aproximadamente 28.563 toneladas mensuales (Vanguardia, 2023). Teniendo en cuenta lo anterior, los investigadores se estipularon la siguiente tabla:

**Tabla 3.***Plásticos producidos por municipio*

	PET	PVC	PS	PEAD	PEBD	PP Y OTROS	TOTAL KG PLÁSTICOS APROVECHABLES	TOTAL KG PLÁSTICOS SUCIOS	TOTAL KG PLÁSTICOS	TOTAL TON PLÁSTICOS APROVECHABLES	TOTAL TON PLÁSTICOS SUCIOS	TOTAL TON PLÁSTICOS APROVECHABLES	TOTAL TON PLÁSTICOS SUCIOS	TOTAL TON PLÁSTICOS DIARIOS	TOTAL TON PLÁSTICOS DIARIOS
BUCARAMANGA	14341,27	4168,15	15158,75	9890,53	35050,83	11888,82	90831,40	1423025,27	1513856,67	90,83	1423,03	1513,86	3,03	47,43	50,46
FLORIDABLANCA	5411,80	1572,89	5720,28	3732,28	13226,73	4486,35	34276,00	536990,67	571266,67	34,28	535,99	571,26667	1,14	17,9	19,04
PIEDECUESTA	2705,90	786,44	2860,14	1866,14	6613,36	2243,17	17138,00	268495,33	285633,33	17,14	268,50	285,63333	0,57	8,95	9,52
GIRON	3517,67	1022,38	3718,18	2425,98	8597,37	2916,13	22279,4	349043,93	371323,33	22,28	349,04	371,32333	0,74	11,63	12,38
OTROS (3 MUN)	1082,36	314,58	1144,06	746,46	2645,35	897,27	6855,20	107398,13	114253,33	6,86	107,40	114,25333	0,23	3,58	3,81
MES	27059,00	7864,44	28601,42	18661,38	66133,64	22431,74	171389,00	2684953,33	2856333,33	171,38	2684,95	2856,33			
DIARIO	901,97	262,15	953,38	622,05	2204,45	747,72	5712,67	89498,44	95211,11	5,71	89,50	95,21	5,71	89,5	95,21
ANUAL	324707,97	994373,25	343217,01	223936,53	793603,65	269180,85	2056560,0	32219440,00	34276000,00	2056,56	32219,44	34276,00			

Con la información del párrafo anterior se construyó la anterior tabla, en donde se muestran las cantidades por toneladas de basuras sólidas, específicamente plásticos aprovechables y no aprovechables que producen los municipios del área metropolitana y otros, especificados por kilogramos y toneladas, a diario, mensual y anual, con el fin de saber las cantidades promedios; datos que sirven para realizar el análisis de viabilidades.

**Tabla 4.**

*Precios promedio por kilogramo de comercialización de materiales por presentación a nivel nacional*

PRECIO PLASTICO RECICLADO POR TIPO				
DESCRIPCION	NOMENCLATURA	UNID	CANT	VR UND
POLIESTIRENO	PS	KG	1	1350
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	PEBD/LDPE	KG	1	2530
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD	PEAD/HDPE	KG	1	2850
POLIETILENO TEREFTALATO	PET	KG	1	1150
POLICLORURO DE VINILO	PVC	KG	1	498
POLIPROPILENO	PP	KG	1	1376

*Nota:* Tomado de: (Acoplásticos, 2023)

En la Tabla 4, se refleja el precio para el 2023, de los plásticos estudiados anteriormente, que son los que más se producen en los residuos sólidos del AMB. Estos precios permiten generar el estudio de factibilidad económica. De los plásticos registrados el polietileno de alta densidad PEAD/HDPE es el mejor pago a \$2850.00 por kilogramo, seguido del polietileno de baja densidad PEBD/LDPE pago a \$2530.00 por kilogramo, siendo este plástico el mayor producto en basuras sólidas con 2.204,45 kg diarios.

## 4.2 Simulación de la tecnología de reciclaje energético

### 4.2.1 Análisis comparativo de las tecnologías de Incineración, Gasificación y Pirólisis

**Tabla 5.**

*Ventajas y desventajas de procesos de Incineración, Pirólisis y Gasificación.*

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Incineración</b>	<p>Reducción de volumen. Emisiones bajo control. Uso de calor para generación de energía y más. Alternativa a los vertederos cuando falta espacio. Relativamente silencioso e inodoro (si se toman medidas preventivas).</p>	<p>Alta inversión inicial. Altos costos para evitar la contaminación causada por los gases de escape. Dificultades en la operación (necesidad de trabajos especiales). Posibilidad de producir productos muy nocivos (dioxinas, furanos, metales pesados). Problemas en las comunidades cercanas al incinerador. La posible generación de desechos entra en conflicto con los programas de reducción. Requieren más energía cuando se trata de desechos con alto contenido de humedad.</p>
<b>Pirólisis</b>	<p>Aprovechamiento de subproductos en otros procesos. Permite la formación de determinados productos dependiendo de las condiciones de uso. Evita la formación de compuestos peligrosos de nitrógeno, halógenos y azufre (previa selección de materiales que se incluyen en el proceso). Fácil manipulación de productos finales (excepto líquidos debido a su alta corrosividad y viscosidad).</p>	<p>Altos costos de inversión inicial. Hay que tener cuidado durante la operación para evitar la adquisición de productos no deseados. Aún no se dispone de grandes instalaciones. Los recursos deseables se destinan al reciclaje. Requieren más energía que la que se procesan los residuos. alto porcentaje de humedad.</p>

Tecnología	Ventajas	Desventajas
<b>Gasificación</b>	<p>Adquisición de gas de síntesis para diversos fines (producción de electricidad, uso como combustible, producción de diversos productos químicos).</p> <p>Fácil utilización de los productos resultantes.</p> <p>Evitamos la formación de compuestos peligrosos de nitrógeno, halógenos y azufre (preselección de materiales a incluir en el proceso).</p>	<p>Dificultad operativa.</p> <p>Experiencia limitada a gran escala.</p> <p>Prefieren utilizar recursos para el reciclaje.</p> <p>Requieren más energía para procesar residuos con alta humedad.</p>

*Nota.* Tomado de: (A. Steinvorth, 2014)

La Tabla 5, permite conocer los diversos beneficios que trae la ignición de basuras sólidas como elección a su beneficio, asegurando el beneficio del resultado final y ayuda a gestionar las basuras en los sumideros. Empero, la desventaja tiene un alto costo medioambiental, que aqueja con gran preocupación es la emanación de gases complejos con atributos peligrosos como las dioxinas y furanos, que son resultados de la quema de despojos sólidos urbanos, muy perjudiciales para la salud, de igual manera, se requiere costos adicionales a la hora de implementar el proceso, para controlar la cantidad de contaminación emitida.

Los diferentes métodos térmicos son una medida para la gestión de residuos sólidos, puesto que sólo se utiliza una clase de ellos, los plásticos, quedando en el ambiente los metales y vidrios entre muchos otros, que no son aplicables en estos tratamientos (Steinvorth, 2014).

#### **4.2.1.1 Vigilancia tecnológica de cada tratamiento**

Se llevó a cabo una vigilancia tecnológica de cada tratamiento para la determinación del inventario de los procesos, equipos y materia prima.

**Tabla 6.***Características principales de los 3 procesos térmicos*

	<b>Pirólisis</b>	<b>Gasificación</b>	<b>Combustión</b>
<b>Temperatura de reacción (°C)</b>	250-700	500-1600	800-1450
<b>Presión (Bar)</b>	1	1-45	1
<b>Atmósfera</b>	inerte/nitrogeno	agente de gasificador O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Aire
<b>Relación estequiométrica</b>	0	<1	>1
<b>Productos del proceso</b>			
<b>Fase gas</b>	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , HIDROCARBUROS, H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
<b>Fase sólida</b>	CENIZA, COQUE	Escoria, Ceniza	Ceniza, Escoria
<b>Fase Líquida</b>	Aceite de pirólisis y H <sub>2</sub> O		
<b>Productos generados</b>	Bioaceite: Combustible renovable para generar energía	Gas de síntesis: Producción de combustible sintéticos como metanol, gasolina y diésel.	Calor, Generación de electricidad, vapor, entre otros
	Carbón: generación de Calor. Uso en altos hornos en la industria.		
	Ácidos Orgánicos: Repelente, insecticida, fungicida natural		

Tomado de: (Yesenia, 2020)

La anterior tabla, muestra las particularidades principales de los tres procesos en estudio, en los que se aprecia el calor de la reacción al tratamiento de pirólisis con las más bajas temperaturas; la atmósfera que se manejan en cada proceso, siendo la pirólisis la tecnología sin uso de oxígeno; Siendo el proceso de pirólisis el que más aporta para el desarrollo sostenible de la empresa de acuerdo a los productos generados.

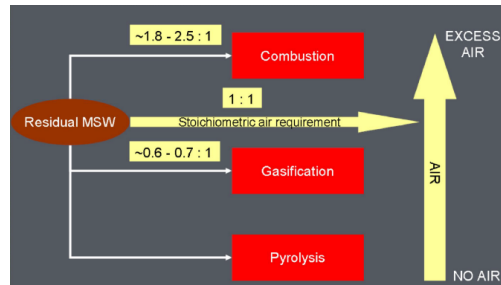
Las industrias de pirólisis y gasificación tienen un desarrollo parecido a la industria de incineración, aunque con diferencias marcadas:

- Pretratamiento: en procesos de pirólisis y gasificación es más extenso, debido a que la alimentación debe ser más precisa, se requiere un tratamiento más completo de las partículas entrantes. Además, se requiere equipo adicional para la eliminación adecuada del material desechado.
- Carga: mejor control de densidad.
- Termorreactor: reemplaza la etapa de combustión o se utiliza como elemento.
- Manipulación de productos: manipulación, almacenamiento y manipulación de productos gaseosos y sólidos generados durante el proceso.

- Combustión de productos: En este caso, la combustión puede considerarse como una etapa que implica la recuperación de energía mediante la quema de productos y el tratamiento y control de las fases gaseosa, líquida y sólida.

### Figura 5.

#### *Procesos de conversión térmica*



Tomado de: (WSP Environmental Limited, 2013)

En la Figura 5, muestra los procesos de conversión térmica en estudio en el presente proyecto, en un orden ascendente vertical, identificando el consumo de aire como materia prima para el proceso, permitiendo contemplar de aquel proceso que no necesita aire – la pirólisis – hasta aquel que si necesita aire en exceso – Incineración –

#### **4.2.1.2 Diferencias entre pirólisis, gasificación e incineración.**

La gasificación de residuos permite sintetizar gas, el cual se usa para combustible, insumo químico o combustible. Se conoce como desarrollo de pirólisis perfeccionado que convierte sustancias sólidas o líquidas con un gran contenido de carbono en una mixtura de combustible gaseoso a través de POX (oxidación parcial) por calentamiento. La diferencia entre incineración y gasificación es la incorporación de oxígeno, por tanto, en la pirólisis y gasificación la reducción se realiza sin incorporación de oxígeno o con una muy pequeña presencia de oxígeno, evitando emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. El proceso físico se simplifica exponiendo un combustible con propiedades complejas en ausencia de altas

temperaturas, como también, baja concentración de  $O_2$  para liberar materias preexistentes o formar nuevas materias que son etéreos a estas temperaturas. Por último, la composición de gases formada con  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_3OH$ , etc., alcanza el equilibrio para formar un sólido rico en carbono.

Al tener gas como resultante, es factible su uso para producir energía en el proceso de incineración ya sea sumándole gas natural o sólo, la producción de energía calorífica en calderas comerciales para la producción de electricidad y en motores de ignición interna y para la producción de energía en generadores de gas de ciclo simple. y/o misceláneos para originar electricidad. El proceso de gasificación suele tener lugar en un ambiente anóxico a una presión de 20 a 70 bar (290,075 – 1015,26 PSI). La gasificación como combustible puede tener muchas aplicaciones. Al inyectar un aumento limitado de oxígeno en la biosfera, el sistema cumple y supera todos los estándares de contaminaciones atmosféricas establecidos por el Protocolo de Kioto (Pinochet, 2013).

Para conocer la mejor forma de disposición de los residuos municipales, se realizó un análisis de los datos anteriores, teniendo en cuenta parámetros de seguridad, aspectos operativos, costos de inversión y operativos y efectos ambientales. Para ello, cada método se evalúa teniendo en cuenta las cuestiones mencionadas anteriormente. La valoración del método de selección fue 5 muy buena, 4 buena, 3 regular, 2 mala y 1 cero. Además, a todos los parámetros estudiados se les dio la misma importancia, de modo que cada uno de ellos recibió un peso del 25%. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Evaluación y ponderación de procedimientos calientes con parámetros establecidos*

Metodo	Parámetros			Resultados
	Seguridad Operacional	Costos	Ambiental	
Incineración	2	3	2	2,25
Pirólisis	4	4	3	4
Gasificación	4	2	4	3,75

Con ayuda del análisis anterior se pudo afirmar que la pirólisis es el método de calentamiento más apropiado y técnica e industrialmente conveniente para el aprovechamiento de residuos plásticos sólidos para los fines de este proyecto.

#### 4.2.2 Ecuaciones de Balance

##### Balance de masa

$$M_{pcr} + M^*_{cat-r} + M_{H2O-1} = M_{cr+mc} + M_{ap} + M_{H2O-2} + M_g \tag{Ec. 1}$$

Donde:

Entradas	Salidas
$M_{pcr}$ : Masa de plástico contaminado al reactor	$M_{cr+mc}$ : Masa de carbonilla en el reactor+ masa-catalizador*
$M^*_{cat-r}$ : Masa de catalizador al reactor	$M_{ap}$ : Masa de aceite pirolítico
$M_{H2O-1}$ : Masa agua	$M_{H2O-2}$ : Masa agua salida
	$M_g$ : Masa Gas

##### Composición de entrada

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_4 + F_5 \tag{Ec. 2}$$

$$F_1 = 84.795,02 \frac{kg}{mes} \tag{Ec. 3}$$

##### Determinación del exceso de aire



$$Oxigeno\ real \left( \frac{Kmol}{h} \right) = \frac{Oxigeno\ real}{\% \text{ de Oxígeno en Aire } (0,21)} \tag{Ec. 7}$$

$$Aire\ real \left( \frac{Kmol}{h} \right) = Aire\ real \left( \frac{Kmol}{h} \right) * Masa\ molar\ Aire \left( \frac{Kg}{kmol} \right) \tag{Ec. 8}$$

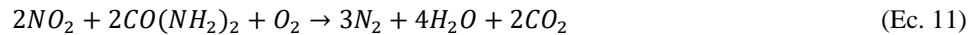
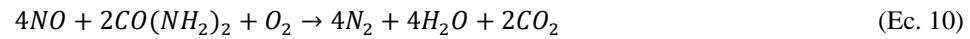
##### Gases de combustión



##### Las ecuaciones de reducción

Los  $N_xO_y$  (óxidos de nitrógeno), ya sea en presentación NO y  $NO_2$  en los gases inflamables, se comprimen a  $N_2$  y gases de agua gracias a la reducción de agentes oxidantes.

El uso de  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (urea) para el tratamiento de  $\text{NO}_x$  es un proceso bien establecido en el mundo de la incineración de basuras. Las reacciones entre la urea y los  $\text{NO}_x$ , permiten conocer el caudal que se necesita para poder tratar los gases de combustión que sale de la planta.



### Balance en el horno

$$F1 + F2 = F6 + F10 \quad (\text{Ec. 12})$$

$$F1 = 1.017.540,18 \frac{\text{kg}}{\text{Año}} \quad (\text{Ec. 13})$$

### Entrada de $\text{H}_2\text{O}$ introducido en el aire

$$\text{H}_2\text{O} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \text{humedad especifica aire} \left( \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire seco}} \right) \quad (\text{Ec. 14})$$

$$* \text{flujo de aire real introducido} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

### Entrada de $\text{H}_2\text{O}$ introducido en el residuo

$$\text{H}_2\text{O} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = H \text{ presente en la alimentación} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * PM_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{Kmol}} \right) \quad (\text{Ec. 15})$$

### Kmol de Carbono presentes en el $\text{CH}_4$

$$\text{CH}_4 \text{Kmol} = \text{CH}_4 \text{entrada} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * \frac{PM_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{Kmol}} \right)}{PM_{\text{CH}_4} \left( \frac{\text{kg}}{\text{Kmol}} \right)} \quad (\text{Ec. 16})$$

### Balanceo de energía.

#### Balanceo de energía global

$$Q - W = \Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

Energía ( $Q$ ) unidad kW

Trabajo ( $W$ ) unidad kW

Cambio de la entalpía ( $\Delta H$ ) unidad kW

Cambio de la energía cinética ( $\Delta Ec$ ) unidad kW

Cambio de la energía potencial ( $\Delta Ep$ ) unidad kW

Deferencias:

$W = 0$ , Para un sistema que no presenta radiación como tampoco corrientes eléctricas.

$\Delta Ec = 0$  Para un sistema con velocidad constante.

$\Delta Ep = 0$  Para un sistema con movimiento vertical igual a 0.

$$Q = \Delta H \quad (\text{Ec. 18})$$

En el cual:

Energía (Q) unidades kW

Cambio de la entalpía ( $\Delta H$ ) unidades kW

*Balanceo de energía del agua.*

Nombrando

$$Q = \dot{m}_{H_2O} * C_{pH_2O} * (T_{Eb} - T_1) + \dot{m}_{H_2O} * h_{fg(H_2O)} \quad (\text{Ec. 19})$$

En el cual

Energía (Q) unidades kW

Flujo másico del agua ( $\dot{m}_{H_2O}$ ) unidades kg/s

Capacidad calorífica del agua a presión constante ( $C_{pH_2O}$ ) en un rango de 4.186 kJ/kg\*K a 298,15 K

Temperatura de ebullición del agua ( $T_{Eb}$ ) unidades K

Temperatura del agua de la biomasa húmeda ( $T_1$ ) unidades K

Calor latente de vaporización del agua ( $h_{fg(H_2O)}$ ) en un rango de 2.257 kJ/kg190 a 373,15 K y 101,33 kPa

*Balanceo de energía del aire.*

Establece la temperatura con la que ingresa el aire al secador, buscando remover la humedad de la biomasa.

$$Q = \dot{m}_a * C_{p_a} * (T_2 - T_3) \quad (\text{Ec. 20})$$

En el cual:

Energía (Q) unidades kW

Flujo másico del aire ( $\dot{m}_a$ ) unidades kg/s

Capacidad calorífica del aire seco a presión constante ( $C_{p_a}$ ) rango de a 1,012 kJ/kg\*K a 393,15 K

Temperatura del aire que ingresa al secador ( $T_2$ ) unidades K

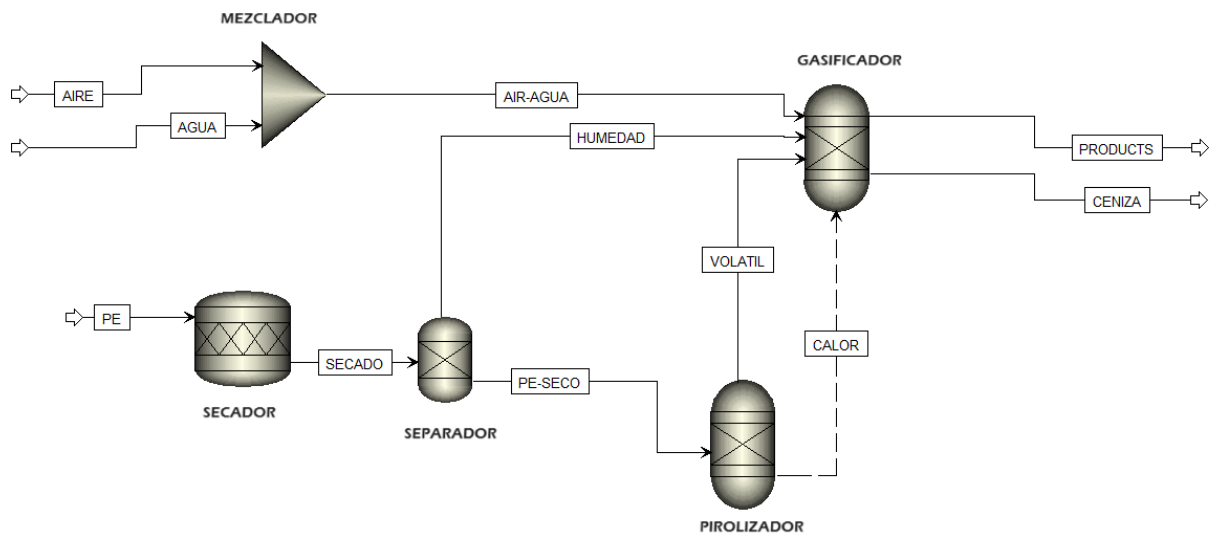
Temperatura del aire que sale del secador ( $T_3$ ) unidades K

### 4.2.3 Simulación mediante el software ASPEN – HYSYS

#### 4.2.3.1 Fases del proceso.

**Figura 6.**

*Diagrama iconográfico del proceso de pirólisis del PE con adición de gasificador en Aspen Plus*



La siguiente Figura 6, muestra un diagrama iconográfico de la conversión de PET a gas de síntesis. La fase inicial, llamada acabado de PET, pertenece al secado (módulos secadores y separadores). Las siguientes fases 2 y 3 son pirólisis y gasificación (módulos pirolizador, mezclador y gasificador).

#### Primera fase: secado.

Esta es la fase inicial con temperatura hasta 110°C, seca el PE evaporando el agua contenida.

#### Segunda fase: pirólisis.

El proceso de pirólisis implica la desintegración por temperatura de la materia orgánica PE sin agente gasificador y sin oxígeno, produciendo diversas cantidades de gas de síntesis, aceites, alquitranes y residuos carbonosos o carbonizados. La temperatura utilizada varía de 400 a 600 °C (Jung & Fontana, 2006). Este proceso no es energéticamente eficiente y, por lo tanto, se usa junto con un proceso de gasificación, donde el calor liberado en la reacción de combustión

en esta etapa se usa en una reacción de gasificación endotérmica posterior.

#### Tercera fase: gasificación.

La gasificación (Junquera, 2010) es una agrupación de cambios termoquímicos que tienen lugar en hipoxia ambiental, cuyo resultado es convertir desechos plásticos en diversos gases que pueden usarse en la producción. En caldera, turbina o motor debidamente regulado. Un gasificador emplea un gas o mezcla de gases para generar temperatura para la reacción. El provecho del proceso depende del conjunto de técnicas, el combustible y el gasificador utilizados y está en el rango del 70-80%. La energía restante que ingresa al combustible se utiliza para reacciones endotérmicas, pérdida de calor del reactor; enfriar el gas necesario para secar, para eliminar el vapor de agua, además de filtrar y depurar cuando se debe excluir la exudación del asfalto. El rango de temperatura utilizado en este proceso es de 800-1000°C. En esta fase se agrega al reactor cierta cantidad de O<sub>2</sub> o aire, dependiendo de la estequiometría para conformar CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Los resultados de la pirólisis se gasifican con O<sub>2</sub> y gas de H<sub>2</sub>O, lo que mejora el provecho general y acrecienta el equilibrio de H<sub>2</sub> en el gas de síntesis. Pudiéndose utilizar este como material directo para la producción de alcohol metílico o e-fuel, siendo el método ideal para la producción de Sintegás.

#### **4.2.3.2 Selección del modelo termodinámico.**

Primero, se debe observar el proceder de los agregados y sus composiciones desde la perspectiva molecular, especialmente desde un equilibrio líquido-vapor (LVE).

#### **ELV e fuerzas de interacción molecular.**

Las fuerzas de interacción molecular determinan las propiedades de un compuesto o mezcla.

#### **Termodinámica ELV – técnicas de predicción.**

Las condiciones que se requieren para obtener una medida termodinámica en un sistema multicomponente al momento de las etapas gaseosa y líquida son:

- Balance térmico, el calor debe ser igual en ambos instantes.
- Equilibrado mecánicamente, la presión en ambas etapas es la misma.
- Equilibrio químico, flujo constante de cada componente de la fase hacia la mezcla.

Esta última condición se puede expresar de diferentes maneras, dependiendo de cuán idealmente la acepte el sistema. por lo que entonces:

a) Si ambas fases funcionan perfectamente, entonces el equilibrio se establece utilizando la ley termodinámica de Raoult Law,  $y_i$

$$P = \sum x_i p_i^{sat} \quad (\text{Ec. 21})$$

b) Al existir una no idealidad leve o parca en ambos momentos, se puede utilizar una fórmula de proporción que contenga un  $\Phi_i$  (coeficiente de fugacidad) separado calculado a partir de la fórmula de estado del sistema real:

$$y_i V P = \Phi_i x_i p_i^{sat} \quad (\text{Ec. 22})$$

c) Si el estado líquido muestra no linealidades significativas, si es el caso, la presencia de enlaces de H<sub>2</sub>, se aplicará en un piloto de solución usando el  $\gamma$  (coeficiente de actividad):

$$y_i \Phi_i V P = \gamma_i x_i \Phi_i p_i^{sat} P O Y_i \quad (\text{Ec. 23})$$

A la anterior fórmula se le suma el factor de Poyting  $P O Y_i$ , que tiene en cuenta el efecto de las varianzas de presión entre  $p^{sat}$  (presión de vapor) y el procedimiento P.

d) Debe recordarse que las desviaciones de lo ideal ocurren en el estado líquido bajo equilibrio térmico menos estricto en comparación con el estado gaseoso, es decir que el fugicida en el vapor todavía se expresa como  $y_i P$ , sólo que en el estado líquido se requiere usar el piloto de solución. Para esto, se tiene una ley de los gases (ley de Raoult) modificada para que se exprese con relación a la fugacidad:

$$y_i P = \gamma_i x_i p_i^{\text{sat}} \quad (\text{Ec. 24})$$

Se necesita una sección separada para contabilizar los gases ELV como el N<sub>2</sub>. En este caso, es un gas disuelto en un líquido y la fugacidad no está tan relacionada con el cambio de fase como antes, por lo que tiene sentido utilizar la ley de Henry en lugar de una extensión de la ley de Raoult. Por tanto, la igualdad de fugacidad en estos casos quedará expresada como:

$$\phi_i y_i P = H_{i,mix} x_i \quad (\text{Ec. 25})$$

La razón entre la fugacidad y la presión (coeficiente de fugacidad) se calcula comenzando en la fórmula para un sistema de equilibrio térmico (fórmula de estado) del sistema real.

Métodos termodinámicos en modeladores de procesos más habituales:


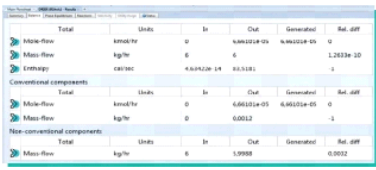
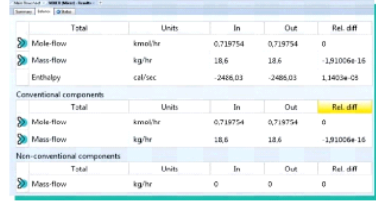
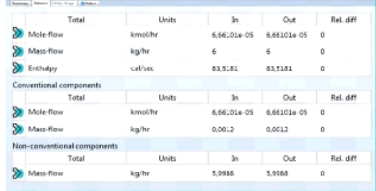
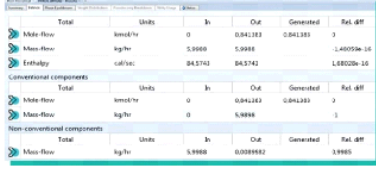
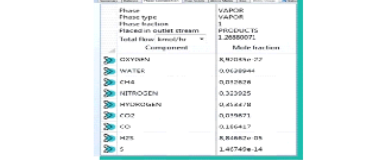
Las ecuaciones de estado para mezclas de hidrocarburos más habituales son: SRK (Soave-Redlich-Kwong) y PR (Peng-Robinson), cada una de ellas sus variantes.

Todas ellas requieren coeficientes de interacción binarios para tener en cuenta completamente las mezclas de múltiples componentes. La cantidad y calidad del stock disponible en un determinado modelador fijará un ajuste a los resultados que se consigan, respetando el método elegido y su aplicación. Para calcular los coeficientes de actividad, normalmente se tienen algunas opciones: La fórmula para el cálculo de equilibrio mediante el modelo de Wilson, el modelo de Margules, modelo no aleatorio de dos fluidos (NRTL), Modelo UNIQUAC (Universal Quasi Chemical), demandan valores experimentales de los parámetros de interacción entre los compuestos de la mezcla y el Modelo para corregir cualquier desviación entre la concentración física y la ideal (coeficiente de actividad) de UNIFAC (Grupo Funcional UNIQAC) es un procedimiento de predicción asentado en contribuciones grupales, como opción importante para informar experimentos.

#### 4.2.3.3 Variaciones y Balances

Tabla 8.

Variaciones y Balances

Variación y Balances	Figura Representativa	Descripción
Variación de agua y reacción en el secador		Dentro de los resultados obtenidos, en el secador se logra una variación de agua mínima mediante el proceso estequiométrico.
Balances de materia y energía en el Secador		De esta figura se exalta la Entalpía, ya que el flujo de energía térmica en la parte interna del secador es de un valor de $10^{-4}$ cal/s, mientras que en la parte externa del secador es de un valor de 83,5 cal/s, es decir, indica que el proceso en el interior del secador se realiza con un aprovechamiento de energía térmica ideal. Además, es un proceso endodérmico, es decir, absorbe energía; considerando los valores se absorbe en mayor cantidad fuera del secador que en el interior del secador; comparativamente, siendo mayor afuera.
Balances de materia y energéticos en el Mezclador		La Entalpía, en la parte interna y en la parte externa del mezclador es del mismo valor de -2486,03 cal/s, al ser negativa se considera, que el proceso en el mezclador es exotérmico y se encuentra liberando energía.
Balances de materia y energéticos en el Separador		La Entalpía, en la parte interna y en la parte externa del separador es del mismo valor de 83,5181 cal/s, al ser positiva se considera, que el proceso en el separador es endodérmico y se encuentra absorbiendo energía. Ocasionalmente del mismo valor que la entalpía externa del secador.
Balances de materia y energéticos en el Pirolizador		La Entalpía, en la parte interna y en la parte externa del pirolizador es del mismo valor de 84,5743 cal/s, al ser positiva se considera, que el proceso en el pirolizador es endodérmico y se encuentra absorbiendo energía.
Balances de materia y energéticos en el Gasificador		Se observó que la salida del pirolizador de residuos plásticos de polietileno produce una mezcla de gases que contienen metano e hidrógeno como productos combustibles con alto valor agregado y pueden proporcionar otros gases para otras aplicaciones donde también aporten valor agregado. Se considerará un análisis de sensibilidad de ciertos parámetros para ver si afectan directamente el desempeño general del proceso.

4.2.3.4 Análisis de Sensibilidad

Los casos analizados son los siguientes:

Tabla 9.

*Análisis de Sensibilidad*

Caso 1: Efecto de la relación de cantidad de vapor de entrada.		
<p>Variación de los caudales de CH<sub>4</sub> y el H<sub>2</sub> respecto al flujo de vapor alimentado al gasificador.</p>		<p>La proporción del flujo de vapor introducido en el gasificador tiene un efecto directo sobre los caudales de metano e hidrógeno resultantes. Las dos figuras muestran los cambios en los caudales de metano e hidrógeno obtenidos en función de los cambios en el caudal de vapor del gasificador.</p> <p>El efecto de los cambios en el caudal de vapor en el proceso se obtuvo manteniendo la velocidad de alimentación de polietileno a un valor constante de 6kg/h. Al inicio de la curva, con un caudal de vapor de 1kg/h, la producción de CH<sub>4</sub> es mínima, a partir de este punto la producción de CH<sub>4</sub> aumenta significativamente, la pendiente de la recta en el caudal. Para caudales de vapor de hasta 7kg/h. A partir de este punto la pendiente deja de ser significativa y se alcanza la máxima producción de CH<sub>4</sub> con un valor de caudal de vapor de 9,5kg/h, a partir del cual la producción de CH<sub>4</sub> empieza a disminuir.</p> <p>Por otro lado, siguiendo el análisis, para el combustible H<sub>2</sub> se observa que su crecimiento de producción es constante, con una pendiente menor que el CH<sub>4</sub> alcanzando un máximo alrededor de los 30kg/h, que es el punto óptimo de producción de combustible. H<sub>2</sub> inter. La producción de metano se multiplicó por seis en el valor máximo, mientras que la producción de hidrógeno no se duplicó en toda el área de análisis. Llegar al punto óptimo requiere optimizar los beneficios de eficiencia energética de ambos combustibles, porque, aunque el caudal de metano comienza a disminuir a partir de un cierto valor, la disminución es muy gradual. El costo de entrada de vapor debe analizarse frente al rendimiento energético potencial de los dos combustibles producidos en el proceso.</p>
<p>El caudal del producto de gasificación varía con el caudal de vapor.</p>		<p>Por otro lado, en esta figura también se pueden observar los cambios en los demás componentes del producto final y cómo varían sus proporciones con el aumento de la cantidad de vapor, por ejemplo, se observa que el aumento de la cantidad de vapor, la cantidad de CO disminuye, pendiente negativa, por otro lado, el CO<sub>2</sub> aumenta significativamente, pendiente positiva. En resumen, podemos decir que aumentar el caudal de vapor en el gasificador aumenta la producción de combustible y también reduce los contaminantes, como el CO en este caso.</p>
Caso 2: Efecto del volumen de aire.		
<p>Análisis de sensibilidad de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> a cambios en el flujo de aire.</p>		<p>En las figuras, se muestran la evolución de los caudales de metano e hidrógeno en función del caudal de aire suministrado al gasificador, manteniendo constante el caudal de vapor, y la relación entre este caudal y la proporción de compuestos obtenidos en el gas.</p> <p>Primero, se analiza cómo el flujo de nitrógeno afecta la producción de CH<sub>4</sub>. La figura inferior muestra que el valor máximo corresponde a un flujo de nitrógeno de 1kg/h. A partir de este valor la producción comienza a disminuir hasta que el caudal alcanza los 9,5kg/h, tras lo cual la curva muestra un pequeño aumento en la producción de CH<sub>4</sub> hasta alcanzar un valor máximo de 15kg/h. Para el H<sub>2</sub>, su valor máximo también corresponde a un caudal de aire de 1kg/h, y es a partir de este valor que la producción de H<sub>2</sub> disminuye significativamente y alcanza una producción mínima de nitrógeno de 15kg/h.</p>
<p>Análisis de la sensibilidad del producto en función de los cambios en el flujo de aire.</p>		<p>Analizando los cambios de caudal de aire y cómo afectan a la cantidad de producto obtenido, se observa en la figura superior que la producción máxima de CH<sub>4</sub> corresponde al valor de caudal de oxígeno de 1 kg/h, a partir del cual la producción de CH<sub>4</sub> disminuye hasta el caudal de aire a 6kg/h, a partir de este valor de caudal de aire no se genera CH<sub>4</sub>. Para la producción de H<sub>2</sub>, comienza a subir hasta un valor máximo de 5kg/h, a partir del cual la producción disminuye. Los otros dos productos que se ven en el gráfico aumentan con el flujo de aire entrante, la producción de CO<sub>2</sub> es la más afectada por este aumento, mientras que la producción de CO<sub>2</sub> permanece prácticamente sin cambios.</p>
Caso 3: Efectos del estrés.		
<p>Análisis de sensibilidad de los cambios de presión del gasificador.</p>		<p>Dado que la composición del equilibrio es una función importante de la presión, se realiza simulaciones para comprender qué sucede en presencia de presión alta y baja. Para ello se cambia la presión sobre el carburador de 1 a 30 bares. De todas las reacciones de gasificación, sólo la metanación y la reacción entre metano y vapor se ven afectadas por los cambios de presión, ya que estas son las dos únicas reacciones en las que la reacción cambia el flujo total. Por lo tanto, se espera que el aumento de la presión promueva la formación de metano y limite o reduzca el contenido de hidrógeno a los valores previstos.</p>

**4.2.4 Realización del cálculo de la huella de residuos plásticos (HRP)**

Para calcular la huella de CO<sub>2</sub> se considera y se basan la situación actual de los

conocimientos tecnológicos y los dispositivos o equipos para el desarrollo de los procesos y su implementación en plantas de procesos a escala reducida. La planta está distribuida por lotes con una cabida de residuo plástico de 250 kg (1 lote = tiempo de operación (7h) más tiempo de enfriamiento (4h)), pierde el calor del proceso de enfriamiento y no recupera el exceso de calor. Este proceso y las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) consisten en gases de ignición que contienen un exceso de O<sub>2</sub> a temperaturas en un rango de -100° a 400°C, dependiendo del tiempo del ciclo. Cabe señalar que, a escala de prueba, la consumición de ustible para la mantención del proceso es aproximadamente 34% de los residuos que se procesaron debido a mermas observadas e inacción inherentes a las técnicas por lotes. En grandes procesos operación continua u operación semicontinua con restablecimiento secundario de temperatura, esta consumición reduce los residuos procesados en un 20%.

El método utilizado calculará las emisiones de CO<sub>2</sub> correspondientes a la "Área 1", es decir, artículos de la consumición continúa usados como ustible en el desarrollo y equivalentes de CO<sub>2</sub> proporcionado al "Área 2", es decir. Equivalentes de CO<sub>2</sub> de otras fuentes de energía de proceso utilizada, en este caso sólo hay energía eléctrica. Los equivalentes de CO<sub>2</sub> correspondientes al "Área 3", es decir, los emitidos durante el transporte y recogida del plástico, no se tienen en cuenta ya que son "aguas arriba" del desarrollo y no hacen parte del desarrollo de consumición del plástico. Esto significa que el cálculo comienza en el momento en que el plástico ingresa al patio de la fábrica.

#### **4.2.4.1 Factores Energéticos**

Al procesar 250kg de basuras plásticas, en el desarrollo de pirólisis se utilizan 60kg de hidrocarburo de parafina (cera de parafina) y 25kg de efluvio, de los que se obtienen 128kg de petróleo crudo de pirólisis de plástico, otros 15kg de parafina, otros 10kg de gas, 10kg de carbón.

y 2kg de H<sub>2</sub>O.

En la etapa de alambicamiento se tratan 128kg de aceite de residuos plásticos pirolizados obtenidos en la fase precedente, 11kg de hidruro de parafina obtenida en esta fase y se consumen 28kg de queroseno, 2kg de H<sub>2</sub>O y 20kg de combustible diésel y otros 3kg de parafina. Para los cálculos, se expresan e identifican los resultados de las siguientes formas:

1. El impacto de los gases efecto invernadero (huella de carbono) generado durante el procesamiento de petróleo líquido por pirólisis (el paso de pirólisis) se conoce como petróleo crudo de salida, dado que el petróleo crudo por pirólisis conlleva la huella de todo el proceso.

2. Hasta ahora, la superficie total de todo el proceso.

3. La huella total del proceso es la suma del queroseno y el combustible diésel producidos.

4. Se forman trazas adicionales al quemar los gases residuales en la primera fase.

Para calcular estas trazas se utiliza las siguientes composiciones típicas de gas y parafina:

**Tabla 10.**

*Composición del Gas de Pirólisis*

GAS DE PIROLISIS					
Composición aproximada del Gas			Aportes		
		%V/V	PM	C	H
<b>Metano</b>	CH <sub>4</sub>	12,2	16	9,15	3,05
<b>Etano</b>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11	30	8,8	2,2
<b>Eteno</b>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	21,1	28	18,09	3,01
<b>Propano</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12	44	9,82	2,18
<b>Propeno</b>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	21,2	42	18,17	3,03
<b>Butano</b>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	8,9	58	7,37	1,53
<b>Buteno</b>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	11,5	56	9,86	1,64
<b>Butadieno</b>	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	2	54	1,78	0,22
			<b>99,9</b>	<b>83</b>	<b>16,9</b>

*Nota.* Tomado y adaptado de: (Gao, 2010)

El gas como componente energético está compuesto de metano, etano, propano, propeno, butano, buteno y butadieno, conformando así el 100% del gas; de los anteriores componentes los

de mayores aportes son el propeno con un 21,2% y el eteno con un 21,1%.

#### 4.2.4.2 Composición de la parafina.

Como lo menciona Miranda et al. (2001), está compuesta por carbono "C" 85,05% e hidrógeno "H" 14,72% de la mezcla de cera con relación atómica C/H 2.076. La parafina producida por este proceso corresponde al material conocido como "cera".

**Tabla 11.**

*Materia prima y los resultantes de la pirólisis - Composiciones por elementos.*

Sample	Pyrolysis temperature (°C)	C	H	N	O <sup>a</sup>	S	Cl	H/C atomic ratio
HDPE	500	84.63	15.23	0.14	ND <sup>c</sup>	ND	ND	2.16
LDPE	500	84.93	14.18	0.08	ND	0.81	ND	2.00
PP	500	84.62	15.23	0.14	ND	0.01	ND	2.16
PS	500	91.63	8.31	0.06	ND	ND	ND	1.088
PVC	520	37.83	4.75	0.05	0.20	0.07	57.10	1.506
Wax <sub>HDPE</sub>	500	85.44	14.41	0.15	ND	ND	ND	2.19
Wax <sub>LDPE</sub>	500	85.33	14.63	0.02	ND	0.02	ND	2.057
Wax <sub>pp</sub>	500	84.94	14.88	0.16	ND	0.02	ND	2.102
Wax <sub>Mix</sub>	520	85.05	14.72	0.01	0.202	0.02	ND	2.076
SR <sup>d</sup> <sub>PVC</sub>	520	94.82	4.86	0.32	0.0	ND	ND	0.615
SR <sub>Mix</sub>	520	94.84	3.34	0.12	1.62 <sup>b</sup>	0.02	0.06	0.422

<sup>a</sup> Calculated by difference.

<sup>b</sup> Oxygen + ash.

<sup>c</sup> ND: not detected.

<sup>d</sup> SR: solid residue.

Tomado de: (Miranda, 2001)

En la Tabla 11 enseña la composición de los elementos de las materias primas posibles para la pirólisis en los que se encuentran los polietilenos que son los seleccionados para la simulación y la composición de los dos polietilenos baja y alta densidad son similares, así:

HDPE: C-84.63, H-15.23, N-0.14 y un H/C radio atómico de 2.16

LDPE: C-84.93, H-14.18, N-0.08 y un H/C radio atómico de 2.00

#### 4.2.4.3 Demás factores que intervienen en el gasto energético asociados en la producción

La huella de CO<sub>2</sub> de la electricidad en Colombia varía dependiendo de la mezcla hidro/térmico. Según Arboleda (2020) la huella de CO<sub>2</sub> de Colombia tiene los siguientes valores:

**Tabla 12.**

*Huella de CO<sub>2</sub> de Colombia*

Emisiones del año 2019 (ton CO <sub>2</sub> )	Producción total en 2019 (KWh)	FE (Factor de emisión) (ton CO <sub>2</sub> /MWh)	FE (Factor de emisión) (grCO <sub>2</sub> /kWh)
11'815.408,00	71'879.581.392,00	0,16	164,38

Tomado de: (Arboleda, 2020)

La Tabla 12, permite conocer la huella de CO<sub>2</sub> de Colombia, tipificada en kilowatts por hora, considerando que la consumición de electricidad igual a 0,48 kWh/gal, esto significa 78,9 gramos de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) equivalente por galón de ustible selecto originado. Esto corresponde a aproximadamente 1% de la valía debido a la consumición indispensable durante la pirólisis lo que corresponde a aprox. 7000 g/gal como se muestra en la siguiente tabla.

### 4.3 Análisis de viabilidad

#### 4.3.1 Viabilidad Técnica

Un espacio de limpieza del plástico antes de iniciar el proceso de picado, un espacio de secado y alistamiento de los plásticos y clasificación de estos a fin de reducir el esfuerzo innecesario del artefacto de pirolisis. Banda transportadora del particulado de basura plástica. Espacio de instalación de generadores, receptores o acumuladores de ustible que se desarrolla en esta fase. Una planta de procesamiento de la energía final.

##### 4.3.1.1 Costos de inversión - Tamaño del lote para ubicar la planta de distribución.

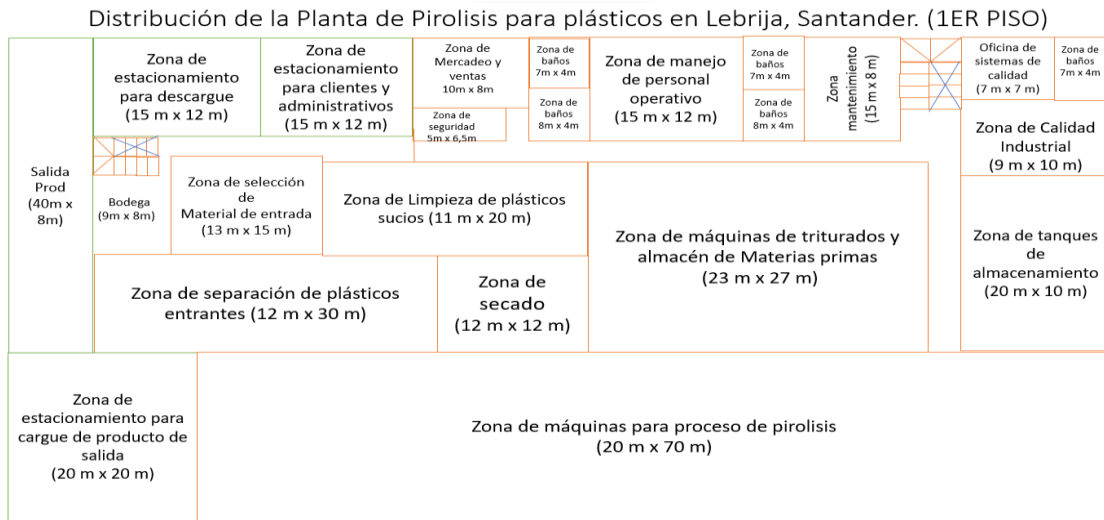
Considerando el tamaño de la planta de 1400 m<sup>2</sup> y todos los espacios o zonas anexas al proceso se define un lote de (60m x 90m) 5.400 m<sup>2</sup> como mínimo, se propone que la zona del municipio de Lebrija cuyo valor del metro cuadrado de tierra está definido en \$350.000 pesos lote sin urbanismo. Lo anterior define un costo total de compra del lote en un aproximado de \$1.890.000.000 millones de pesos. Sin construcción ni obras de urbanismo.

El valor del m<sup>2</sup> construido se define en \$180.000 pesos según lo estipulado por Camacol para obras básicas con acabados en ladrillo a la vista incluyendo techado y cimientos. Para los

baños se define un costo de acabados básicos en \$250.000 m<sup>2</sup> considerando acabados básicos incluyendo enchapes a media pared y piso. Además, el techo y tanques de agua para reserva.

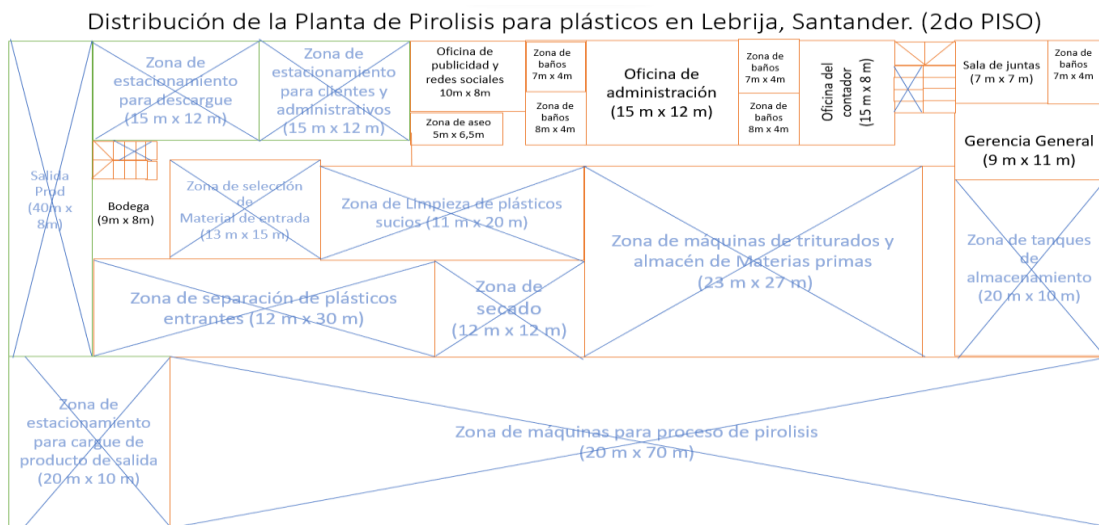
**Figura 7.**

*Distribución de la planta física primer piso*



**Figura 8.**

*Distribución de la planta física segundo piso*



Propuesta de diseño de la planta de pirolisis requerida para procesar 20 toneladas diarias de plásticos en el segundo piso.

4.3.1.2 Relación de maquinaria a instalar en la planta

Tabla 13.

Relación de maquinaria a instalar en la planta

MAQUINAS Y EQUIPOS UTILIZADOS PARA PIROLISIS		
DESCRIPCION	UNID	CANT
Reactor con capac. De 2,500 kg/h	UNID	1
Máquinas trituradoras.	UNID	2
Almacén de materias primas.	UNID	1
Secadores.	UNID	2
Cintas transportadoras.	UNID	4
Torres de destilación.	UNID	2
Condesadores.	UNID	2
Intercambiadores de calor.	UNID	1
Sistemas de bombeo.	UNID	1
Tanques de almacenamiento para los diferentes productos, agua y catalizador (en el caso de pirólisis catalítica).	UNID	4
Dispositivos contra incendios.	SIST.	1
Dispositivo de eliminación de polvo.	UNID	1
Chimenea para la salida de gases no recirculados.	UNID	1
Colector de desechos.	UNID	1
Sistemas de control.	SIST.	1
Oficinas.	UNID	15

Una vez establecidas las medidas del lote, la planta de distribución y los espacios requeridos se procede a revisar el listado de la maquinaria solicitada en la planta de tal forma que se pueda complementar el análisis financiero y se pueda concluir la viabilidad financiera.

Tabla 14.

Presupuesto para instalación de la planta física y su distribución.

2. PLANTA DE PROCESAMIENTO					
2.1.	Espacio para maquinaria propia del proceso de pirólisis es 1400 m2 según BLL-30 via lebrija	M <sup>2</sup>	1400	\$ 350.000,00	\$ 490.000.000,00
2.2.	Zona de manejo de personal operativo (8m*10 m)	M <sup>2</sup>	80	\$ 350.000,00	\$ 28.000.000,00
2.3.	Mesas de clasificación de plásticos (CONSTRUCCION RUSTICA EN CEMENTO ENCHAPADAS)	UN	10	\$ 250.000,00	\$ 2.500.000,00
2.4.	Tanques de almacenamiento para limpieza de plásticos.	M <sup>2</sup>	50,00	\$ 850.000,00	\$ 42.500.000,00
2.5.	Zona de instalación de generadores, receptores o acumuladores de la energía que se produce en este proceso (20m*20 m)	M <sup>2</sup>	400	\$ 350.000,00	\$ 140.000.000,00
2.6.	Instalación de Generadores, receptores o acumuladores	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.7.	Instalación de Reactor.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.8.	Instalación de Máquinas trituradoras.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.9.	Instalación de Almacén de materias primas.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.10.	Instalación de Secadores.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.11.	Instalación de Cintas transportadoras.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.12.	Instalación de Torres de destilación.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.13.	Instalación de Condesadores.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.14.	Instalación de Intercambiadores de calor.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.15.	Instalación de Sistemas de bombeo.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.16.	Instalación de Tanques de almacenamiento para los diferentes productos, agua y catalizador (en el caso de pirólisis catalítica).	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.17.	Instalación de Dispositivos contra incendios.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.18.	Instalación de Dispositivo de eliminación de polvo.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.19.	Instalación de Chimenea para la salida de gases no recirculados.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.20.	Instalación de Colector de desechos.	GI	1	5.500.000,00	\$ 5.500.000,00
2.21.	Zona de mantenimiento y manejo de personal operativo (15 m x 8 m)	M <sup>2</sup>	120	\$ 350.000,00	\$ 42.000.000,00
2.22.	construcción de zona de mantenimiento y herramientas (15m x12m)	M <sup>2</sup>	160	\$ 180.000,00	\$ 28.800.000,00
2.23.	Instalación de Sistemas de control.	GI	1	8.000.000,00	\$ 8.000.000,00

PRESUPUESTO DE INSTALACION					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANT	VR. UNIT	VR TOTAL
<b>1. PRELIMINARES.</b>					
1.1.	Zona de estacionamiento para el descargue de los plásticos que se van a procesar (10m*10 m)	M <sup>2</sup>	100	\$ 350.000,00	\$ 35.000.000,00
1.2.	Zona de almacenamiento del plástico entrante (10m*12 m)	M <sup>2</sup>	120	\$ 350.000,00	\$ 42.000.000,00
1.3.	Zona de separación de los plásticos entrantes según clasificación (20m*10 m)	M <sup>2</sup>	200	\$ 350.000,00	\$ 70.000.000,00
1.3.	Zona de limpieza del plástico antes de iniciar el proceso de picado (10m*15 m)	M <sup>2</sup>	150	\$ 350.000,00	\$ 52.500.000,00
1.4.	Zona de secado (8m*10 m)	M <sup>2</sup>	80	\$ 350.000,00	\$ 28.000.000,00
1.5.	Construcción de zona de almacenamiento del plástico entrante (10m*12 m)	M <sup>2</sup>	120	\$ 180.000,00	\$ 21.600.000,00
1.6.	Construcción de zona de separación de los plásticos entrantes según clasificación (20m*10 m)	M <sup>2</sup>	200	\$ 180.000,00	\$ 36.000.000,00
1.7.	Construcción de zona de limpieza del plástico antes de iniciar el proceso de picado (10m*15 m)	M <sup>2</sup>	150	\$ 180.000,00	\$ 27.000.000,00
1.8.	Construcción de zona de secado (18m*10 m)	M <sup>2</sup>	80	\$ 180.000,00	\$ 14.400.000,00
1.9.	Encierro terreno total de la planta (60m*90 m)	ml	300	\$ 120.500,00	\$ 36.150.000,00
					\$ 362.650.000,00

PRESUPUESTO DE INSTALACION					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANT	VR. UNIT	VR TOTAL
<b>3. ZONA ADMINISTRATIVA</b>					
3.1.	Zona de oficinas administrativas (10m*60 m)	M <sup>2</sup>	60	\$ 350.000,00	\$ 21.000.000,00
3.2.	Construcción de Zona de oficinas administrativas.	M <sup>2</sup>	100	\$ 180.000,00	\$ 18.000.000,00
3.3.	Zona de Gerencia (16m*10 m)	M <sup>2</sup>	160	\$ 350.000,00	\$ 56.000.000,00
3.4.	Construcción de Zona de Gerencia	M <sup>2</sup>	160	\$ 180.000,00	\$ 28.800.000,00
3.5.	Zona de Manejo de estándares de calidad en procesos industriales (9m*10 m)	M <sup>2</sup>	90	\$ 350.000,00	\$ 31.500.000,00
3.6.	Construcción de zona de Manejo de estándares de calidad en procesos industriales y sistemas de calidad	M <sup>2</sup>	160	\$ 180.000,00	\$ 28.800.000,00
3.7.	Zona para batería de baños (7 m x 4 m) con 3 sanitarios en cada baño y 3 lavamanos (total son 10 baterías)	M <sup>2</sup>	280	\$ 250.000,00	\$ 70.000.000,00
3.8.	Construcción de zona de Manejo de estándares de calidad en procesos industriales	M <sup>2</sup>	100	\$ 150.000,00	\$ 15.000.000,00
3.9.	Manejo de sistemas de calidad en procesos industriales (9m*10 m)	M <sup>2</sup>	100	\$ 180.000,00	\$ 18.000.000,00
3.10.	Construcción de 2 escaleras de acceso al segundo piso (10 m x 7 m)	M <sup>2</sup>	140	\$ 200.000,00	\$ 28.000.000,00
3.11.	Construcción placa segundo piso (60 m x 15 m)	M <sup>2</sup>	900	\$ 200.000,00	\$ 180.000.000,00
3.12.	Construcción de zona de Manejo de sistemas de calidad en procesos industriales (9m*10 m)	M <sup>2</sup>	100	\$ 150.000,00	\$ 15.000.000,00
					\$ 510.100.000,00
<b>4. SECTORES ADMINISTRATIVOS ANEXOS</b>					
4.1.	Zona de seguridad.	M <sup>2</sup>	100	\$ 350.000,00	\$ 35.000.000,00
4.2.	batería de cocina y aseo	M <sup>2</sup>	100	\$ 350.000,00	\$ 35.000.000,00
4.3.	Cámara de catalizado	UN	1	\$ 100.500.250,00	\$ 100.500.250,00
4.4.	Piscina de agua para el manejo de la salida de los gases contaminantes que reduce la contaminación	M <sup>2</sup>	100	\$ 350.000,00	\$ 35.000.000,00
					\$ 205.500.250,00
<b>5. ZONA DE ORGANIZACIÓN Y CLASIFICACION DE SUBPRODUCTOS, PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS E INDUSTRIALES</b>					
3.1.	Selección y clasificación de subproductos (13 m x 15m)	M <sup>2</sup>	195	\$ 180.000,00	\$ 35.100.000,00
3.2.	Selección y clasificación de productos complementarios (12 m x 15 m)	M <sup>2</sup>	180	\$ 180.000,00	\$ 32.400.000,00
3.3.	Selección y clasificación de productos para industrialización (12 m x 15 m)	M <sup>2</sup>	180	\$ 180.000,00	\$ 32.400.000,00
3.4.	Bodega de almacenamiento (9 m x 8 m) (1er y 2do piso)	M <sup>2</sup>	108	\$ 180.000,00	\$ 19.440.000,00
					\$ 119.340.000,00
<b>3. ZONA COMERCIAL Y DE MERCADEO</b>					
3.1.	Zona de servicio al cliente y posible manejo de clientes potenciales (10m x 8 m) 1er piso	M <sup>2</sup>	80	\$ 350.000,00	\$ 28.000.000,00
3.2.	Zona de manejo publicitario y de mercadeo (10m x 8 m) 2do piso	M <sup>2</sup>	80	\$ 350.000,00	\$ 28.000.000,00
3.3.	Zona de parqueo del personal administrativo, operario y de los nuevos clientes.	M <sup>2</sup>	100	\$ 350.000,00	\$ 35.000.000,00
					\$ 91.000.000,00
COSTOS DIRECTOS					\$ 2.152.890.250,00
COSTOS INDIRECTOS					\$ 114.561.711,83
COMPRA DE MAQUINARIA					\$ 1.085.500.000,00
					\$ 3.352.951.961,83
COSTOS DE IMPREVISTOS 5%					\$ 167.647.598,09
UTILIDADES 10%					\$ 335.295.196,18
IMPUESTOS POR OBRA 19%					\$ 63.706.087,27
PRESUPUESTO PUESTA EN MARCHA					\$ 3.919.600.843,38

Después de realizar los procesos de análisis y estudio detallado de la inversión requerida en cada uno de los aspectos financieros, es necesario realizar un resumen de todos ellos y llevarlos a un Presupuesto de instalación de la planta de pirólisis según los diseños de la distribución presentada anteriormente. Este presupuesto permite visualizar la viabilidad financiera del proyecto y los importes finales de la puesta en funcionamiento de este.

**4.3.1.3 Planta de pirólisis para el tratamiento de residuos plásticos**

**Figura 9.**

*Planta de pirólisis para el tratamiento de residuos plásticos*



Tomado de: (Henan Mingjie Environmental Equipment Co., Ltd, 2023)

**4.3.2 Viabilidad Social**

Una planta de pirólisis no es viable en las inmediaciones del área metropolitana pues el terreno debe ser tan grande que garantice espacios suficientes para el manejo de gases y sus productos posteriormente se puedan comercializar; además se generan aproximadamente 71 empleos beneficiando a la población aledaña.

**4.3.3 Viabilidad Económica**

**Tabla 15.**

*Costo operacional*

PERSONAL	COSTO OPERACIONAL			
	CANT	VR UND	VR MENSUAL	VR PRESTACIONAL
GERENTE	1,00	\$ 3.901.818,00	3.901.818,00	7.803.636,00
SUB GERENTE	1,00	\$ 2.601.212,00	2.601.212,00	5.202.424,00
SECRETARIA DE GERENCIA	1,00	\$ 1.300.606,00	1.300.606,00	2.601.212,00
ADMINISTRACION Y CONTABILIDAD	10,00	\$ 1.300.606,00	13.006.060,00	26.012.120,00
MERCADEO Y PUBLICIDAD	5,00	\$ 1.300.606,00	6.503.030,00	13.006.060,00
ASESORES COMERCIALES	5,00	\$ 1.300.606,00	6.503.030,00	13.006.060,00
PERSONAL OPERATIVOS	25,00	\$ 1.300.606,00	32.515.150,00	65.030.300,00
PERSONAL DE ASEO	5,00	\$ 1.300.606,00	6.503.030,00	13.006.060,00
CONDUCTORES	5,00	\$ 1.300.606,00	6.503.030,00	13.006.060,00
OPERATIVOS DE CARGA Y DESCARGA	10,00	\$ 1.300.606,00	13.006.060,00	26.012.120,00
SEGURIDAD	3,00	\$ 1.950.909,00	5.852.727,00	11.705.454,00
TOTAL			98.195.753,00	196.391.506,00

Si se observa los diferentes espacios diseñados en la planta además de los procesos, se debe hacer una relación del talento humano requerido para que el proyecto sea viable. Esta relación permite conocer los costos de personal requerido para colocar en marcha la planta de pirolisis según el diseño de distribución para el tope diario de 20 toneladas de plástico a transformar y lograr que la viabilidad financiera sea una realidad.

**Tabla 16.***Costos de capacidad instalada*

INVERSION INICIAL	CAPACIDAD INSTALADA			
	UNIDAD	CANT	VR UND	VR MENSUAL
LOTE (60M X 90M)	M <sup>2</sup>	5,400	\$ 350,000,00	1.890.000.000,00
CONSTRUCCION	M <sup>2</sup>	5.690,00	\$ 180.000,00	1.024.200.000,00
INVERSION DIARIA DE MATERIA PRIMA	TON/DIA	1,00	\$ 337.226.340,16	337.226.340,16
VR NOMINA	MES	1,00	\$ 98.195.753,00	98.195.753,00
VR PRESTACIONES POR MES	MES	1,00	\$ 16.365.958,83	16.365.958,83
INVERSION EN MAQUINARIA	GL	1,00	\$ 1.520.000.000,00	1.520.000.000,00
MUEBLES Y ENSERES	OFICINA	35,00	\$ 2.500.000,00	87.500.000,00
IMPLEMENTOS DE ASEO	MES	5,00	\$ 130.000,00	650.000,00
CAMIONES DE RECOLECCION	UND	5,00	\$ 155.100.606,00	775.503.030,00
CONSTRUCCION TANQUES DE ALMAC.	M <sup>2</sup>	150,00	\$ 850.000,00	127.500.000,00
CONSTRUCCION PISCINA PARA LAVADO	M <sup>2</sup>	360,00	\$ 850.000,00	306.000.000,00
SISTEMA DE SEGURIDAD	GL	1,00	\$ 50.000.000,00	50.000.000,00
TOTAL				6.233.141.081,99

Resumiendo, finalmente toda la información recolectada, se puede obtener la relación de capacidad instalada requerida para conocer la inversión total de la puesta en funcionamiento de esta investigación. Este cuadro muestra que la capacidad instalada se refleja en 6.233'141.081,99 millones de pesos.

Lo anterior deja ver que el proyecto es viable económicamente para una empresa con proyección jurídica que maneje una sociedad financiera o inversora con capital.

**Tabla 17.***Evaluación financiera del proyecto*

POSIBLES PRODUCTOS PARA VENTA	VENTA ESTIMADA				
	UNIDAD	CANT/DIA	CANT/MES	VR /UND	VR/ MENSUAL
ENERGIA	TON	20	600	\$ 438.394.242,21	263.036.545.324,80
ACEITE DE PIROLISIS	LT	12.000,00	360.000,00	\$ 5.000,00	1.800.000.000,00
GASOIL O BIODISEL	LT	15.000,00	450.000,00	\$ 10.000,00	4.500.000.000,00
COQUE	KG	1.500,00	45.000,00	\$ 7.200,00	324.000.000,00
TOTAL					269.660.545.324,80

Para definir si el proyecto es viable económicamente se hace necesario conocer los productos finales y el precio promedio de venta, además de las cantidades que salen de dicha transformación diaria.





#### **4.3.3.1 Evaluación Económica**

La capacidad instalada de la industria se refiere a la asignación de un área y su capacidad para hacer la producción por lo cual necesita unas condiciones mínimas. En segunda instancia se evalúa la capacidad de producción mensual que se extrae del proceso. Luego, se realiza el costo de la optimización y descontaminación del proceso ambiental que se genere de la pirolisis, que se estima en la maquinaria que se debe comprar para manejar niveles ambientales apropiados y que garantice que no se va a generar más contaminación.

#### **4.3.4 Viabilidad Ambiental**

##### **4.3.4.1 Evaluación de Impactos y Efectos Ambientales**

La característica principal de este proceso de reciclaje de cuarta generación o cuaternario es precisamente la dificultad que se tiene con el tratamiento de la contaminación del medio ambiente ya que la pirólisis genera un proceso de contaminación del aire por la combustión que resulta del proceso de quema de los plásticos. Aun cuando los plásticos que se pueden procesar en este tipo de propuestas son de todo tipo, y que requiere una capacidad mínima de material reciclado que abastezca el proceso y los costos de este, es decir, que el total del residuo sólido plástico producido en el AMB sea el suficiente para pensar en la instalación de una planta de pirólisis compacta que sea capaz de procesar los plásticos sin aire. Para este proceso de pirólisis se va a necesitar además una máquina de triturado del plástico con el fin de reducir el tiempo y el esfuerzo de la pirólisis y así tener menor contaminación.

### **Conclusiones**

Los plásticos desechados en el AMB, dentro de su clasificación, determinan al polietileno, como el de mayor cantidad, ya que este se clasifica en baja densidad y alta densidad según el plan de gestión de residuos sólidos.

Dentro del análisis de las tecnologías y su comparación se concluyó que la pirólisis es la tecnología que menor impacto ambiental de acuerdo a los parámetros seleccionados (seguridad, operación, costo y ambiental), por tales razones, la pirólisis se selecciona para el proceso de simulación.

Concluimos que la pirólisis genera beneficios económicos, financieros, sociales y ambientales positivos, permitiendo la recuperación de la inversión inicial aunque esta sea muy alta en un tiempo corto, evidenciándose en el estudio de viabilidad económica.

Se realizó la combinación de las dos tecnologías pirólisis y gasificación con el fin de mejorar el rendimiento del proceso y disminuir el impacto ambiental.

### **Recomendaciones**

Se recomienda aplicar un diseño básico ya con el soporte de viabilidad de la investigación donde se consideren los impactos que no se tuvieron en cuenta como la logística de recolección de los residuos, logística de transporte y el impacto ambiental que ocasionará el mismo.

### Referencias bibliográficas

- Acoplásticos. (mayo de 2023). *Precios de reciclaje*. Obtenido de PLAS-TIC Tecnologías e información para la economía circular: [https://www.plas-tic.org/precios\\_de\\_reciclaje](https://www.plas-tic.org/precios_de_reciclaje)
- Afanador, J., Bonilla, I., Kafarov, V., León-Esteban, A., & Carreño, L. (2022). Transformación de residuos plásticos en energía, soluciones tecnológicas basadas en criterios de sostenibilidad para ciudades de tamaño mediano en América Latina, considerando la pandemia de COVID-19. *CET. INGENIERÍA QUÍMICA ACTAS. VOL. 94.*, 7.
- Albis Pérez, I. (2019). Solo se aprovecha el 2% de los residuos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. *Vanguardia Liberal*, <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/solo-se-aprovecha-el-2-de-los-residuos-generados-en-el-area-metropolitana-de-bucaramanga-EJ1083060>.
- ALCALDE ENCARGADO DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA. (06 de junio de 2023). *DECRETO 0070 del 06 de junio de 2023*. Obtenido de <https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2023/06/DECRETO-0070-SITUACION-CALAMIDAD-PUBLICA-EN-EL-MUNICIPIO-DE-BUCARAMANGA.pdf>
- Arandes Esteban, J., Bilbao Elorriaga, J., & López Valerio, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 3.
- Arandes, J. B. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Ibero-americana de Polímeros*, 5, 28-45.
- Arboleda, M. N. (06 de febrero de 2020). *En Colombia Factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado: 164.38 gramos de CO2 por kilovatio hora*. Obtenido de XM: <https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision->

de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-

interconectado?identificador=2383#:~:text=En%20Colombia%20Factor%20de%20emisi  
%C3%B3n,de%20CO2%20por%20kilovatio%20hora&text=%C2%B7%20%E2%80%8  
BEI%20nue

Barraza, C. (2018). *Manual para la Presentación de Referencias Bibliográficas de* . Obtenido de  
[http://www.utemvirtual.cl/manual\\_referencias.pdf](http://www.utemvirtual.cl/manual_referencias.pdf)

Calderón Sáenz, F. (29 de noviembre de 2021). *CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN  
LA PRODUCCIÓN DE PLASTICOMBUSTIBLES*. Obtenido de Calderón Laboratorios  
Ltda.:

[http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Calculo%20de%20la%20Huella%20de%  
20Carbono%20en%20la%20Produccion%20de%20Plasticcombustibles.pdf](http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Calculo%20de%20la%20Huella%20de%20Carbono%20en%20la%20Produccion%20de%20Plasticcombustibles.pdf)

Concejo Municipal de Bucaramanga. (02 de marzo de 2021). *PROYECTO DE ACUERDO N°  
010 DE 2020. “POR MEDIO DEL CUAL SE ESTABLECEN MEDIDAS PARA  
RESTRINGIR LA ADQUISICIÓN Y UTILIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS DE UN SÓLO  
EN LAS ENTIDADES PÚBLICAS DEL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA Y SE  
DICTAN MEDIDAS PARA PROMOVER PRÁCTICAS AMBIE*. Obtenido de Concejo  
Municipal de Bucaramanga:

[https://www.concejodebucaramanga.gov.co/proyectos2021/PROYECTO\\_DE\\_ACUERD  
O\\_010.pdf](https://www.concejodebucaramanga.gov.co/proyectos2021/PROYECTO_DE_ACUERDO_010.pdf)

DESCONT S.A.S. E.S.P. (2023). *DESCONT S.A.S. E.S.P. Gestión Integral de Residuos*.  
Obtenido de <https://www.descont.com.co/inicio>

Ecoplas. (2020). *Recuperación Energética*. Obtenido de Reciclado de Plásticos:  
<https://ecoplas.org.ar/reciclado-de-plasticos-3/>

- Elgegren, M., Tiravanti, G., Ortiz, B., Otero, M., Wagner, F., Cerrón, D., & Nakamatsu, J. (2012). Reciclaje químico de desechos plásticos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 78(2), 105-119.
- Flores Arévalo, P. (2021). La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia de la covid-19. *South Sustainability*, 1(2), e016. DOI: 10.21142/SS-0102-2020-016, 9.
- Franco Antolinez, L., Meza Joya, M., & Almeira, J. (28 de 12 de 2018). *Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión)*. Obtenido de Avances Investigación En Ingeniería, 15(1), 180–193.: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4735>
- Gao, F. (2010). *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels; A thesis Submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical and Process Engineering*. Canterbury: University of Canterbury.
- Garyfalou, D. K. (s. f.). *Project Number: 6598\_CA\_01 Version - 3.2*. London: Carbon Action Consultants Limited, 16 St Martin's Le Grand, London EC1A 4EN. File # .
- Guerrero Dávila, G. (2015). *Metodología de la investigación*. . México D.F.: Editorial Patria.
- Henan Mingjie Environmental Equipment Co., Ltd. (2023). *Planta de pirólisis*. Obtenido de [https://www.mingjiigroup.com/products/Fully\\_continuous\\_plastic\\_pyrolysis\\_plant.html](https://www.mingjiigroup.com/products/Fully_continuous_plastic_pyrolysis_plant.html)
- HOEKSTRA, A. (16 de febrero de 2020). *La producción de gasolina y diésel emite más CO2 de lo que pensábamos*. Obtenido de SOSTENIBILIDAD: [https://innovationorigins.com/en/producing-gasoline-and-diesel-emits-more-co2-than-we-thought/#:~:text=The%20end%20result%20was%20that,around%2010.3%20gram%20CO2eq%2FMJ.&text=\(That%27s%2063%20kg%20of%20CO2,barrel%20delivered%20to](https://innovationorigins.com/en/producing-gasoline-and-diesel-emits-more-co2-than-we-thought/#:~:text=The%20end%20result%20was%20that,around%2010.3%20gram%20CO2eq%2FMJ.&text=(That%27s%2063%20kg%20of%20CO2,barrel%20delivered%20to)

%20a%20refinery).

Junquera Díaz, I. (2010). *Gasificación de residuos plásticos para la producción de electricidad en régimen especial, Proyecto Fin de Carrera*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.

La Trinchera - Reciclados. (30 de abril de 2019). *Tipos de reciclaje y en qué consisten*. Obtenido de <https://recicladoslatrinchera.com/tipos-de-reciclaje-y-en-que-consisten/>

Lahoz, E. (03 de mayo de 2022). *CONTAMINACIÓN. Islas de plástico: impacto en el planeta y soluciones*. Obtenido de DKV: <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/islas-de-plastico#:~:text=Algunas%20de%20las%20consecuencias%20de,entrando%20en%20la%20cadena%20tr%C3%B3fica>.

Pinochet, P. (03 de septiembre de 2013). *DIFERENCIA ENTRE INCINERACIÓN, GASIFICACIÓN Y PIRÓLISIS*. Obtenido de PLATAFORMA TECNOLÓGICA: <https://pinochetmorales.wordpress.com/2013/09/03/diferencia-entre-incineracion-gasificacion-y-pirolisis/>

Rajmohan, K., Ramya, C., Viswanathan, M., & Varjani, S. (2019). Contaminantes plásticos: gestión eficaz de residuos para el control y la reducción de la contaminación. *Opinión actual en ciencias ambientales y salud*, 12, 72, 84.

Saadat, S., Rawtani, D., & Hussain, C. (2020). Environmental perspective of COVID-19. *Science of the Total Environment*, 728: 138870.

SANDESOL S.A E.S.P. (2023). *SANDESOL S.A E.S.P.* Obtenido de <https://www.sandesol.co/>

## Apéndices

### Apéndice A. Caracterización de plásticos

De manera general se le denomina residuos a cualquier sustancia u objeto desechado por su usuario o que deba eliminarse, los residuos pueden ser preconsumo o posconsumo. Sus características son diferentes, así como el material obtenido, el material recuperado o reciclado es material que se originó a partir de residuos, pero que ha perdido esta condición. Una de las propiedades más destacables de las basuras plásticas es su vida útil. Los tiempos de degradación varían según el tipo de residuo que se procesa, las dimensiones de los residuos y los procesos de descomposición involucrados. Los componentes de descomposición pueden ser de naturaleza biológica, oxidativa u oxidación foto química, de otros varios. El plástico suele tomar un tiempo de 100 años en descomponerse. Algunos de ellos demoran de 500 a 1.000 años, pero la descomposición puede detenerse en condiciones como el entierro. (Ojeda, 2019).

Las basuras plásticas simbolizan el 12% de basuras municipales. Si no se trata adecuadamente, perseguirá intoxicando la biosfera durante mucho tiempo dependiendo del tiempo de descomposición (Kaza, Yao, Bhada-Tata, & Van Woerden, 2018). En el hoy, los plásticos son fundamentales en diversidad de productos, ya sea en envases, contenedores, dispositivos, desechables en áreas de alimentos, salud, aseo, hogar, productos eléctricos, automotores, textil y confecciones y cualquier otro tipo. Los residuos plásticos más comunes incluyen residuos de un solo uso, como envases para agua potable y detergentes, así como vajilla desechable como vasos, cubiertos y pajitas; otro artículo útil es una bolsa. La lista de productos plásticos es interminable. La clasificación de los plásticos se basa en la clasificación del código de identificación de plásticos creado por la Asociación de la Industria del Plástico en 1988 (DKV, 2021).

**Figura 1.**

*Código de identificación el plástico*



Tomado de: (HLP Klearfold, 2023)

**Tabla 1**

*Clasificación internacional de los residuos plásticos*

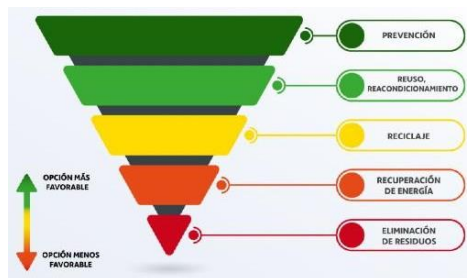
Sigla	Nombre	Código de reciclaje	Usos y aplicaciones
<b>PET</b>	Tereftalato de Polietileno o Politereftalato de Etilenglicol	1	Envases para alimentos (bebidas, aceite).
<b>PEAD/HDPE</b>	PE de alta densidad	2	Envases para aseo. Mucosas impermeabilizantes.
<b>PVC</b>	Cloruro de Polivinilo	3	Tuberías en general.
<b>PEBD/LDPE</b>	PE de baja densidad	4	Talegas, divisiones, guantes.
<b>PP</b>	Polímero del Propileno	5	Tapón de envases.
<b>PS</b>	Poliestireno-Cristal Plástico.	6	Vajillas, Material Aislante.
-	Otros	7	Policarbonato (PC), nylon, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), entre otros.

*Nota.* Tomado de: (Recytrans, 2013)

De manera similar, las prioridades en la administración de basuras establecen una jerarquía, a menudo representada en estructura piramidal.

**Figura 2.**

*Estructura piramidal de la administración de basuras*



*Nota.* Tomado de: (SOSTENIBILIDAD para todos, s. f.)

Entre estas alternativas, la incineración plantea problemáticas ambientales ya que afecta la biosfera y la sanidad del ser humano (Tangri, 2005). Esto depende del consumo de los hogares; en primer lugar, comenzamos separando los residuos por tipos: Orgánico (constituye la mayoría de los residuos), biodegradable, reciclable (vidrio, tela, papel, metal, cartón), plástico (Sistema de empaques y demás productos plásticos), productos sanitarios (incluido papel higiénico, toallas sanitarias, pañales, productos sanitarios, envases de desodorantes) y productos biocontaminados (guantes, mascarillas, equipos médicos, instrumentos quirúrgicos, materiales quirúrgicos); En este último caso, se considera una nueva alternativa a los remedios caseros y por ello debe colocarse en envases de otro color (rojo) para un procedimiento especial por parte de empresas especializadas.

**Tabla 2.**

*Características de los plásticos*

	<b>PET</b>	<b>PEAD/HDPE</b>	<b>PEBD/LDPE</b>	<b>PVC</b>	<b>PP</b>	<b>PS</b>
<b>Fase en STP</b>	<b>sólido</b>		<b>sólido</b>	<b>sólido</b>	<b>sólido</b>	<b>sólido</b>
<b>Densidad</b>	1350 kg/m <sup>3</sup>		950 kg/m <sup>3</sup>	1330 kg/m <sup>3</sup>	900 kg/m <sup>3</sup>	1050 kg/m <sup>3</sup>
<b>Resistencia a la tracción</b>	150 MPa		30 MPa	48 MPa	27 MPa	48 MPa
<b>Límite de elasticidad</b>	40 MPa		20 MPa	N / A	N / A	N / A
<b>Módulo de Young</b>	9 GPa		1 GPa	3,4 GPa	1,3 GPa	3,4 GPa
<b>Dureza Brinell</b>	20 BHN		40 BHN	35 BHN	50 BHN	50 BHN
<b>Punto de fusión</b>	267° C		317° C	177° C	337° C	217° C
<b>Conductividad térmica</b>	0,3 W/mK		0,5 W/mK	0,2 W/mK	0,2 W/mK	0,12 W/mK
<b>Capacidad calorífica</b>	1250 J/g K		1550 J/g K	880 J/g K	1700 J/g K	1100 J/g K
<b>Carbono</b>	62%		85%	42%	86%	92%
<b>Hidrogeno</b>	4%		15%	5%	14%	8%
<b>Oxigeno</b>	33%		0%	0%	0%	0%
<b>Cloro</b>	0%		0%	53%	0%	0%
<b>Fórmula Química</b>	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>		(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl/H <sub>2</sub> C=CHCl	(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	(C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>

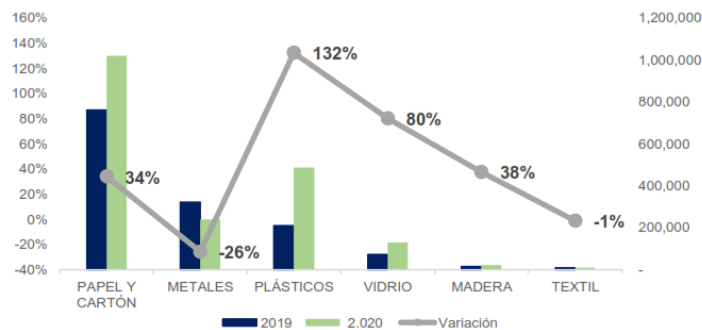
*Nota:* Información tomada de: Colaboradores de Material Properties (PET – Tabla de materiales

– Aplicaciones – Precio, 2023), (Polietileno – Tabla de materiales – Aplicaciones – Precio, 2023), (Policloruro de vinilo-co-acetato de vinilo, 2023), (Polipropileno, 2023), (Poliestireno – Tabla de materiales – Aplicaciones – Precio, 2023)

En 2020, 561 recolectores en 27 territorios de todo el país aprovecharon un total de 1.903.269 toneladas. La ciudad capital de Bogotá se muestra al mismo nivel que otros departamentos, ya que el informe de tonelaje de la ciudad representa el 72% del total.

### Figura 3.

*Variación año 2019 – 2020 por tipo de material.*



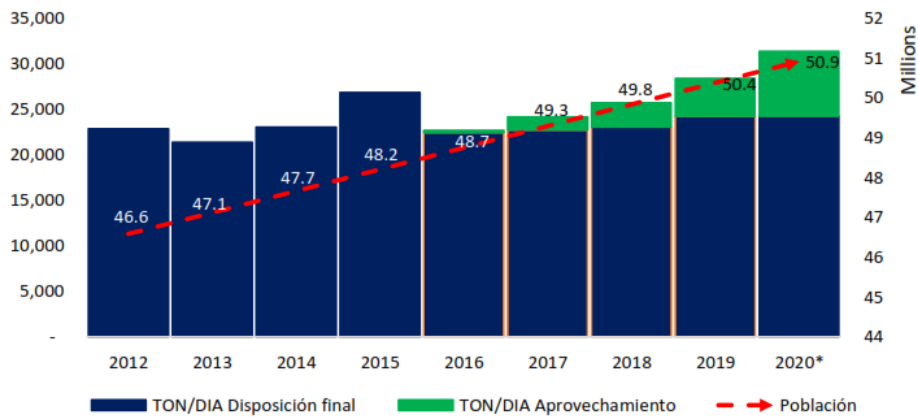
*Nota.* Tomado de: (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022).

Observando la investigación mostrada en el Sistema Integrado de Información (SUI) de 2019 a 2020, se notan las siguientes diferencias en las tendencias del mercado de año a año: Cambiar los hábitos de consumo y mejorar la oferta de actividades.

La Figura 3 muestra que el grupo de productos plásticos está aumentando con una variación del 132%. El volumen medio reportado en 2019 fue de 209.415 toneladas y el volumen promedio reportado en 2020 fue de 486.231 toneladas (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022).

### Figura 4.

*Estadísticas de Basuras Servibles y No Servibles en el ámbito nacional.*



Nota. Tomado de: (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022).

Basado en el reporte del sitio final dispuesto (toneladas/día) para el periodo 2012 a 2019, se compara el volumen histórico de basuras del sitio final dispuesto con el volumen nacional de residuos sólidos, cuyo uso comienza a disminuir en 2016. Se destacan las tendencias. El análisis incluye: El DANE predijo la dinámica poblacional para cada año y mostró la relación entre el crecimiento poblacional y la dinámica de las basuras sólidas.

La tabla siguiente permite observar las muestras de tasas del lucro del servicio de aseo en 18 ciudades que simbolizan el 80% del tonelaje informado en SUI para el 2020.

**Tabla 3.**

*Tasa del lucro del servicio de aseo para 2020.*

Ciudades	Promedio Ton/día Lucro 2020	Promedio Ton/día Sitio Final Dispuesto 2019	Tasa de Lucro
Barrancabermeja	22,1	149,8	13%
Barranquilla	180,2	1.517,1	11%
Bello	48,8	299,8	14%
Bogotá	3.731,4	6.952,5	35%
<b>Bucaramanga</b>	<b>20,1</b>	<b>561,7</b>	<b>3%</b>
Cali	134,0	2.212,2	6%
Chía	21,9	101,1	18%
Duitama	25,5	80,6	24%
Ibagué	21,0	431,4	5%
Medellín	163,7	1.838,0	8%
Montería	32,3	294,2	10%

Mosquera	20,2	102,3	16%
Rionegro	22,8	120,4	16%
Soacha	89,3	423,1	17%
Sogamoso	36,6	77,5	32%
Soledad	22,7	452,8	5%
Villavicencio	97,0	382,3	20%
Yopal	25,7	129,0	17%

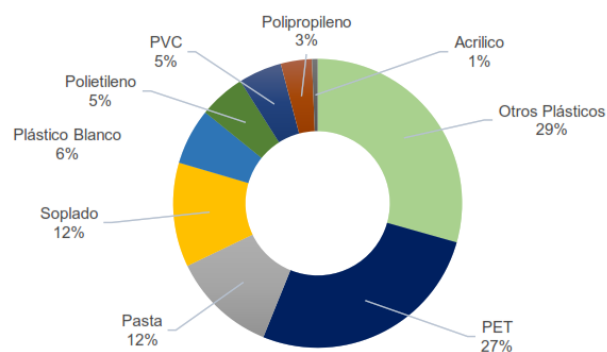
*Nota.* Tomado de: (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022)

Se puede evidenciar que Bucaramanga es la ciudad con menor tasa de aprovechamiento de los residuos sólidos reportados por SUI.

Según un informe sobre el tonelaje de plásticos realmente utilizados en Colombia, según la clasificación, el mayor contribuyente son los demás plásticos con un 29%, continuo del Politereftalato de Etilenglicol – PET en un 27%, de los materiales pastosos en un 12% y aquellos obtenidos por soplado también en un 12%, el material quinto es el plástico moldeado por inyección con un 6%, seguido del cloruro de polivinilo – PVC en un 5% y polietileno – PE en una proporción de 5%, Polímero del Propileno con un 3% y por último Acrilonitrilo Butadieno Estireno - ABS, conformando un total del 1% de los tipos de plástico en el 2020.

### Figura 5.

*Reporte Toneladas efectivamente aprovechadas de Plásticos en Colombia.*



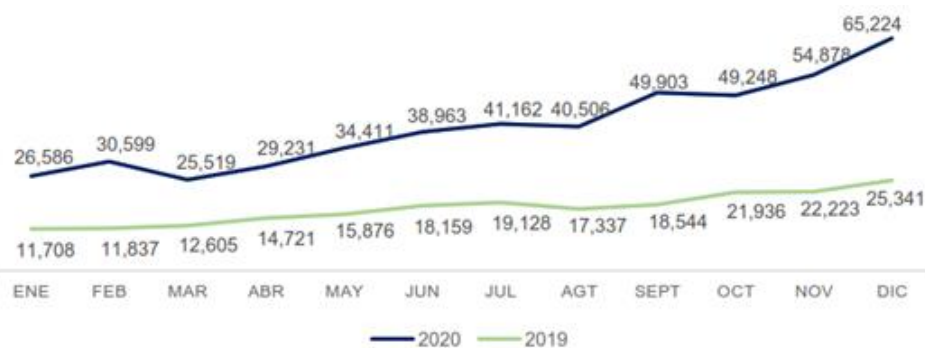
*Nota.* Tomado de: (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022).

En la siguiente figura se observa un alto acrecentamiento de 275.815 toneladas de enero a diciembre de 2020 en el informe para diversos materiales del grupo de los plásticos. El mayor

acrecentamiento en el tonelaje promedio se registró a finales del primer semestre de 2020. Como se puede observar en el mes de julio reportándose un aumento de 22,034 toneladas, en agosto 23,169 toneladas, en septiembre 31,359 toneladas, en octubre 27,312 toneladas, en noviembre 32,655 toneladas y finalmente en diciembre 39.883 toneladas.

**Figura 6.**

*Toneladas generadas 2019-2020 familia del plástico.*



*Nota.* Tomado de: (Superintendencia de Servicios Públicos, 2022).

A pesar de sus decepcionantes estadísticas, es Girón el que más ha presentado mejoras en este sentido. En la AMB, el 2% de las basuras que se producen se les saca beneficios. Teniendo en cuenta los datos recabados por la Superintendencia de Servicios Públicos y el Observatorio Urbano de Bucaramanga, el índice de utilización del tratamiento de residuos sólidos es muy bajo, sólo el 2% es la media general. En el 2017 la tasa de beneficio en Bucaramanga fue el 1,61% de las basuras sólidas y en el 2018 de 2,05%; en Floridablanca oscila entre 0,55% y 0,89%; en Girón el rango está entre 0,30% y 2%. y en Piedecuesta es de 0,24%-3%. (Albis Pérez, 2019).

### Referencias bibliográficas

- Albis Pérez, I. (2019). Solo se aprovecha el 2% de los residuos generados en el área metropolitana de Bucaramanga. *Vanguardia Liberal*, <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/solo-se-aprovecha-el-2-de-los-residuos-generados-en-el-area-metropolitana-de-bucaramanga-EJ1083060>.
- Colaboradores de Material Properties. (2023). *Polipropileno*. Obtenido de <https://material-properties.org/es/polipropileno/>
- Colaboradores de Material Properties. (2023). *PET – Tabla de materiales – Aplicaciones – Precio*. Obtenido de <https://material-properties.org/es/pet-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/>
- Colaboradores de Material Properties. (2023). *Policloruro de vinilo-co-acetato de vinilo*. Obtenido de <https://material-properties.org/es/policloruro-de-vinilo-co-acetato-de-vinilo/>
- Colaboradores de Material Properties. (2023). *Poliestireno – Tabla de materiales – Aplicaciones – Precio*. Obtenido de <https://material-properties.org/es/poliestireno-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/>
- Colaboradores de Material Properties. (2023). *Polietileno – Tabla de materiales – Aplicaciones – Precio*. Obtenido de [https://material-properties.org/es/pe-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/#google\\_vignette](https://material-properties.org/es/pe-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/#google_vignette)
- DANE. (22 de Marzo de 2023). *Proyecciones y retroproyecciones de población municipal para el periodo 1985-2019 y 2020-2035 con base en el CNPV 2018*. Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

- DKV. (29 de junio de 2021). *Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje*. Obtenido de MEDIOAMBIENTE: <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje#:~:text=As%C3%AD%2C%20el%201%20se%20corresponde,con%20mezclas%20de%20otros%20pl%C3%A1sticos.>
- HLP Klearfold. (17 de FEBRERO de 2023). *Guía de reciclaje de plásticos*. Obtenido de <https://hlpklearfold.es/guia-de-reciclaje-de-plasticos/>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC. Banco Mundial*. Obtenido de Open Knowledge Repository Beta: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Ojeda, J. P. (10 de septiembre de 2019). *Generación de residuos de plástico: la importancia de la prevención*. Obtenido de Plataforma de información para políticas públicas de la Universidad Nacional de Cuyo: <http://www.politicaspUBLICAS.uncu.edu.ar/articulos/index/generacion-de-residuos-de-plastico-la-importancia-de-la-prevencion>
- Recytrans. (23 de julio de 2013). *CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS*. Obtenido de <https://www.recytrans.com/blog/clasificacion-de-los-plasticos/>
- SOSTENIBILIDAD para todos. (s. f.). *ECONOMÍA CIRCULAR EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS: PLANTAS WASTE TO ENERGY*. Obtenido de SOSTENIBILIDAD para todos: [https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/economia-circular-gestion-residuos-plantas-waste-energy/?\\_adin=02021864894](https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/economia-circular-gestion-residuos-plantas-waste-energy/?_adin=02021864894)
- Superintendencia de Servicios Públicos. (20 de septiembre de 2022). *Informe Sectorial de*

*Aprovechamiento* 2020. Obtenido de

<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-Aprovechamiento-2020-v2.pdf>

Tangri, N. (septiembre de 2005). *Incineración de residuos: una tecnología muriendo*. Obtenido de Ciudad Quezón: Alianza Global para Alternativas a la Incineración y Alianza Global Anti-Incineración.:

[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/BEED4EBCBF98D22E05257D690071A2E9/\\$FILE/IncineracionResiduosTecnolog%C3%ADaMuriendo.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BEED4EBCBF98D22E05257D690071A2E9/$FILE/IncineracionResiduosTecnolog%C3%ADaMuriendo.pdf)

## **Apéndice B. Simulación de la Tecnología de reciclaje energético**

### **1. Tecnologías de reciclaje energético**

A continuación, se presenta un estudio de semejanzas de los procesos de incineración, gasificación y pirólisis; que dejan ver sus características con respecto al tratamiento de plásticos, sus ventajas y desventajas.

El proceso de recuperación de energía se puede clasificar en:

**Combustión:** La incineración directa o discontinua es el procedimiento de recuperación de energía más básico y antiguo. Se define como unas reacciones químicas que liberan calor en el que una sustancia se oxida completamente a altas temperaturas y la mayor parte se convierte en gas. Actualmente, la pérdida térmica de los contaminantes orgánicos (CO) contenidos en las basuras, especialmente los compuestos de dioxinas y furanos, se puede conseguir mediante combustión en hornos de lecho fluido, gracias a técnicas de incineración controlada sin zonas de enfriamiento, esta tecnología consiste en regular la combustión de energía a una temperatura de 850°C o superior (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX. Ministerio de Transporte y Agenda Urbana. Gobierno de España., 2013).

**Pirólisis:** Consiste en la desintegración por calor en abandono de oxígeno de sustancias orgánicas, conocida también como ignición en abandono de aire. El tipo y composición del producto final depende de las características de las basuras a procesar, las situaciones de maniobra y el lapso de residencia del elemento en el reactor. Los conceptos principales de la pirólisis se pueden fraccionar en dos grupos principales. Una es que la parte gaseosa de la pirólisis se utiliza como combustible, aportando calor al proceso, y la otra es que parte de la energía se obtiene del proceso de ignición de la pirólisis como parte de la pirólisis de carga útil. Concebido originalmente como una forma de obtener productos utilizables, un sistema de recuperación de

materias primas que pueden utilizarse en síntesis orgánica en reciclaje químico. Sistemas como la pirólisis son teóricos en su principio de funcionamiento y producen menos gas que la combustión convencional, los cuales requieren una altísima homogeneidad física y química de los residuos a la entrada del proceso. No se recomienda la pirólisis porque la energía requerida para las reacciones químicas endotérmicas hace que el proceso sea una compensación económica negativa. Además, el producto resultante era de mala calidad y distaba mucho de las especificaciones comerciales. (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX. Ministerio de Transporte y Agenda Urbana. Gobierno de España., 2013). Este es un proceso que existe desde hace mucho tiempo, y la generación de energía a partir de la pirólisis de residuos municipales se desarrolló en Japón en la década de 1980. En España, se ha demostrado que este proceso forma compuestos térmicamente más estables a temperaturas más altas. De manera similar, en Ecuador, experimentos realizados con polietileno de alta densidad produjeron diésel, queroseno y gasolina en fracciones líquidas (Mancheno et al., 2016). Actualmente hay siete plantas de pirólisis relativamente pequeñas operando en los Estados Unidos, algunas todavía en la fase piloto, y la tecnología se está implementando en todo el mundo con plantas en Europa, China, Indonesia y Filipinas. El American Chemistry Council considera que Estados Unidos podría sostener 600 plantas de pirólisis procesando hasta 30 toneladas de plástico por día, para un total de aproximadamente 6,5 millones de unidades por año (según los desechos plásticos producidos en el país, una quinta parte de los 34,5 millones de toneladas producidas hoy). La pirólisis puede incluir películas, bolsas y muchos otros materiales plásticos que la mayoría de los recicladores mecánicos no pueden procesar, dijo Priyanka Bakaya, fundadora de Renewology. Aparte de "una cantidad mínima de dióxido de carbono", no se producen contaminantes nocivos. Por otro lado, los críticos dicen que la pirólisis es una conjunto de

técnicas costosas e inmaduras y, a lo largo de los años, muchas nuevas empresas no han logrado alcanzar los límites de prevención de la contaminación y no han logrado cumplir con objetivos técnicos, tecnológicos o financieros. Producir diésel desde ustibles fósiles es más barato que hacerlo a partir de basuras plásticas (Royte, 2019).

Gasificación: Un proceso que arde sin oxígeno y produce CO y CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH en correlaciones variables dependiendo de la estructura del elemento transformado inicial, la rugosidad y las circunstancias del procedimiento. Este procedimiento se puede utilizar para generar electricidad (CEDEX Centro de Estudios y Experimentaciones de Obras Públicas, Ministerio de Transportes y Agenda Urbana, Gobierno de España, 2013). Este procedimiento origina sintegás, que se utiliza para impulsar turbinas. Sin embargo, los bajos precios del gas fósil hacen que las factorías de gasificación no sean concurrentes.

Dado que el plástico está hecho de hidrocarburos, que son más densos en energía que el carbón, parece prudente quemar residuos plásticos para generar energía. Sin embargo, existen muchas dificultades que impiden ampliar la incineración de residuos. En primer lugar, es difícil decidir dónde ubicar las instalaciones de cineración de basuras, como los vertederos. Nadie quiere vivir cerca de una fábrica a la que llegan cada día diez veces diez de furgones de basura. Además, las factorías de incineración de basuras son muy caras de construir y operar y a menudo, son más caras que los vertederos cuando se depositan grandes cantidades de residuos. A medida las fábricas se vuelven más eficientes debido al flujo constante de desechos, los propietarios de las fábricas a menudo se ven obligados a importar materias primas de lugares distantes. Estas centrales eléctricas generan suficiente electricidad para alimentar a miles de viviendas. Sin embargo, las investigaciones han demostrado que el reciclaje se plásticos economizar más energía que chamuscar plásticos que generan residuos (al reducir la necesidad

de extraer combustibles fósiles y procesarlos para obtener nuevos plásticos). Por último, las instalaciones de incineración de residuos pueden emitir pequeñas cantidades de contaminantes tóxicos como dioxinas, gases ácidos y metales pesados. Las factorías actuales utilizan depuradores, separadores y filtros refinados para sujetar los compuestos, pero como advirtió el Consejo Mundial de Energía en un informe de 2017, “los incineradores siempre que funcionen correctamente y se controlen las emisiones, estas tecnologías pueden ser muy beneficiosas” (Royte, 2019).

Entre estas alternativas, la incineración plantea problemas ecológicos ya que afecta el ecosistema y la salud humana (Tangri, 2005). Esto comienza con la separación de los residuos según su tipo y depende del consumo del hogar de residuos orgánicos (que constituyen la mayoría de los residuos), biodegradables, reciclables (papel, metal, cartón, tela), plásticos (sistemas de empaques y productos varios), productos sanitarios (incluido papel higiénico, toallas sanitarias, pañales, productos sanitarios, envases de desodorantes) y productos biocontaminados (guantes, mascarillas, equipos médicos, instrumentos quirúrgicos, materiales quirúrgicos); En este último caso, se considera una nueva alternativa a los remedios caseros y por ello debe colocarse en envases de otro color (rojo) para un tratamiento especial por parte de empresas especializadas.

### **1.1 Incineración**

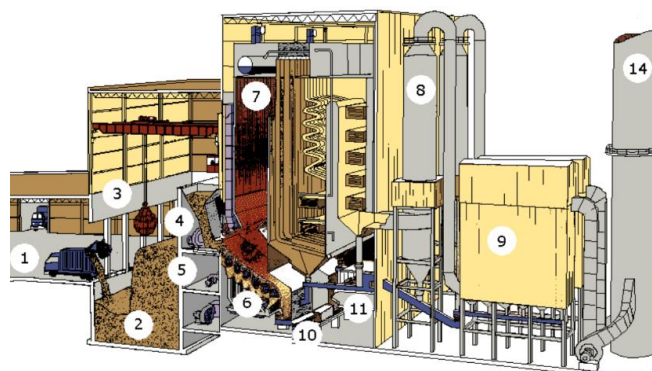
Es una técnica de procesamiento de basuras que reduce las magnitudes y peso de los residuos y cambia su estructura. Las basuras se oxidan a calores altos. Las altas temperaturas hacen que las estructuras de las basuras reaccionen con el oxígeno del aire, convirtiéndolo en dióxido de carbono y H<sub>2</sub>O, obteniendo energía calórica y/o electricidad. Sin embargo, las plantas de incineración también producen emisiones atmosféricas altamente tóxicas, incluidos metales

pesados tóxicos, dioxinas y furanos. Pueden provocar enfermedades respiratorias, endocrinas, neurológicas, reproductivas e incluso diversos tipos de cáncer. Además, la combustión libera nanopartículas (contaminantes orgánicos persistentes) que penetran en los tejidos humanos y llegan al torrente sanguíneo y los pulmones (Soto, 2020). Además, este tipo de gestión de residuos y su conversión en energía no consigue este objetivo. El proceso también produce cenizas tóxicas, que representan entre el 25 y el 30% del número total de basuras incineradas enviados a los sumideros a cielo abierto. Puede contaminar el suelo y el agua y ser inhalado por los humanos. Esta ceniza suele acumularse en zonas donde se están produciendo daños ambientales y muchas veces llega a zonas donde viven las personas más vulnerables, creando situaciones de inequidad y racismo ambiental (Garelli, 2020).

La quema de plástico genera fácilmente un exceso de calor, que también puede servir como fuente de energía para hogares y comunidades. La incineración también puede reducir el número de basuras (en volumen) entre un 90% y un 99%, dependiendo del contenido de polímero (Cardenal Miró, 2020).

### **Figura 1.**

#### *Isometría de una Planta de Incineración*





Fuente: (Gordon Peña & Pineda Gutiérrez, 2003)

1. El camión recolector ingresa al puesto de control y pesa en la estación.
2. El camión recolector se descargará directamente al contenedor de basura.
3. Una grúa recoge los residuos y los transporta al depósito de alimentación.
4. El tanque de alimentación contiene el suministro de desechos terminados para su entrega al sistema de rejillas.
5. El alimentador fuerza los residuos sólidos hacia el rodillo superior del rodillo de reja.
6. La rotación constante del juego de rodillos y la distribución uniforme de las partículas de suciedad a lo largo de la pendiente descendente de la reja de rodillos garantizan una combustión completa. La velocidad de los rodillos, la cantidad de aire suministrado durante la combustión y la velocidad de alimentación se controlan para mantener las condiciones óptimas del horno.
7. Después de quemar los residuos sólidos en los rodillos, la ceniza cae del último rodillo y se apaga con agua en la cubeta.
8. Una cinta transportadora transporta las cenizas hasta las zonas de recuperación de materiales ferrosos y otros (opcional) y almacenamiento de cenizas. Las cenizas se retiran con un cargador frontal, se cargan en un camión y se transportan a un edificio anexo.
9. La información de la red se monitorea y controla cómodamente en un centro de comando.
10. El calor generado por la combustión de residuos en la caldera produce vapor.
11. Aproximadamente el 10 por ciento de la energía producida por un turbogenerador se

utiliza para operar la planta y el resto se vende.

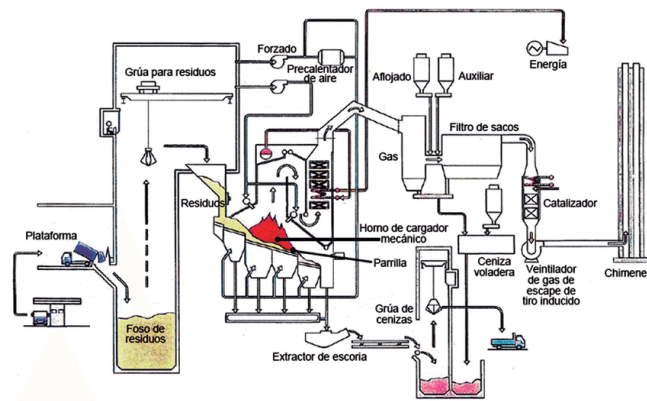
12. Los gases de combustión se envían a un dispositivo de limpieza para eliminar los gases ácidos.

13. Luego, el gas continúa fluyendo a través del sistema de recolección de partículas.

14. Luego, el gas limpio se libera a la atmósfera a través de una torre de enfriamiento. Si es necesario, se pueden integrar en el sistema subsistemas adicionales para la recuperación de materiales y la reducción de contaminantes.

### Figura 2.

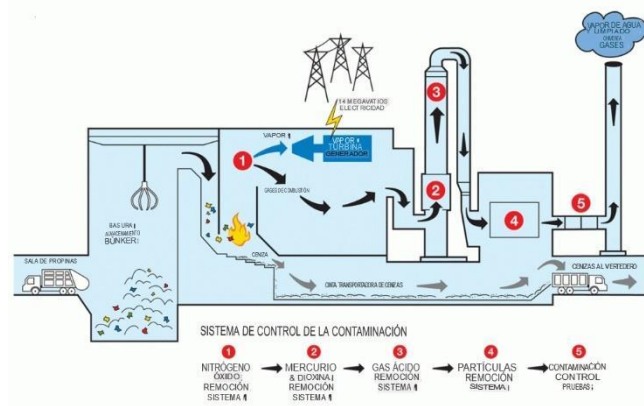
#### *Corte de una Planta de Incineración de Plásticos*



Fuente: (Rúa-Orozco, y otros, 2015)

### Figura 3.

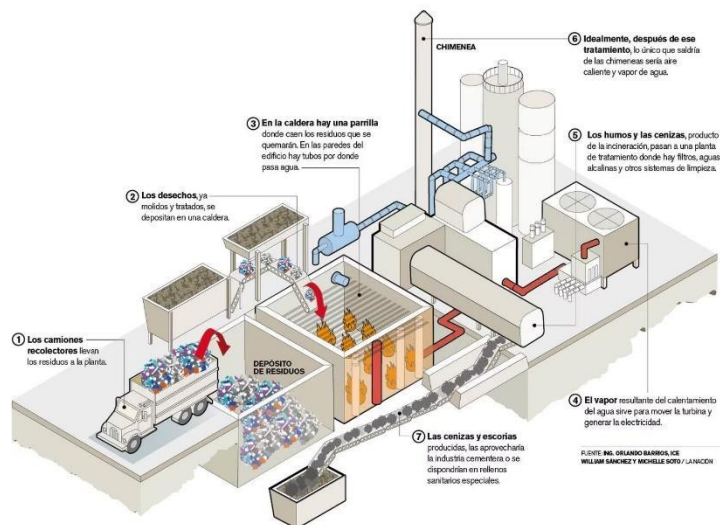
#### *Etapas del Proceso de Incineración*



Fuente: (Globally Aktualno, 2018)

Figura 4.

*Proyección de la Planta de Incineración*



Fuente: (Soto M. , 2013)

Tabla 1.

*Etapas de la Incineración*

PRE TRATAMIENTO	ALIMENTACIÓN	INCINERACIÓN	ACONDICIONAMIENTO DE LOS GASES	TRATAMIENTO DE LOS GASES
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Molienda</li> <li>•Secado</li> <li>•Compostaje</li> <li>•Embolsado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Manual</li> <li>•Correa de rodillos</li> <li>•Correa rodante</li> <li>•Puente rodante con cuatro gajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cámaras múltiples</li> <li>•Aire controlado</li> <li>•Horno rotativo</li> <li>•Parrillas móviles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Enfriamiento con agua</li> <li>•Mezcla con agua</li> <li>•Intercambiador de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Precipitador electrostático</li> <li>•Filtros de manga</li> <li>•Lavadores</li> </ul>

*Nota:* Tomado de: (MANUAL DE GESTION INTEGRAL - RESIDUOS SOLIDOS URBANOS - CAPITULO V - TRATAMIENTO - Parte 4 - Incineración, s. f.)

Las instalaciones de tratamiento térmico de residuos sólidos domésticos incluyen (reciclame, 2024):

Descarga la plataforma. El pozo muere. Pozo de residuos. Grúa de puente. La transición está ocurriendo. Tanque de alimentación. Parrilla ardiente. cámara de combustión. Cenicero. Ventilador principal. Ventilador secundario. Caldera de recuperación. amortiguador. Economizador. Condensador de aire. Cenicero. Una cadena interminable de cenizas. Alambre de escoria. Cinta transportadora de cenizas. Filtro eléctrico. Circuito sin fin de descarga de cenizas para filtros eléctricos. ventilador. Descarga de chimenea.

Los camiones recolectores transportan las basuras a las concavidades de acopio. El aforo de acopio es de aproximadamente 2 días. Un puente grúa transporta las basuras a la línea de ingestión de la caldera, donde se colocan sobre la parrilla y se calcinan. La corriente de ignición se suministra desde abajo de la parrilla (aire primario) y desde arriba del horno (aire secundario). La corriente debe mezclarse perfectamente con los residuos y los resultados gaseosos liberados por la evaporación. No obstante, la ventilación igualmente reduce el calor. En el interior del horno, los restos caen encima de una rejilla levemente inclinada que se mueve a velocidad constante (hacia delante y hacia atrás). Estos movimientos hacen que el material vuelque y se quemé por completo, provocando que la escoria caiga al suelo. En el horno los residuos transitan por varias etapas:

– **Desecación:** Los residuos ingresan al horno, se calientan mediante aire calentado previamente, emitido por los muros de la caldera y gases de ignición. Descarta la humedad con temperaturas de 50°C a 100°C.

– Sublimación: La desintegración por calor de los elementos orgánicos de los residuos produce sustancias volátiles, que constituyen entre el 70% y el 90% de las basuras sólidas municipales. Para darse la sublimación se origina en una franja de calor (200°C a 750 °C, pero la liberación primordial se provoca entre 425°C y 550 °C).

– Ignición de sustancias inestables: Las sustancias inestables se calcinan seguidamente, porque el calor de la caldera se encuentra entre 750°C-1000 °C, que es mucho más alta que la temperatura de ignición de las sustancias volátiles en los desechos. Curiosamente, para una combustión completa del gas en la caldera, la temperatura debe ser alta, debe haber un exceso de aire para crear turbulencias y el tiempo medio de residencia del gas en el generador debe ser con un tiempo entre 2s a 4s.

– Ignición de residuos carbonosos sólidos: después del secado y evaporación, el residuo original todavía contiene carbono y más materiales inertes. El material de carbón (o carbón sólido) continúa ardiendo en la parrilla y se quema por completo en 30 a 60 minutos. - ceniza:

– La ceniza del fondo contiene partes quemadas y no quemadas. Se acopian y colocan en sumideros.

– Las escorias volantes son los polvos más livianos y se transportan por medio del procedimiento de la mano de los vapores de ignición. Logran impregnarse contaminantes (uniones orgánicas, metales, etc.) considerándose desechos tóxicos, por tanto, se acopian en depositos cerrados para su eliminación en un lugar aceptable. Durante este proceso, el enfriamiento del gas se realiza independientemente del uso de calor en el manejo de las instalaciones de tratamiento térmico, cabe destacar que cuentan con fuentes disponibles de electricidad y vapor de agua que pueden ser aprovechadas en la industria y los hogares, especialmente como, por ejemplo. sistemas de calefacción.

El gas limpio del horno de tratamiento térmico se enfría y luego se somete a un proceso de depuración para eliminar partículas y otros contaminantes atmosféricos. Los restantes gases "no contaminantes" se emiten a la atmósfera.

## **1.2 Gasificación**

Durante el procesamiento de gasificación, la bioenergía y/o los residuos convertidos en combustible sólido recuperado (CSR) se convierten en hidrocarburos más livianos como el CO y el H<sub>2</sub>. Cuando se utiliza aire como medio de gasificación, el poder calorífico neto (NCV) de esta mezcla de gases, denominada gas sintético o "gas de síntesis", es una sexta parte del valor del gas natural. Un gasificador es un gas o mezcla de gases que proporciona calor y oxígeno para iniciar una reacción. La gasificación es un concepto de proceso (proceso Fischer-Tropsch) que permite la síntesis de combustibles líquidos de alta calidad.

Un método alternativo para generar electricidad a partir de residuos sólidos es la gasificación. La gasificación implica exponer los desechos sólidos a altas temperaturas en una atmósfera deficiente en oxígeno para convertir el material en un gas combustible llamado gas producto o gas de síntesis. Aunque la tecnología de gasificación existe desde hace mucho tiempo, en las últimas décadas se ha reavivado el interés por su desarrollo (Mart, 2015).

La gasificación, por otro lado, requiere menos inversión en el proceso de purificación del gas, ya que produce cantidades mucho menores y emite menos óxidos de nitrógeno, partículas, dioxinas, furanos y gases no quemados (Mart, 2015).

Los procesos de gasificación sólo pueden producir productos gaseosos. En este proceso, la carga de insumos principal está en forma de carbono, se forman otros materiales debido a la presencia de gases reactivos y la mayor parte del carbono está contenido en la materia prima principal. Las cosas están ahí primero. Se convierte en una mix de gases formada por metano e

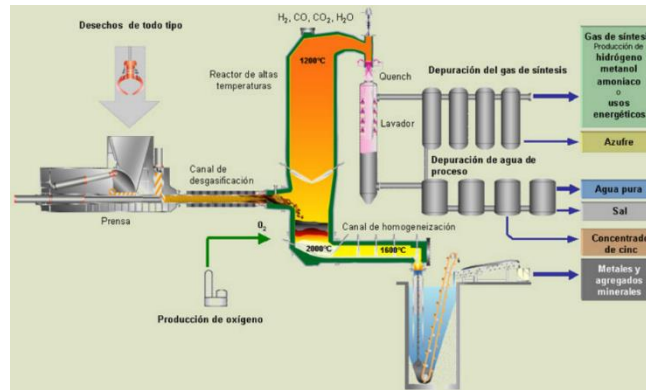
impurezas y restos inertes. Este gas es estimado un sintegás y tiene una amplia gama de aplicaciones en el sector de la industria, pero su desarrollo de producción es operativamente muy complejo, imposibilitando su realización a gran escala. Tenga en cuenta que estos métodos de tratamiento térmico y recuperación de residuos sólidos están destinados a ser utilizados como una ayuda de gestión general y no como un objetivo final. Antes de pasar a los biocombustibles, se deben acelerar los esfuerzos de recuperación de materiales reciclables, además de que el vidrio y los metales son componentes indeseables en este tipo de conversión.

La eficiencia del proceso de gasificación varía según la tecnología, el combustible y el carburador utilizado y oscila entre el 70% y el 80%. La energía restante suministrada al ustible se utiliza para reacciones endotérmicas, pérdida de calor del reactor, enfriamiento del gas de síntesis necesario para el secado del sintegás (eliminación de vapor) y filtración. Además de sustituir los combustibles ligeros de fuentes fósiles, la gasificación con BM/CSR permite alcanzar una alta eficiencia eléctrica, lo que supone un problema muy complicado para la concepción de vapor mediante combustión directa y también será posible la consecutiva dilatación del vapor en las turbinas del generador. Con la gasificación, se puede lograr un aumento de potencia de hasta un 30-32% para un generador alimentado con gas de síntesis, mientras que el valor de potencia para un ciclo Rankine convencional simple es de alrededor del 22%. La gasificación del combustible gastado se produce en varios reactores. El tipo de gasificación determina la velocidad de reacción, el rendimiento, la composición del producto y la formación de impurezas (Elias, 2005; Good et al., 2005; Knoef, 2005).

### **1.2.1 Proceso Industrial de Gasificación**

#### **Figura 5.**

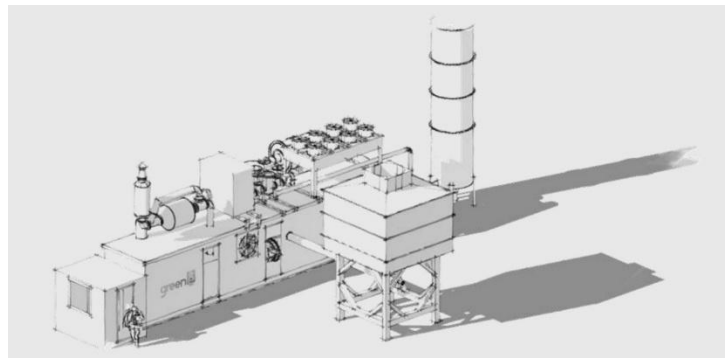
*Proceso industrial de Gasificación*



Tomado de: (Ferreira Pozo, Aprovechamiento térmico de los residuos de envase plásticos, 2009)

**Figura 6.**

*Proyección Planta de Gasificación de Plásticos*



Fuente: (dimasa grupo, s. f.)

**Figura 7.**

*Gasificación en reactor giratorio*



Fuente: (dimasa grupo, s. f.)

Procesa todo tipo de residuos orgánicos

Capacidad de procesamiento de residuos ricos en cenizas

Alto rendimiento eléctrico

Alta calidad y durabilidad

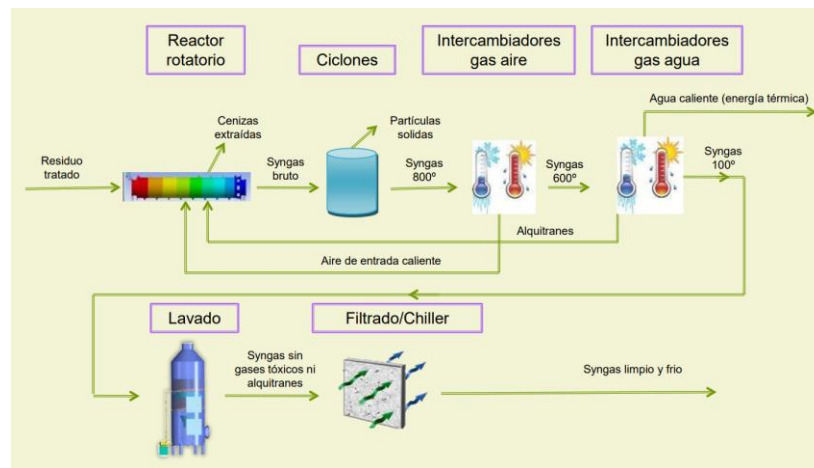
Sistema avanzado de eliminación de alquitrán

Control diferencial de seis zonas del reactor

Analizador de gases en continuo

### Figura 8.

*Gasificador GreenE*



Fuente: (dimasa grupo, s. f.)

Ventajas de la gasificación:

*Tratamiento de residuos:*

Eliminación de prácticamente todos los residuos entrantes

- La ceniza resultante es inerte
- Cantidad mínima
- Fácil de reciclar o eliminar. Potencial de recuperación de metales pesados

Reducción de emisiones de gases

- 40% CO<sub>2</sub> y 100% CH<sub>4</sub>

- Mayor eficiencia de filtrado: evitación de emisiones de gases tóxicos
- SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> (promotores de la lluvia ácida)
- Dioxinas y furanos (carcinógenos)

*Para generación de energía Alta eficiencia energética y rentabilidad*

- Menores costos por kW producido Combustible abundante
- Sin dependencia extranjera
- Puede usarse en áreas remotas

### **1.3 Pirólisis**

La pirólisis es el proceso de descomposición térmica con exclusión de O<sub>2</sub> entre temperaturas de 400 °C y 1000 °C para producir fracciones utilizables de gas, líquido y sólido. La pirólisis es un método que logra diferentes resultados dependiendo de las condiciones de trabajo. Esta es una gran ventaja, ya que se puede personalizar para satisfacer las necesidades de diferentes industrias y diferentes tipos de programas. En la pirólisis convencional, la bioenergía se convierte en tres resultados diferentes. La presentación líquida se conoce como betún o bioaceite, la presentación sólida también se conoce como carbón o carbón vegetal y la presentación gaseosa se puede utilizar como gas combustible. Estos productos tienen un alto valor comercial y se utilizan ampliamente en la industria.

La pirólisis de plásticos implica calentar a altas temperaturas en una atmósfera inerte (generalmente nitrógeno) para producir un producto que contiene algo de líquido, gas y sólidos.

La primera idea de la pirólisis plástica estaba relacionada con la extracción de monómeros básicos de plásticos pirolizados, con la idea del reciclaje de plástico. Empero, la pirólisis ahora se considera una forma interesante de agregar valor a los plásticos de diversas maneras para productos químicamente importantes y sus aplicaciones.

Los polímeros procesados se pueden convertir en compuestos base para la industria química y otras industrias. Las condiciones de pirólisis tienen un impacto significativo en la compra de diversos productos. Son de particular importancia las materias primas utilizadas, el tipo de reactor de pirólisis, el tiempo de residencia y la temperatura (Cozzani, 1997). La influencia de las circunstancias de pirólisis sobre el beneficio y la constitución del producto es más pronunciada en la pirólisis de plásticos que en la pirólisis de otros materiales, como es el caso de la bioenergía vegetal. Los resultados producidos por pirólisis plástica se pueden acomodar en una variedad de unidades.

Los elementos obtenidos por pirólisis de plásticos se encuentran junto con las porciones del petróleo. En la totalidad de las situaciones, los plásticos deben tratarse previamente para obtener una fracción de producto adecuada para su inclusión en la corriente de destilado de una compañía petrolera. Al aplicar esta tecnología, resulta muy interesante la posibilidad de utilizar porciones de pirólisis de plásticos en refinerías. No obstante, debido al alto costo del transporte de desechos plásticos, la economía depende en gran medida de que las áreas vecinas recojan los desechos plásticos para la refinería.

Considerando las dificultades asociadas al uso de productos de degradación en procesos químicos, la recuperación de energía térmica es otra opción atrayente en el tratamiento de residuos plásticos. Al reciclar plásticos para obtener energía, la energía contenida en los plásticos se recupera mediante combustión directa o indirecta. Por tanto, utilice productos de pirólisis o pregasificación.

El contenido de gas de la pirólisis plástica está fuertemente afectado por las situaciones del proceso. Se forma a partir de hidrocarburos con características ligeras (C1-C5) que se forman cuando se descomponen los productos primarios de descomposición del plástico. Los principales

gases formados son los alquenos y los hidrocarburos gaseosos más comunes son el etileno y el propileno (Williams, 2006). La validez de otros gases, como el  $H_2$  y el  $CH_4$ , también es importante para aumentar la temperatura, ya que son productos de aromatización y pirólisis obtenidos de reacciones de pirólisis secundaria y terciaria. La parte líquida de la pirólisis plástica suele estar formada por hidrocarburos alifáticos de alto peso molecular (C8-C30), su peso molecular medio y su partición.

La pirólisis es el procedimiento de desintegración térmica a temperaturas entre  $400^{\circ}C$  y  $1000^{\circ}C$  en ausencia de  $O_2$  para producir porciones en los tres estados de la materia utilizables (gaseosas, líquidas y sólidas). Este es un procedimiento que existe desde hace mucho tiempo, la generación de energía a partir de la pirólisis de residuos municipales se desarrolló en Japón en la década de 1980. En España, se ha demostrado que este proceso forma compuestos térmicamente más estables a temperaturas más altas. De manera similar, en Ecuador, experimentos realizados con polietileno de alta densidad produjeron diésel, queroseno y gasolina en fracciones líquidas (Mancheno et al., 2016).

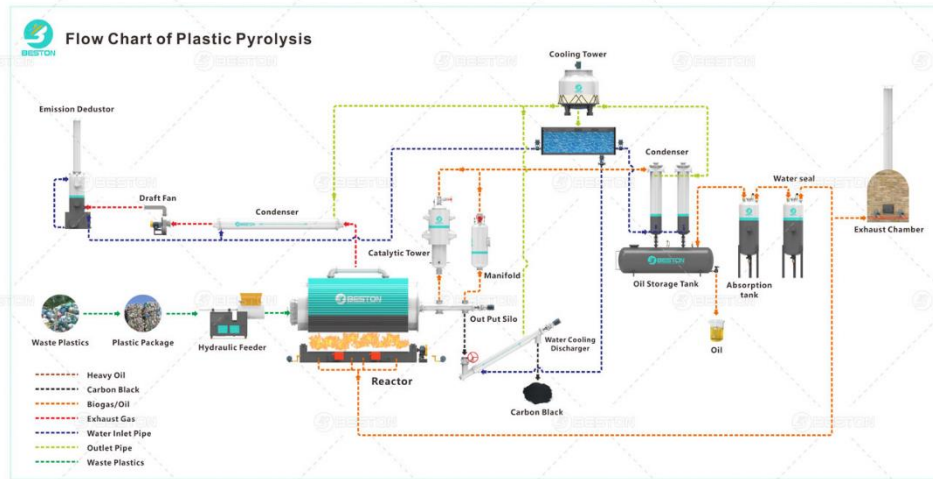
La Pirólisis es un procedimiento que accede lograr diferentes productos dependiendo de las situaciones de trabajo. Este es un gran beneficio, ya que se puede personalizar para satisfacer las necesidades de diferentes industrias y diferentes tipos de programas. En la pirólisis convencional, la bioenergía se convierte en tres productos diferentes:

Un resultado líquido distinguido como asfalto o bioaceite, un resultado sólido también distinguido como carbón o carbón vegetal y un resultado gaseoso que puede usarse como gas combustible. Tienen un gran valor comercial y son muy utilizados en la industria. No obstante, se debe tener cuidado con la formación de subproductos indeseables. Aunque actualmente no existe una gran base instalada, todavía hay margen para la innovación en este ámbito.

1.3.1 Proceso Industrial de la pirólisis

Figura 9.

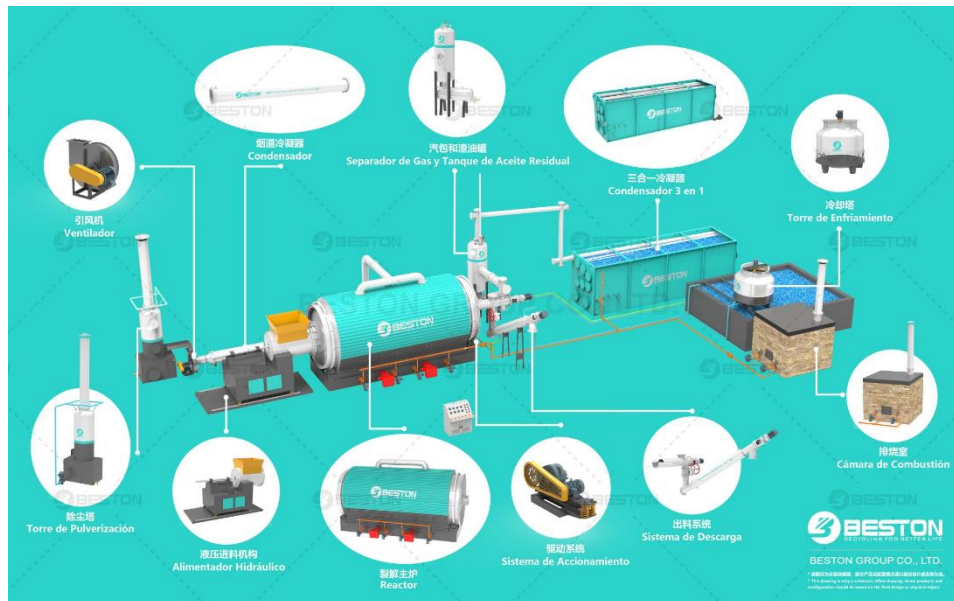
Corte Proceso Industrial de Pirólisis



Fuente: (Beston Group Co., Ltd., 2024)

Figura 10.

Proyección Proceso Industrial de Pirólisis



Fuente: (BESTON GROUP CO.,LTD., 2024)

**Tabla 2.***Parámetros Técnicos de la Planta de Pirólisis*

Model		BLJ-10
Potencia		8-10t/d
Proceso de Trabajo		Discontinuo
Tamaño del Reactor		φ2200*6000mm
Material del Reactor		Q345R
Sistema de manipulación		400 reductor+5.5kw motor de accionamiento
Terreno (L*A*A)		30m*13m*8m
Potencia		44.3kw
Quemador		2*300,000 kcal
Peso Total de los Materiales Enviados		Alrededor de 28t
Número de Contenedores		1*40FR+2*40HQ
Ruido (dB)		≤60
Materiales de Calefacción		
Sistema de Condensación	Condensador Vertical	φ630*3600 Área de condensación de una sola pieza 17.8m <sup>2</sup>
	Condensador 3 en 1	5800*2260*2500 Área de condensación 35.85m <sup>2</sup>

*Nota:* Tomado de: (BESTON GROUP CO.,LTD., 2024)

La planta de pirólisis de basuras plásticas consta de 13 partes: reactor, equipo de accionamiento, cámara de catalizador vertical, condensador vertical, filtro de agua y aceite, condensador horizontal, tanque de aceite pesado, aceite ligero, dispositivo de protección contra incendios trasero, sistema de vacío. estado. Recogida de polvo, ventiladores, chimeneas. El reactor es uno de los componentes más significativos. Los materiales y técnicas utilizados para la soldadura de reactores tienen un impacto directo en la seguridad y la longevidad. Para garantizar la calidad del reactor, utilizamos una máquina de soldadura automática. Las soldaduras se someten a inspección por rayos X y procedimiento térmico. El condensador de enfriamiento está enfriado por agua y el tubo de enfriamiento interno está hecho de un tubo de acero sin costura de 48 mm de diámetro. Para lograr la temperatura óptima del gas licuado, el área del intercambiador de calor es de aproximadamente 13 metros cuadrados y el área total del intercambiador de calor es de 40 metros cuadrados (Henan Doing Maquinaria S.L, 2014).

Las principales características de la planta de pirólisis de basuras plásticas:

Seguridad (Henan Doing Maquinaria S.L, 2014):

1. El reactor utiliza soldadura automática para garantizar la calidad de la soldadura y evitar grietas.
2. Cámara profesional de tratamiento térmico de soldadura y detección de rayos X
3. Sistema de vacío para evitar que el petróleo y el gas regresen al reactor y provoquen accidentes.
4. Equipado con indicador de temperatura, manómetro y válvula de seguridad.

Nature Friendly (Henan Doing Maquinaria S.L, 2014):

1. Sistema de eliminación de polvo para evitar la generación de gases y polvo durante la combustión del carbón.
2. Los gases de escape se devuelven al reactor calentado sin contaminar el gas.
3. Todas las piezas de la conexión están herméticamente selladas para evitar fugas de aire y olores.

Ampliación de vida útil (Henan Doing Maquinaria S.L, 2014):

1. Utiliza placa de acero especial Q245R con un espesor de 16 mm. La soldadura utiliza soldadura automática, tratamiento térmico e inspección por rayos X para prolongar la vida útil del reactor.
2. La vida útil es de 6 a 8 años.

Ahorro Energético (Henan Doing Maquinaria S.L, 2014):

1. El sistema de calefacción está herméticamente cerrado, sin fugas y ahorra combustible.

## **2. Simulación del proceso.**

La simulación de procesos se realiza utilizando el paquete de simulación Aspen Plus<sup>TM</sup> (Advanced Process Engineering System). Este software elaborado por Aspen Technology, Inc<sup>®</sup> es un simulador de flujo de procedimientos diseñado para pronosticar, valorar y optimar el

proceder de los procedimientos químicos en el mundo real (Aspen Plus, 2023). La simulación de procedimientos con Aspen Plus™ le permite predecir el comportamiento del proceso basándose en condiciones fundamentales del factor ingenieril, la moderación de masa y energía, la moderación química y de fases, y la cinética de reacción. La base de datos de Aspen Plus, que incluye información termodinámica de alta precisión, condiciones operativas del mundo real y modelos rigurosos de una variedad de dispositivos, le permite suponer cómo se comportarán sus dispositivos en la vida real. Aspen Plus le ayuda a construir excelentes fábricas y optimizar la rentabilidad de las existentes.

Una vez conformado un procedimiento, las especificaciones se pueden remplazar como la proporción del flujograma, los contextos de servicio y los componentes de entrega para introducir nuevas propuestas de análisis o alternativas. Podrás generar planos, informes, imágenes en PDF, etc. Analiza los resultados. Además de los beneficios mencionados anteriormente, Aspen Plus™ también puede realizar otras tareas como:

- Realizar estudios de sensibilidad y estudios de casos.
- Genera resultados gráficos y tabulares comunes.
- Evaluar propiedades físicas.
- Crear un modelo de simulación de información de fábrica.
- Proceso de optimización.
- Compartir resultados para archivos grandes.
- Comparta entrada y salida entre otras aplicaciones de Microsoft Windows®.

El modelo utilizado en este estudio para suponer la conversión de PE se basa en la gasificación en un reactor de lecho fluidizado y se basa en un piloto descrito previamente por Mitta et al. (2006) simuló la gasificación de neumáticos y la verificó con éxito utilizando datos

empíricos. Este método solo tiene en cuenta los elementos de equilibrio formados en el reactor (metano, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, agua, azufre, compuestos nitrogenados). Es menos probable que se formen otros hidrocarburos de alto peso molecular, como el alquitrán y el petróleo, en equilibrio y, por ende, no se incluyen en las ficciones. Sobre todo, las condiciones de estado estacionario permiten una optimización integral de los parámetros clave del proceso (incluida la temperatura de gasificación, la relación vapor/combustible, etc.) sin considerar las complejidades de la dinámica del flujo de gasificación o la cinética de reacción. Esto hace posible realizar investigaciones químicas. El proceso se realiza en un reactor de lecho fluidizado y se modela como un procedimiento de estado estacionario en Aspen Plus™. Se implementa un flujo de entrada de polietileno mediante el análisis elemental de su composición y, tras la validación de la simulación, el método se puede aplicar a otros tipos de plásticos con diferentes propiedades.

Componentes.

Aspen Plus™ mantiene una extensa biblioteca que documenta especificaciones de unidades puras y sus propiedades. Esta biblioteca se conforma con medidas para aproximadamente 8500 ingredientes, incluidas sales orgánicas e inorgánicas. Los componentes y posibles productos dentro de la alimentación del proceso se definen en la especificación del componente. Al especificar un componente, debe elegir el tipo apropiado. Por esta razón, debes considerar los siguientes puntos:

General: Ingredientes en forma líquida y vapor. - Sales en soluciones químicas.

Sólidos inertes convencionales (sólidos CI):

Sólidos inactivos en la etapa de medida y sales en el precipitado.

Sólidos No Convencionales (Sólidos NC):

Sustancias y sales que son inactivas en la etapa de medida química y no pueden representarse mediante una estructura molecular.

**2.1 Esclarecimiento de características de los componentes.**

Lo representativo de los módulos representan la estructura de un módulo en función de sus componentes identificables, las cuales se pueden especificar:

**Tabla 3.**

*Características de los Componentes*

<b>PROXANAL - Análisis industrial, % peso seco</b>	<b>ULTANAL - Análisis industrial, % peso seco</b>	<b>SULFANAL - Análisis de azufre, % en peso de base seco de carbono original</b>	<b>GEMANAL – Análisis general de ingredientes, % en peso o volumen.</b>
Humedad - <i>Moisture</i>	Ceniza - <i>Ash</i>	Pirítico* - <i>Pyritic</i>	Constituyente 1 - <i>Constituent 1</i>
Carbono Fijo - <i>Fixed Carbon</i>	Carbono - <i>Carbon</i>	Sulfato - <i>Sulfate</i>	Constituyente 2 - <i>Constituent 2</i>
Materia Volátil - <i>Volatile Matter</i>	Hidrógeno - <i>Hydrogen</i>	Orgánico - <i>Organic</i>	Constituyente 3 - <i>Constituent 3</i>
	Nitrógeno - <i>Nitrogen</i>	<i>*Parte del azufre del carbón se encuentra en forma de inclusiones inorgánicas formadas por sulfuros.</i>	Constituyente n - <i>Constituent n</i>
Ceniza - <i>Ash</i>	Cloro - <i>Chlorine</i>		
	Sulfuro - <i>Sulfur</i>		
	Oxígeno - <i>Oxygen</i>		

Para piezas tradicionales y piezas tradicionales sólidas, las propiedades de la pieza se desarrollan en software. Para sólidos no convencionales Las propiedades del modelo para sólidos no convencionales se enumeran en la tabla Propiedades NC avanzadas. En este último caso, necesitamos definir las propiedades del sólido, ellas son:

Entalpía → ENTHGEN: Usamos fracciones de masa y un modelo GEMANAL llamado HCGEN.

Densidad → DNSTYGEN: Usamos fracciones de masa y un modelo GEMANAL llamado DENGEN.

Selección del modelo termodinámico.

Evaluación de características termodinámicas de módulos puros y mix en procesos requeridos. La caracterización de Aspen Plus™ se puede efectuar manejando más de 80 modelos termodinámicos integrados en el simulador (EOS).

Las características composicionales de los sólidos en el modelo se calculan a partir de la fórmula de estado (EOS). Una de las razones por las que se eligió Aspen Plus™ como simulador en lugar de otro software simulador es porque accede a los usuarios incorporar sólidos en sus modelos de procedimientos de simulación. Dado que se trata de un sistema gas-líquido (VLE) que se realiza a presiones inferiores a 10 atm, se utilizan dos líquidos aleatorios (NRTL) para caracterizar los componentes del modelo de simulación.

Cada simulación de proceso incluye los valores de las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de una mix compleja que se hace circular o cicla entre diferentes equipos de la factoría bajo todas las situaciones posibles de constitución, presión y términos de calor para probar su funcionalidad. Evidentemente esto no es posible, por lo que se deben utilizar técnicas predictivas para estimar estos valores. La selección correcta de estos métodos es importante para calcular con precisión los sistemas y flujos dentro del sistema simulado. Tenga en cuenta que, si se elige el procedimiento de pronóstico de propiedades erróneo, los resultados obtenidos en la simulación tendrán poca o ninguna relación con la realidad.

### **Recomendaciones**

Gran parte de lo que sigue es una modificación de las recomendaciones de G.J. Universidad de Missouri-Columbia, Departamento de Ingeniería Química, Sopa para elegir un método para calcular el equilibrio líquido-vapor (ELV) o el equilibrio líquido-líquido (ELL):

1) Si la temperatura de la mezcla disminuye (como  $T_r = T / \sum z_i T_{ci}$ ) es mayor que 0,75 y no se espera una fase de solución inmiscible, se debe utilizar una fórmula de estado como SRK o PR. Algunas estadísticas experimentales favorecen estas ecuaciones. Los datos están disponibles en la base de estadísticas del simulador. Según Hyprotech, PR es mejor que SRK, pero hay dictámenes contrarios.

2) Si  $Tr$  es menor que 0,75, se debe utilizar el modelo de solución en fase líquida y las fórmulas de estado de vapor.

3) Si se considera una etapa líquida, el modelo de solución alternativa es la mejor opción:

a. NRTL se refiere a una mix orgánica en presencia de agua.

b. Wilson hace el resto, pero ciertas fuentes (Virtual Materials Group) recomiendan utilizar la fórmula de Margules para mix aromáticas.

4) Se debe utilizar NRTL cuando esté disponible ELL y persistentemente se supone que los factores de interacción están disponibles o pueden estimarse.

5) Si los coeficientes de interacción Wilson o NRTL (experimentales o calculados) no están disponibles, se recomienda usar el modelo de solución UNIQUAC con pronóstico de factores de interacción binarios usando UNIFAC.

6) Algunas fuentes (Shepard) sugieren trazar cada par de compuestos  $xy$ ,  $txy$  o  $pxy$  en la mix y observar cualquier "comportamiento" extraño (picos o roturas, secciones planas, etc.). Si ninguno de los dos aplica, es razonable elegir un método que tenga en cuenta el equilibrio.

Otras opciones recomendadas las proporcionan empresas que proporcionan emuladores o software relacionado y se resumen en formato tabla, en donde se sintetiza los modelos de coeficientes de actividad de *Virtual Materials*, un proveedor de compuestos de características de simulación, recomendados hacia varios tipos de mezclas:

**Tabla 4.**

*Modelos de coeficientes de actividad recomendados.*

<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Modelo recomendable</b>
Alcoholes, cetonas y éteres	Margules
Alcoholes o en mezclas con fenoles	Wilson
Compuestos orgánicos con presencia de agua	<b>NRTL</b>
Hidrocarburos aromáticos	Margules
Hidrocarburos C4 – C18	Wilson

La siguiente tabla muestra la aplicabilidad del método del coeficiente de acción en

diferentes métodos y el evento de ampliar la investigación disponible a situaciones disímiles a las iniciales:

**Tabla 5.**

*Aplicación de métodos de coeficiente de actividad.*

<b>Aplicación</b>	<b>Margules</b>	<b>NRTL</b>	<b>UNIQUAC</b>	<b>Van Laar</b>	<b>Wilson</b>
<b>Equilibrio líquido-líquido</b>	Aplicable	Aplicable	Aplicable	Aplicable	No Aplicable
<b>Extrapolación</b>	Cuestionable	Bueno	Bueno	Cuestionable	Bueno
<b>Mezclas binarias</b>	Aplicable	Aplicable	Aplicable	Aplicable	Aplicable
<b>Mezclas multicomponentes</b>	Aplicación Limitada	Aplicable	Aplicable	Aplicación Limitada	Aplicable
<b>Polímeros</b>	No Aplicable	No Aplicable	Aplicable	No Aplicable	No Aplicable
<b>Sistemas autoasociativos</b>	Cuestionable	Aplicable	Aplicable	Cuestionable	Aplicable
<b>Sistemas azeotrópicos</b>	Aplicable	Aplicable	Aplicable	Aplicable	Aplicable
<b>Sistemas diluidos</b>	Cuestionable	Aplicable	Aplicable	Cuestionable	Aplicable

**Tabla 6.**

*Paquetes básicos recomendados por tipo de proceso.*

<b>Tipo de Proceso</b>	<b>Paquete recomendado</b>	<b>Termodinámico</b>
Acuoso ácido	Sour PR	
Alquilación de HF	PRSV, NRTL	
Aromáticos	Wilson, NRTL, UNIQUAC	
Deshidratación de TEG	PR	
Hidrocarburos-agua (alta solubilidad del agua en HC)	Kabadi Danner	
Hidrocarburos sustituidos (cloruro de vinilo, acrilonitrilo)	PR, SRK	
Inhibición de hidratos	PR	
Planta de amoníaco	PR, SRK	
Plantas de etilbenceno / estireno	PR, SRK o Wilson, NRTL, UNIQUAC (según la tecnología de producción)	
Procesamiento de gas criogénico	PR, PRSV	
Producción de ácido tereftálico	Wilson, NRTL, UNIQUAC	
Producción de éter (MTBE, ETBE, ter-amil metil eter TAME)	Wilson, NRTL, UNIQUAC	
Productos químicos	Modelos de actividad, PRSV	
Reservorios	PR y sus variantes	
Separación de aire	PR, PRSV	
Separaciones de hidrocarburos	PR, SRK	

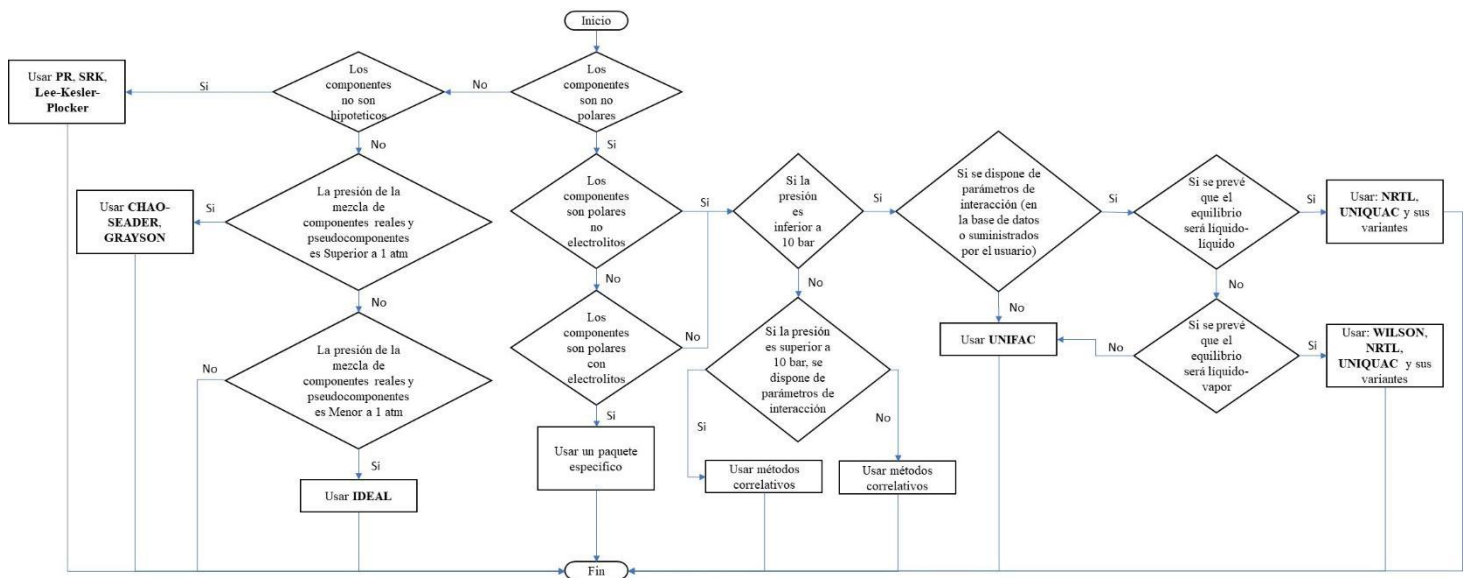
Tipo de Proceso	Paquete recomendado	Termodinámico
Sistemas de vapor	ASME Steam, Chao Seader, GS	
Torres a vacío	PR y sus variantes, GS, Braun K10, Esso	
Torres atmosféricas de crudo	PR y sus variantes, Grayson Streed (GS)	
Torres de etileno	Lee Kesler Plocker	
Sistemas con alto contenido de H <sub>2</sub>	PR, Zudkevitch-Joffee (ZJ), GS	

ASPENTECH ofrece pautas para seleccionar kits de rendimiento como la formulación y las circunstancias de manipulación. A continuación, se muestra un diagrama de flujo a partir del esquema ASPEN original, dados los paquetes de software disponibles para UniSim Design R390.

### 2.2 Paquetes de software dados

Figura 11.

Diagrama de flujo de los paquetes de software dados.



### 2.3 Previsión de propiedades.

#### Metodologías servibles (UniSim Design R390).

UniSim Design R390 sitúa de los siguientes modelos para realizar los procesamiento de datos cálidos y de transporte para todas las etapas:

**Tabla 7.**

*Métodos disponibles*

<b>Ecuaciones de Estado</b>	<b>Modelos de actividad disponibles</b>	<b>Modelos de Presión de vapor disponibles</b>	<b>Otros modelos disponibles</b>
BWRS, Glycol Package, Kabadi-Danner, Lee-Kesler-Plocker, MBWR, Peng-Robinson, PRSV, PR-Twu, Sour PR, SRK, SRK-Twu, Twu-Sim-Tassone, Zudkevitch-Joffe.	GCEOS, Chien Null, Chao Seader, Extended NRTL, General Grayson, Margules, UNIQUAC, Van Laar, Wilson.	Antoine, Braun K10, Esso Tabular.	Amine Pkg, ASME Steam, Clean Fuels Pkg USD, DBR Amine Pkg, Infochem Multiflash, NBS Steam, Neotec Black Oil.

Cuando selecciona una fórmula de momento, especifica el procedimiento que se manejará para calcular la entalpía. Hay dos perspectivas:

- 1) Fórmula de Estado o
- 2) Lee-Kessler.

La inicial variante utiliza ecuaciones seleccionadas según métodos específicos de cada país. Por otro lado, si selecciona Lee-Kessler, la fórmula de estado se usa para los cálculos de medida del LV y la fórmula de Lee-Kessler se usa para la entropía y los cálculos de entropía. Los resultados obtenidos por Lee-Kessler son confrontables a los de la fórmula de estado estándar de UniSim y tienen el mismo rango de aplicabilidad, pero la energía interna calculada con la segunda iniciativa es levemente menor para procedimientos que contienen hidrocarburos pesados y puede ser precisa.

Si selecciona el paquete PR, Sour PR, SRK o Sour SRK, seleccione el procedimiento de cómputo de la densidad del líquido. 1) densidad EOS y 2) densidad de líquido blando. Las versiones anteriores de paquetes anteriores utilizaban el modelo Costald para calcular la densidad del fluido. Este método solo se utiliza cuando la temperatura escalada es inferior a 1. Si Tr superior a 1, la cohesión del líquido se calcula según la fórmula de estado.

Esto puede provocar discontinuidades en los valores de densidad, lo que puede causar problemas, especialmente en modo dinámico.

Al seleccionar la segunda opción, UniSim Design intercala el piloto de Costal y la fórmula de estado entre  $Tr = 0,95$  y  $Tr = 1$ , dando valores de densidad uniformes.

### **1) Soave-Redlich-Kwong (SRK) y sus variedades**

La fórmula SRK única se logra utilizar para hidrocarburos y gases ligeros por encima de la presión atmosférica. Las cantidades logradas para diversas caracteres termodinámicas son muy exactos para fines técnicos y, por lo tanto, se emplean a menudo en simulaciones de procesos.

#### Modelo Zdokevich-Joffe.

El piloto de Zudkevich-Joffee es una versión modificada de la fórmula de estado RK. Predicción mejorada del equilibrio líquido-vapor para métodos que soportan hidrocarburos e hidrógeno.

Los principales beneficios de este piloto son que predice la presión de vapor de compuestos puros y que es una manera fácil de determinar los coeficientes requeridos en la fórmula. Los cálculos de entalpía se realizaron mediante el método de Lee-Kessler.

#### Modelo kabaddi Danna.

El modelo Kabadi-Fanner es una modificación de la fórmula SRK. Cálculo del balance LLV en sistemas de compuestos de hidrocarburos/agua, especialmente para aquellos con bajos niveles de agua.

### **2) Peng-Robinson (PR) y variantes.**

La fórmula, de la misma manera que SRK, se adopta ampliamente en aplicaciones en las industrias del gas, el petróleo y la petroquímica.

Al seleccionar una fórmula de estado Peng-Robinson, elija cualquiera de las dos opciones

que hay: UniSim Design y Standard. La variante estándar es una alteración de la fórmula RK en donde se personifica con mayor precisión los sistemas de gas natural. Además, permite una estimación más precisa de la densidad del líquido. El diseño de UniSim es similar al diseño original, pero con mejoras que amplían su alcance y representan mejores sistemas complejos dentro de ELV.

#### Penn Robinson Stryzek Vera (PRSV).

La fórmula de estado de Peng-Robinson-Stryjek-Vera dilata la aplicación de la fórmula original a métodos crecidamente no ideales mostrando resultas similares a las fórmulas de Wilson, NRTL o UNIQUAC. Esta fórmula funciona bien a bajas presiones. También tiene un fusonado limitado de medidas de interacción con compuestos que no son hidrocarburos.

Los parámetros empíricos de esta biblioteca contienen para curvas de presión de vapor para todos los módulos puros. Para compuestos virtuales que representan porciones de petróleo, el procedimiento parametriza automáticamente estas curvas utilizando el método de Lee-Kessler. empero, para otras conexiones personalizadas, puede ingresar un valor o especificar una correlación de Lee-Kessler, Gómez-Thodos o Reidel para que el sistema la calcule.

#### Sour PR.

La fórmula Sour PR es una combinación de la fórmula de Peng-Robinson y el método API Sour de Wilson para el tratamiento de métodos ácidos acuosos. La fórmula de Peng-Robinson se utiliza para calcular la volatilidad y la entalpía de las etapas líquida y gaseosa de los hidrocarburos. Los valores de la constante de proporción para la etapa acuosa se calcularon utilizando el método API-Sour de Wilson. Este piloto se puede utilizar en pilastras para la producción de petróleo crudo y otros procesos que involucran hidrocarburos, gases ácidos y agua.

### 3) Fórmula de Lee-Kessler-Pläcker.

La fórmula de Lee-Kessler-Plöcker se deriva de la fórmula de Lee-Kessler y es un procedimiento frecuente preciso para mix y sustancias no polares. La correlación COSTALD no se utiliza para calcular la densidad del líquido. Esto puede causar diferencias al comparar resultados entre ecuaciones de estado.

#### Modelo de coeficiente de actividad.

No obstante, se ha demostrado que la fórmula de estado predice de manera confiable las características de las mix de hidrocarburos en una variedad de situaciones activas, su aplicación se restringe primariamente a combinados no polares o débilmente polares. Tradicionalmente, el tratamiento de compuestos o mix polares con procedimiento no ideal se ha basado en dos modeladores. Los modeladores de coeficientes de actividad son inherentemente empíricos más que fórmulas de estado y, por lo tanto, no pueden generalizarse ni extrapolarse de manera confiable a condiciones no probadas.

Este piloto solo ejecuta cómputos en etapa líquida, por lo que se debe especificar un procedimiento de cálculo en etapa gaseosa. Su selección requiere el desarrollo de un conjunto de especificaciones, que son esencialmente métodos de procesamiento en fase de vapor o fase de vapor. Todos excepto Margules y Van Laar están limitados a las siguientes opciones:

a) Más adecuado para situaciones donde la operación es a presiones bajas a moderadas y hay pocas interacciones moleculares entre compuestos en la etapa gaseosa. Esta es la configuración predeterminada.

b) RK se puede utilizar para todos los gases. Un método común es reemplazarlo con SRK.

c) Virial, modela la fugacidad en la etapa gaseosa para sistemas con fuertes interacciones

en la fase gaseosa y da buenos resultados. Esto ocurre cuando están presentes ácidos carboxílicos u otros compuestos que tienden a formar fuertes enlaces de hidrógeno.

d) PR y SRK se utilizan en todas las circunstancias expuestas.

Otra opción es la temperatura utilizada para valorar las medidas de interacción para el procedimiento UNIFAC. Aunque existen valores preestablecidos, para obtener superiores resultados recomendamos elegir la temperatura que más se acerque a sus condiciones de trabajo. La tercera opción le permite elegir si desea utilizar factores de puntuación. Por supuesto, este factor sólo se aplica a modelos no ideales.

Como se muestra en la figura, los modeladores de coeficientes de actividad disponibles son:

#### Modelo Chien-Nulo (CN):

Chien-Null es un procedimiento práctico que accede concertar diferentes metodologías para manejar mix multicomponentes. Cuando los usuarios seleccionan un piloto CN, logran elegir el modelo de coeficiente de actividad que crean que mejor representa el comportamiento de las distintas díadas formadas por mezclas multicomponentes. Así, por ejemplo, podrías elegir NRTL hacia un igual, Margules distinto, y así sucesivamente. El valor del coeficiente al interar puede ser estimado por el programa o ingresado por el usuario.

#### Fórmula de Van Laer:

Es esencialmente una fórmula empírica que se puede aplicar a sistemas con desviaciones positivas o negativas de la ley de Raoult. Empero, no puede predecir el valor máximo o mínimo del coeficiente de actividad y, por lo tanto, generalmente proporciona estimaciones deficientes en sistemas que contienen hidrocarburos y halohidrinas. Igualmente, cuando no es así, tiende a predecir dos fases fluidas, aunque esto puede reflejar una mezcla y un procesamiento limitados

de las tres fases de equilibrio.

Margules:

Se puede utilizar para crear la moderación entre fluidos gaseosos y líquidos. Esta fórmula no se fundamenta teóricamente, pero es útil para la evaluación e interpolación rápida de datos. Coexiste una adaptación de cuatro parámetros que ensancha su aplicación a mix multicomponentes.

Fórmula de Wilson:

Si bien, esta fórmula es más complicada y requiere de tiempo de cálculo que las fórmulas de Margules y Van Laar, logra simbolizar complacidamente cerca de todos los procedimientos líquidos no ideales, incluidos compuestos polares y no polares que no son mezclas de electrolitos. Soluciones de mezcla limitadas (ELL o ELLV). Proporciona excelentes predicciones de equilibrio ternario utilizando medidas derivadas mediante la reculada de antecedentes binarios.

Wilson extendido:

Es una variación del modelo de Wilson. Se utiliza una gran cantidad de medidas de interacción para establecer los factores de acción.

NRTL:

Este modelo supera las limitaciones de las predicciones de equilibrio líquido-líquido de Wilson, aunque tiende a producir separaciones de fases incorrectas. Esto puede reflejar el comportamiento de equilibrio de LV, LL y LLV. En general, es más preciso que Wilson y supera a otros modelos en sistemas acuosos/orgánicos. Se puede aplicar directamente sobre mezclas multicomponentes. Tiene algunas ventajas sobre la fórmula de Wilson para sistemas totalmente miscibles. Es termodinámicamente consistente y se puede aplicar a sistemas ternarios y de orden

superior utilizando parámetros obtenidos mediante la regresión de datos de equilibrio binario. Su precisión es comparable a la fórmula ELV Wilson. Combina las ventajas de las ecuaciones de Wilson y Van Leer y, como esta última, no requiere mucho tiempo para calcularla. A diferencia de la fórmula de Van Laer, puede utilizarse tanto para sistemas diluidos como para mezclas de hidrocarburos y alcoholes, aunque para estos últimos no resulta tan satisfactoria como la fórmula de Wilson. Esto permite modelar sistemas con múltiples puntos de ebullición o composiciones entre componentes, o sistemas donde los equilibrios LV y LL deben resolverse simultáneamente.

#### NRTL generales:

Ampliar la aplicación de NRTL a un rango de temperatura más amplio se asocia con un aumento en la cantidad de datos experimentales.

#### UNIQUAC (cuasiquímica universal):

Este modelo está modelado a partir de NRTL y tiene las mismas características básicas, pero requiere menos datos de parámetros de interacción que NRTL. Es capaz de predecir el equilibrio entre LV, LL y LLV. Se ha utilizado con éxito para predecir los equilibrios de sistemas altamente no ideales, como sistemas que contienen moléculas de diferentes tamaños y formas (como los polímeros). Se utiliza para mezclas que contienen agua, hidrocarburos, hidrocarburos halogenados, alcoholes, nitrilos, aminas, ésteres, cetonas y aldehídos. Se encontró que los parámetros experimentales tienen poca dependencia de la temperatura, lo que es beneficioso para la extrapolación de este método.

#### UNIFAC:

El procedimiento UNIFAC es un instrumento útil para cálculos VLE en ausencia de antecedentes empíricos, con buenas evaluaciones en estudios industrialmente importantes. Sin embargo, no es ni debe considerarse un sustituto de los antecedentes empíricos. Esto es útil para

estudios preliminares, pero una construcción rigurosa requiere comparar los resultados con datos experimentales.

Tratamiento de gases no condensables:

El tratamiento de los no condensables se realiza mediante la Ley de Henry, aunque no puede elegirse como método para determinar las propiedades termodinámicas. El simulador lo utiliza automáticamente cuando la mezcla contiene compuestos no condensables: metano, etano, etileno, acetileno, hidrógeno, helio, argón, nitrógeno, oxígeno, óxido nitroso, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. La ley de Henry ampliada también se utiliza para modelar la interacción entre un disolvente y un soluto diluido en él. El término "compuesto no condensable" se refiere a un compuesto cuya temperatura crítica está por debajo de la temperatura del sistema. Obviamente, las interacciones de tales compuestos no se tienen en cuenta en el equilibrio del VI.

Simulación de fórmula de estado:

Con base en la información anterior, la fórmula estatal elegida es Soave-Redlich-Kwong (SRK) y sus variantes.

Con apoyo en información previa, se eligió NRTL como coeficiente de actividad simulada.

Construcción del modelo del reactor.

Aspen Plus™ es una biblioteca de modelos equipados con reactores, divididos principalmente en: (a) reactores de equilibrio o reactores estequiométricos; (b) equilibrio en reactores basado en la cinética de reacción; El modelo de reactor Gibbs en Aspen Plus™ es el único modelo de reactor que calcula equilibrios sólido-líquido-vapor, considera equilibrios químicos y de fase y tiene un enfoque basado en la temperatura de equilibrio. Por tanto, el

modelo de reactor se vuelve más adecuado para simulaciones de gasificación.

Definición de corriente y subcorriente.

En Aspen Plus<sup>TM</sup>, las clases de corriente se determinan en presencia de sólidos inertes. En este caso, para implementar los sólidos inertes, necesitamos usar sus subflujos y entender cómo definirlos en la siguiente tabla.

**Tabla 8.**

*Definición de corriente y subcorriente.*

<b>Tipo de corriente</b>	<b>Descripción</b>
<b>CONVEN</b>	<i>Conventional components only</i> Solo componentes convencionales
<b>MIXNC</b>	<i>Conventional and nonconventional solids</i> Sólidos convencionales y no convencionales
<b>MIXCISLD</b>	<i>Conventional components and inert solids</i> Componentes convencionales y sólidos inertes
<b>MIXNCPSD</b>	<i>Conventional components and nonconventional solids with particle size distribution</i> Componentes convencionales y sólidos no convencionales con distribución granulométrica
<b>MIXCIPSD</b>	<i>Conventional components and inert solids with particle size distribution</i> Componentes convencionales y sólidos inertes con distribución granulométrica
<b>MIXCINC</b>	<i>Conventional components and inert solids and nonconventional solids</i> Componentes convencionales y sólidos inertes y sólidos no convencionales
<b>MIXCINCPSD</b>	<i>Conventional components and nonconventional solids with particle size distribution</i> Componentes convencionales y sólidos no convencionales con distribución granulométrica

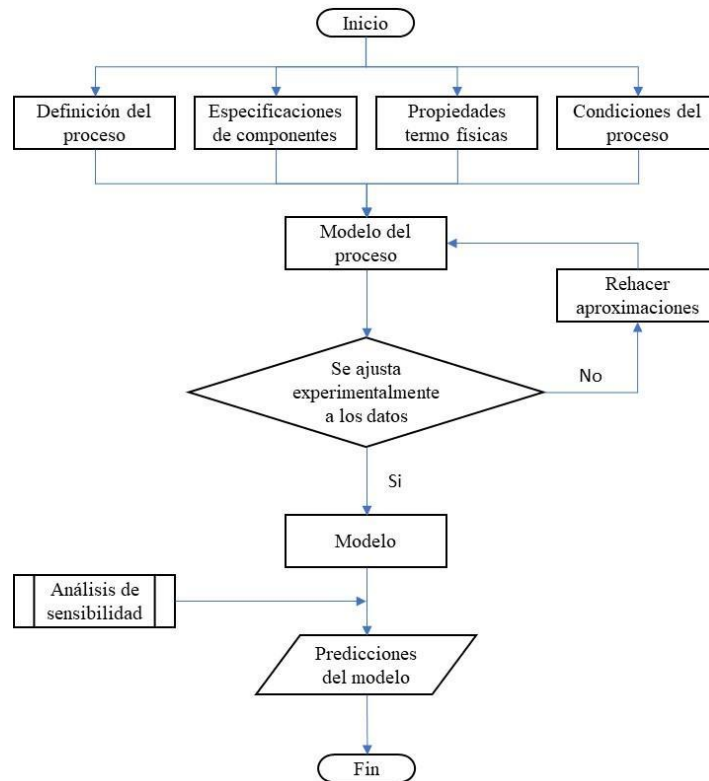
Siga el esquema a continuación cuando configure su simulación. Primero, defina el proceso a simular y cree un flujograma del proceso que se generará en el simulador. Especificar los componentes del proceso y los modelos termodinámicos que se utilizarán para evaluar todas las características fisicoquímicas y de proporción de compuestos y mezclas puros. Una vez completada la primera parte, se ensambla el diagrama de flujo y se especifican las principales condiciones de flujo (caudal, composición, temperatura y presión) en un entorno de software especialmente diseñado. Utilice esta información para determinar las propiedades restantes.

Una vez seleccionadas las operaciones básicas del proceso, se implementan los módulos correspondientes en el diagrama de flujo y se especifican las propiedades iniciales de la

simulación. En este punto, comience a analizar el proceso hasta lograr la convergencia utilizando parámetros que se consideren aceptables.

**Figura 12.**

*Diagrama de flujo – operaciones básicas del proceso.*



**Tabla 9.**

*Sumario de Reacciones de gasificación*

Nº	Reacciones de gasificación	Calor de reacción (kJ/mol) T=1000 k, P=Pº	Tipo
1	$C + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO$	-112	Reacción con oxígeno
2	$CO + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO_2$	-283	
3	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow H_2O$	-248	
4	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	136	Reacción con agua
5	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-35	
6	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	206	Reacción de metanización
7	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	171	
8	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74,8	
9	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-225	

Nº	Reacciones de gasificación	Calor de reacción (kJ/mol) T=1000 k, P=Pº	Tipo
10	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-190	

El proceso tiene lugar en tres etapas, que se enumeran a continuación:

### Tabla 10.

#### *Etapas del proceso*

ETAPAS PROCESO	PRE-TRATAMIENTO	TRATAMIENTO TÉRMICO
Etapa 1	SECADO	
Etapa 2		PIROLISIS
Etapa 3		GASIFICACIÓN

*Nota:* \* **La Reacción de Boudouard** (denominado también Proceso de Boudouard) es una reacción química empleada para gasificar el carbón con dióxido de carbono y obtener monóxido de carbono, denominada en honor del químico francés Octave Leopold Boudouard (1872– 1923). Este equilibrio químico aparece frecuentemente en procesos como: altos hornos

### Tabla 11.

#### *Reacción química en diferentes rangos de temperaturas.*

Temperatura (°C)	Reacción química
100-120	Deshidratación del Polietileno
250	Desoxigenación, eliminación de azufre, disociación molecular de agua y dióxido de carbono. Comienza a liberarse sulfuro de hidrógeno.
340	Rotura de enlaces en compuestos alifáticos. Comienzan a liberarse metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
380	Etapa de carbonización. Concentración de carbono en los residuos.
400	Los enlaces C-O y C-N se rompen.
400-600	Degradación de materiales bituminosos. Carbonización a baja temperatura
600	Cracking de materiales bituminosos. Produce hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno)

## 2.4 Simulación.

### Consideraciones previas.

Para desarrollar el modelo de proceso, en este estudio se hicieron las siguientes suposiciones.

Requisitos previos:

1. Todas las reacciones químicas en el gasificador alcanzan el equilibrio.
2. Los únicos productos que se consideran en la corriente de productos son metano, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y agua.
3. Los componentes principales del carbón son únicamente carbono y cenizas.

#### Describe las operaciones en Aspen Plus.

El procedimiento de pirólisis y gasificación se modela mediante el módulo unitario integrado Aspen Plus, dividido en tres etapas: pretratamiento, pirólisis y gasificación. Las siguientes secciones analizan cada una de las tres fases del desarrollo de la simulación.

#### Pretratamiento:

Secado y Separación son operaciones unitarias agrupadas en este paso y están figuradas por las medidas correspondientes en Aspen Plus Dryer and Separator. Para ello utilizamos bloques RStoic y Separator. La fuente de alimentación de PE ingresa al secador a una velocidad de 6 kg/h, donde disipa la humedad que trae. Luego, la fuente seca ingresa al consecutivo módulo separador donde la fase sólida se separa de la fase gaseosa para formar las corrientes de PE-Seco y HUMEDAD.

#### Pirólisis:

La corriente sólida "PE-SECO" se alimenta al pirolizador a través del dispositivo Ryield. La corriente de vapor "húmedo" va directamente al evaporador, que es del mismo tamaño que la unidad RGibbs. Finalmente, obtenemos una corriente volátil del pirolizador.

#### Gasificación:

En esta unidad, el flujo se introduce desde un mixer donde se combina exhalación con aire a una determinada temperatura. Flujo de aire en el evaporador: agua, humedad y volatilidad.

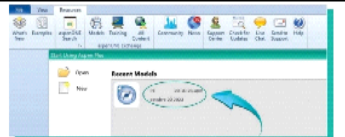
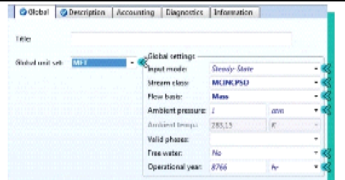
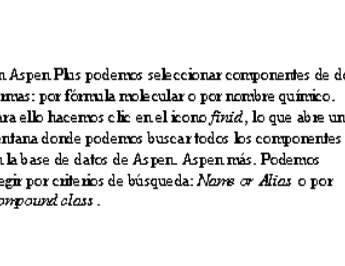
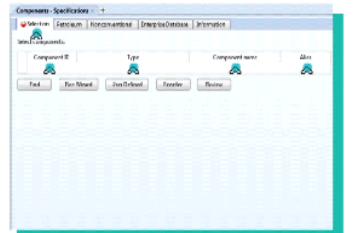
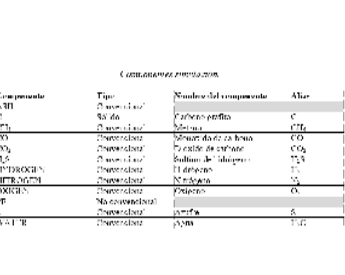
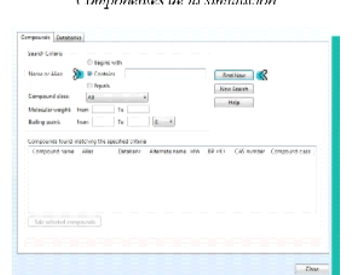

### Desarrollo de simulación

Para modelar este procedimiento, se deben seguir estos pasos:

- I) Inicie Aspen Plus.
- II) Seleccionar los elementos básicos del desarrollo de la simulación. III) Selección de componentes químicos.
- IV) Definir y seleccionar el envase de fluido a utilizar. 5) Definición de corriente
- VI) Definir y seleccionar bloques de proceso.

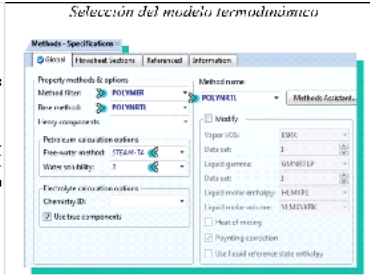
### **Tabla 12.**

*Desarrollo de Simulación.*

<p><b>I) Inicie Aspen Plus</b></p> <p>Para acceder a Aspen Plus, debemos hacer lo siguiente: En el escritorio de Windows, haga clic en el menú Inicio. Seleccione Todos los programas, AspenTech <b>CLICK</b> Modelado de procesos V8.4 <b>CLICK</b> Aspen Plus V8.4 <b>CLICK</b> Aspen Plus V8.4 <b>CLICK</b> La ventana principal del programa aparece en el escritorio, como se muestra en la siguiente figura:</p>		<p>Desde la pantalla de inicio podemos acceder directamente a simulaciones anteriores realizadas sobre el último modelo o crear nuevas simulaciones. Creamos una nueva simulación haciendo clic en el icono correspondiente en el diagrama.</p>																																																																																								
<p><b>II) Seleccionar los elementos básicos del desarrollo de la simulación.</b></p> <p>En el lado izquierdo de la ventana de trabajo, seleccionamos Simulación (Simulation) <b>CLICK</b> Configuración (Setup) <b>CLICK</b> Especificaciones (Specification) <b>CLICK</b>. Se abre una ventana donde seleccionamos el sistema unitario y otros parámetros físicos para la simulación que definimos anteriormente.</p>		<p><b>Global Unit Set: MET (Metric Engineering Units)</b>  <b>Global Setting: Input mode</b> → Steady-state, <b>Stream Class</b> → MOCINCPSD* (con substreams MIXED, CIPSD, NCPD, cuando tenemos conventional y nonconventional components). <b>Flow basis</b> → Mass, <b>Ambient pressure</b> → 1 atm. *MOCINCPSD: Conventional components and nonconventional solids with particles size distribution. Otras especificaciones se ajustan por defecto a las especificaciones establecidas por el programa.</p>																																																																																								
<p>En Aspen Plus podemos seleccionar componentes de dos formas: por fórmula molecular o por nombre químico. Para ello hacemos clic en el icono <i>find</i>, lo que abre una ventana donde podemos buscar todos los componentes en la base de datos de Aspen. Aspen más. Podemos elegir por criterios de búsqueda: <i>Name or Alias</i> o por <i>Compound class</i>.</p>		<p>Creación componentes de la simulación.</p> 																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Componente</th> <th>Tipo</th> <th>Número del componente</th> <th>Alias</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CH4</td> <td>Convencional</td> <td>1</td> <td>Metano</td> </tr> <tr> <td>C2H6</td> <td>Convencional</td> <td>2</td> <td>Etano</td> </tr> <tr> <td>C3H8</td> <td>Convencional</td> <td>3</td> <td>Propano</td> </tr> <tr> <td>iC4H10</td> <td>Convencional</td> <td>4</td> <td>Isobutano</td> </tr> <tr> <td>nC4H10</td> <td>Convencional</td> <td>5</td> <td>Butano</td> </tr> <tr> <td>iC5H12</td> <td>Convencional</td> <td>6</td> <td>Isopentano</td> </tr> <tr> <td>nC5H12</td> <td>Convencional</td> <td>7</td> <td>pentano</td> </tr> <tr> <td>H2O</td> <td>Convencional</td> <td>8</td> <td>Agua</td> </tr> <tr> <td>CO2</td> <td>Convencional</td> <td>9</td> <td>Dióxido de carbono</td> </tr> <tr> <td>N2</td> <td>Convencional</td> <td>10</td> <td>Nitrógeno</td> </tr> <tr> <td>O2</td> <td>Convencional</td> <td>11</td> <td>Oxígeno</td> </tr> <tr> <td>SO2</td> <td>Convencional</td> <td>12</td> <td>Sulfuro de dióxido</td> </tr> <tr> <td>H2S</td> <td>Convencional</td> <td>13</td> <td>Sulfuro de hidrógeno</td> </tr> <tr> <td>NO</td> <td>Convencional</td> <td>14</td> <td>Óxido nítrico</td> </tr> <tr> <td>NO2</td> <td>Convencional</td> <td>15</td> <td>Dióxido de nitrógeno</td> </tr> <tr> <td>CO</td> <td>Convencional</td> <td>16</td> <td>Monóxido de carbono</td> </tr> <tr> <td>HCN</td> <td>Convencional</td> <td>17</td> <td>Cianuro de hidrógeno</td> </tr> <tr> <td>CH3OH</td> <td>Convencional</td> <td>18</td> <td>Metanol</td> </tr> <tr> <td>C6H6</td> <td>Convencional</td> <td>19</td> <td>Benceno</td> </tr> <tr> <td>C8H18</td> <td>Convencional</td> <td>20</td> <td>Octano</td> </tr> <tr> <td>WATER</td> <td>Nonconventional</td> <td>21</td> <td>Agua</td> </tr> </tbody> </table>	Componente	Tipo	Número del componente	Alias	CH4	Convencional	1	Metano	C2H6	Convencional	2	Etano	C3H8	Convencional	3	Propano	iC4H10	Convencional	4	Isobutano	nC4H10	Convencional	5	Butano	iC5H12	Convencional	6	Isopentano	nC5H12	Convencional	7	pentano	H2O	Convencional	8	Agua	CO2	Convencional	9	Dióxido de carbono	N2	Convencional	10	Nitrógeno	O2	Convencional	11	Oxígeno	SO2	Convencional	12	Sulfuro de dióxido	H2S	Convencional	13	Sulfuro de hidrógeno	NO	Convencional	14	Óxido nítrico	NO2	Convencional	15	Dióxido de nitrógeno	CO	Convencional	16	Monóxido de carbono	HCN	Convencional	17	Cianuro de hidrógeno	CH3OH	Convencional	18	Metanol	C6H6	Convencional	19	Benceno	C8H18	Convencional	20	Octano	WATER	Nonconventional	21	Agua	<p>Componentes de la simulación</p> 	<p>Definición de componentes</p> 
Componente	Tipo	Número del componente	Alias																																																																																							
CH4	Convencional	1	Metano																																																																																							
C2H6	Convencional	2	Etano																																																																																							
C3H8	Convencional	3	Propano																																																																																							
iC4H10	Convencional	4	Isobutano																																																																																							
nC4H10	Convencional	5	Butano																																																																																							
iC5H12	Convencional	6	Isopentano																																																																																							
nC5H12	Convencional	7	pentano																																																																																							
H2O	Convencional	8	Agua																																																																																							
CO2	Convencional	9	Dióxido de carbono																																																																																							
N2	Convencional	10	Nitrógeno																																																																																							
O2	Convencional	11	Oxígeno																																																																																							
SO2	Convencional	12	Sulfuro de dióxido																																																																																							
H2S	Convencional	13	Sulfuro de hidrógeno																																																																																							
NO	Convencional	14	Óxido nítrico																																																																																							
NO2	Convencional	15	Dióxido de nitrógeno																																																																																							
CO	Convencional	16	Monóxido de carbono																																																																																							
HCN	Convencional	17	Cianuro de hidrógeno																																																																																							
CH3OH	Convencional	18	Metanol																																																																																							
C6H6	Convencional	19	Benceno																																																																																							
C8H18	Convencional	20	Octano																																																																																							
WATER	Nonconventional	21	Agua																																																																																							
<p>El <b>Polietileno PE</b>, definido con un <b>Nonconventional Solid</b> <b>componen</b>, a partir de un análisis mediate, el cual se muestra en la siguiente tabla:</p>	<p><i>Proximate and Ultimate Analysis del combustible PE:</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Muestra</th> <th colspan="3">Proximate Analysis</th> <th colspan="6">Ultimate Analysis</th> </tr> <tr> <th>Moisture</th> <th>FC</th> <th>VM</th> <th>Ash</th> <th>C</th> <th>H</th> <th>N</th> <th>Cl</th> <th>S</th> <th>O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PE</td> <td>0.02</td> <td>0</td> <td>99.83</td> <td>0.13</td> <td>83.81</td> <td>13.86</td> <td>0.12</td> <td>0</td> <td>0.06</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><i>Parámetros de densidad y entalpia para PE.</i></p> 	Muestra	Proximate Analysis			Ultimate Analysis						Moisture	FC	VM	Ash	C	H	N	Cl	S	O	PE	0.02	0	99.83	0.13	83.81	13.86	0.12	0	0.06	0	<p>Para la definición del <b>PE</b> como un <b>Nonconventional Solid</b> se definen sus propiedades, de igual manera la <b>Entalpia</b> y la <b>Densidad</b>, para ello realizamos las siguientes pasos: En la siguiente figura, muestra que, para el <b>PE</b>, se selecciona los parámetros de <b>Entalpia (Enthalpy)</b> = <b>ENTHGEN</b>, <b>Densidad (Density)</b> = <b>DENSITYEN</b></p>																																																									
Muestra	Proximate Analysis			Ultimate Analysis																																																																																						
	Moisture	FC	VM	Ash	C	H	N	Cl	S	O																																																																																
PE	0.02	0	99.83	0.13	83.81	13.86	0.12	0	0.06	0																																																																																

**IV) Definición de paquete de fluido**

El modelo termodinámico que utilizamos es POLYNRTL: un método de propiedades aleatorias de dos fluidos de polímeros (*Polymer Non-Random TwoLiquid Property Method*). Para ello, vamos a la pestaña Propiedades - (Properties) **CLICK** Configuración (setup) **CLICK** Método (Methods) **CLICK** Especificación (Specifications) **CLICK**.



Global: Métodos y opciones de propiedad - (Property methods & options). Método Filtro (Method filter) → POLÍMERO (POLYMER). Método básico (Base method) → POLYNRTL. El método termodinámico es ESRK, que corresponde a la ecuación de Soave Redlich Kwong y se utiliza para calcular las propiedades de la fase vapor de las mezclas.

Vamos a la pestaña Simulación **CLICK** Configuración (setup) **CLICK** Transmisiones (Stream) **CLICK** y seleccionamos Nuevo (new) **CLICK**, para introducir otra transmisión actual. En nuestro caso es PE, agua y aire.



*Variables termodinámicas del PE.*

**PE – Polietileno.** La alimentación de polietileno se define como sólidos NC (sólidos no convencionales), como se muestra en la figura siguiente, a una velocidad de alimentación de 6 kg/h. Las variables termodinámicas de la corriente eléctrica son:

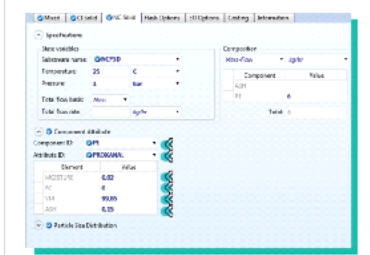
*Variables del PE*

Variables	Valores
Temperatura	25 °C
Presión	1 atm

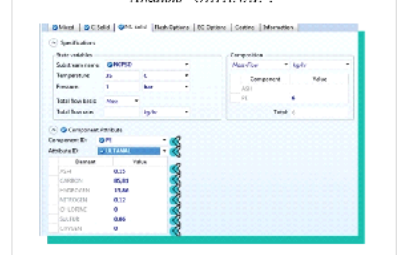


**V) Definición de corriente**

*Análisis "PROXANAL"*



*Análisis "ULTANAL"*



**Aire.** Inicialmente, definimos un caudal de aire de 15 kg/h (21 % de fracción molar de oxígeno y 79 % de fracción molar de nitrógeno), todo en la pestaña Mezcla.

*Variables alimentación Aire*

Variables	Valores
Temperatura	500°C
Presión	1atm

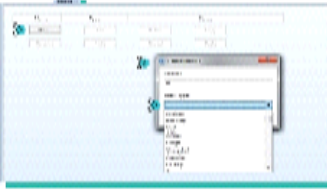


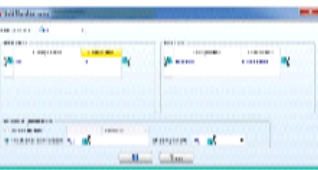




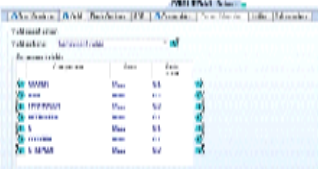


**Agua.** Definimos el caudal de agua al principio y lo introducimos en la pestaña Mezcla a razón de 3,6 kg/h.


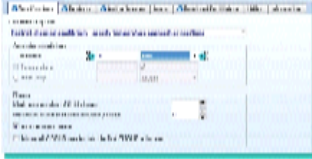


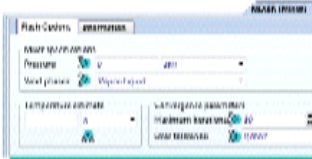




*Variables alimentación Agua*

Variables	Valores
Temperatura	500°C
Presión	1 atm



	<p>Ubicarse en la pestaña Bloques (Blocks) y seleccionar Nueva (New) <b>CLICK</b>, aparece una ventana donde puede cambiar el nombre del bloque, así como el modelo en la sección Seleccionar tipo (Select Type). Al hacer <b>CLICK</b> en la pestaña nueva (new), seleccionará a su vez los diferentes módulos que componen el proceso, van Mixer, R301a, R301b, R301c y Separator.</p>	<p><b>Selección de bloques</b></p> 	<p><i>Configuración de los bloques seleccionados</i></p> 					
<p><b>REACTOR = Reactor</b>. Se utiliza el módulo R301C se utiliza cuando se desea la estequiometría de la reacción, pero la información simbólica no está disponible (o no es relevante). Un bloque puede tener una o más flujos de alimentación, así como el flujo de salida requerido. Las entradas son generales, como entrada y salida para desahucio de agua y flujo de vapor.</p>	<p><b>Variables de selección en el bloque <i>Reactor</i></b></p>  <p><b>Definición de las reacciones</b></p>  <p><b>Reacción en el simulador</b></p>  <p><b>Definición de reacciones en paralelo</b></p>  <p><b>Cálculo de valores de reacciones</b></p> 	<p>El formulario de entrada para variables termodinámicas del módulo R301C se ingresan en expresiones matemáticas (Expressions).</p> <p>Las reacciones (Reactions) se definen en dicha pestaña, allí se define una nueva reacción y se ingresan los reactivos y productos, junto con sus coeficientes estequiométricos.</p> <p>Las reacciones estequiométricas se ajustan automáticamente en Aspen Plus con valores negativos para los reactivos y valores positivos para los productos. Esta forma también determina la finalización de la reacción por reacción de ordenamiento y conversión parcial de cualquiera de los reactivos. Se observa, mediante la definición en decimal o conversión fraccional (Fractional conversion).</p> <p>En el caso de reacciones múltiples, estas reacciones se definen utilizando la opción de reacción en paralelo. Si no se selecciona esta opción, las reacciones ocurrirán en paralelo.</p> <p>Si la reacción involucrada es una reacción de combustión, puede usar la configuración en la pestaña Combustion. En este caso, no es necesario definir la reacción y la simulación asumirá que todo el carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno se quemará por completo, se ignoran los componentes que contienen átomos distintos de C, H, S y N.</p> <p>Después de ingresar al programa de configuración, se puede calcular el valor de reacción en la pestaña valor de reacción. El valor de reacción no se utiliza en los cálculos, pero se muestra en la hoja de resultados; se calcula a partir de la reacción de 1 mol del componente de referencia (reactivo).</p>						
<p><b>REACTOR = Reactor</b>. Se utiliza el módulo RYield para determinar el tamaño de la ventana. R301C se utiliza cuando se desea la estequiometría de la reacción, pero la información simbólica no está disponible (o no es relevante). Un bloque puede tener una o más flujos de alimentación, así como el flujo de salida requerido. Las entradas son generales, como entrada y salida para desahucio de agua y flujo de vapor.</p>	<p><b>Definición y funcionamiento del módulo RYield</b></p> <table border="1" data-bbox="743 1360 954 1434"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperatura</td> <td>500 °C</td> </tr> <tr> <td>Presión</td> <td>1 atm</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Funcionamiento del módulo</b></p>  <p><b>Definición del rendimiento</b></p> 	Variable	Valor	Temperatura	500 °C	Presión	1 atm	<p>RYield calcula en función del rendimiento. El módulo RYield tiene propiedades similares al módulo R301a.</p> <p>Este módulo no requiere información previa sobre estequiometría o simbólica. El resultado de la reacción se define de acuerdo con el resultado en la pestaña Rendimiento (Yield).</p> <p>El rendimiento se define como el número de moles o masa de cada componente de la masa total introducida en cada bloque. Los componentes inertes se pueden definir de la misma manera y no se incluyen en los cálculos de rendimiento. El valor de reacción no se puede calcular aquí porque se desactiva la estequiometría de la reacción.</p>
Variable	Valor							
Temperatura	500 °C							
Presión	1 atm							

VI) Definición de bloques.

<p style="text-align: center;"><i>CCGs</i></p>  <p style="text-align: center;"><b>Classifier - Rigible.</b> El módulo <i>CCGs</i>, permite dimensionar el <i>Classifier</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Variables termodinámicas del módulo CCGs</i></p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Variables</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Presión</td> <td>Vacío</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><i>Variables termodinámicas</i></p>  <p style="text-align: center;"><i>Resumen de Configuración</i></p> 	Variables	Valores	Presión	Vacío	<p>El módulo <i>CCGs</i> prepara una solución de reacción un termodinámica en condiciones idealizadas. El cálculo se basa en minimizar la energía de Gibbs del sistema. Este bloque tiene una o más entradas y una o más flujos de salida con flujos de entrada y/o salida activos opcionales. El formulario de variables requiere expresiones matemáticas variables.</p> <p>Si elige equilibrio restringido (<i>Restricted Equilibrium</i>), puede definir reacciones para el sistema en dicha pestaña.</p> <p>Este módulo también le permite especificar el número de fases, qué componentes hay en cada fase y cómo distribuir la cantidad de salida de la fase (si se utilizan múltiples herramientas de salida).</p>
Variables	Valores					
Presión	Vacío					
<p style="text-align: center;"><b>Mezclador - Mixer</b></p> <p style="text-align: center;"><i>Mixer</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>Variables termodinámicas de trabajo del módulo mixer</i></p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Variables</th> <th>Valores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Presión</td> <td>Bar</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><i>Parámetros del Mezclador</i></p> 	Variables	Valores	Presión	Bar	<p>Esta unidad se adapta al módulo mezclador para producir una mezcla de agua y aire precalentada a 300° y 1 atm en las condiciones. Mínimo iterativo 30. Error Tolerancia 0,0001</p>
Variables	Valores					
Presión	Bar					
<p style="text-align: center;"><b>Separador - Separator</b></p> <p style="text-align: center;"><i>Separator - Separator</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>Variables separadas</i></p>  <p style="text-align: center;"><i>Introducción del módulo sensibilidad "Vary"</i></p> 	<p><b>Análisis de Sensibilidad</b> Se realiza un análisis de sensibilidad para comprender la dependencia de varios parámetros de la composición del gas producido por el clasificador. En este trabajo se analizan los cambios de temperatura, presión y flujo de agua para evaluar su efecto sobre la composición del gas resultante. Para realizar un análisis de sensibilidad en Aspen Plus, los datos iniciales deben ingresarse en el siguiente orden. Argüentemente se va a la pestaña Inicio (Home) en la columna superior del menú y seleccionamos allí <b>Sensibilidad (Sensitivity)</b> <b>CLICK</b>, luego sobre Nueva (New) <b>CLICK</b>, y obtenemos la siguiente figura.</p>				
<p>El tamaño de este bloque determina el módulo separador, por lo que definimos la separación de las dos fases.</p>	<p style="text-align: center;"><i>Introducción del módulo sensibilidad mixer</i></p> 	<p>Ahora definimos las variables para cambiar a medida que vamos en la primera pestaña llamada variable (Vary) <b>CLICK</b> nueva (new) <b>CLICK</b> variables (Variable) <b>CLICK</b>. A continuación, en la figura siguiente, se puede observar el orden de los parámetros especificados. En esta fase, el flujo de agua en el gas será el flujo de agua. También determinamos los valores mínimo y máximo en el gráfico, así como el número de puntos a dibujar.</p> <p>El siguiente paso es definir los componentes que participarán en el diagrama. Para ello, sobre la pestaña Definir (Define) <b>CLICK</b> vamos a nueva (new) <b>CLICK</b> donde nombramos los componentes que se van a usar en la simulación. Se abre una pestaña donde ingresamos el nombre del componente que se quiere estudiar. La siguiente figura muestra los elementos nombrados en esta situación.</p>				



### 2.6 Excepciones en la Huella de Carbono

Quedan excluidos los factores del "Área 3", la huella de carbono derivada del transporte de plásticos a las instalaciones de reciclaje y del transporte de los operadores de las plantas.

**Tabla 13.**

*Exclusiones del Área 3.*

Materia Prima de plástico; kg/Batch	250	lts	g/lns	
Producción de Crudo Pirolítico; kg/Batch	128	150,6	39,8	
Densidad del Crudo Pirolítico; g/cm3	0,85			
Consumo de Parafina; kg/Batch	60			
Consumo de Gas en proceso; kg/Batch	25			
Quema de Gas en TEA; kg/Batch	10			
Contenido de C en la Parafina; %	85,05			
Contenido de C en el Gas; %	83			
Cantidad de C quemado de Parafina en proceso; kg/batch	51,03			
Cantidad de C quemado de Gas en Proceso	20,75			
Cantidad de C quemado de Gas en TEA	8,3			
CO2 producido por el C de Parafina quemada en el proceso; kg/Batch	187,11			
CO2 producido por el C del Gas quemado en el proceso; kg/Batch	76,08			
CO2 producido por el C del Gas quemado en la TEA; kg/Batch	30,43			
Total del CO2 producido en el proceso de Pirólisis sin quemar el Gas de TEA; kg/Batch	263,19			
Total del CO2 producido en el proceso de Pirólisis quemando el Gas de TEA; kg/Batch	293,63			
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico sin incluir la quema del Gas de TEA; kg/kg	2,06	gr/MJ	45,69	
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico incluyendo la quema del Gas de TEA; kg/kg	2,29		50,98	
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico sin incluir la quema del Gas de TEA; kg/gl	6,62			
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico incluyendo la quema del Gas de TEA; kg/gl	7,38			
<b>PROCESO DE DESTILACION</b>				
Crudo Pirolítico a Destilación; kg/Batch	128	Densidades	Lts	g/lns
Producción de Nafta; kg/Batch	28	0,76	36,8	9,73
Producción de Kero; kg/Batch	20	0,8	25,0	6,61
Producción de Diesel; kg/Batch	64	0,89	71,9	19,00
Total de Líquidos Aprovechables producidos en Destilación; kg/Batch	112			35,34
Consumo de Parafina en Destilación; kg/Batch	11			
Cantidad de C quemado de Parafina en Destilación; kg/Batch	9,36			
CO2 producido por el C de Parafina quemada en Destilación; kg/Batch	34,3			
Huella de Carbono generada en Destilación; CO2 eq. kg/gln	0,97			
Poder Calorífico de Líquidos producidos; MJ comb/Batch	5040			
Huella de Carbono en gr/CO2 eq/Mjcomb	6,81			

*Nota:* Tomado de: (Calderón Sáenz, 2021)

Este estudio muestra que la huella de carbono de la pirólisis plástica oscila entre 6,62 y 7,38 kg CO<sub>2</sub>e en condiciones de planta piloto. Cada galón de crudo producido o cada megajulio de energía recuperada en forma de crudo de pirólisis equivale a 45 y 50 gramos de dióxido de carbono. Esta es una fracción de la huella resultante de la pérdida de aproximadamente 7 kg de plástico por galón de petróleo crudo de pirólisis producido. Es decir, en lugar de dejar una huella de plástico de 7 kg, dejamos entre 2 kg y 7 kg de dióxido de carbono. Si se pueden deducir 7 kg de plástico por galón de combustible, se neutralizarán los 6,62 kg o 7,38 kg de CO<sub>2</sub>e/g emitidos durante el proceso de pirólisis. Pero al analizar esta huella desde una perspectiva energética, haga referencia a megajulios de energía y compárela con la huella de la gasolina (desde el agua hasta el tanque). Peine 21,5gr/MJ, para motores diésel el valor es 16,7 (HOEKSTRA, 2020), vemos una huella de peine de 45 a 50gr/Mj. En otras palabras, contiene entre dos y tres veces más que el combustible convencional derivado del petróleo, del cual basta con destilar el 70%. Cabe señalar que cuando se utiliza petróleo crudo natural para producir diésel petroquímico, no se puede ignorar la huella de la materia prima, ya que la huella del petróleo crudo en el campo petrolero es, por definición, "cero". Por el contrario, por cada galón de combustible producido, la "huella" de plástico se reduce en 7 kg. La huella de carbono del proceso de destilación por pirólisis del petróleo crudo es de 6,81 g CO<sub>2</sub>e/MJ, lo que representa aproximadamente el 40% del volumen de producción de diésel petroquímico. (Incluye Minería, Refinación y Transporte (WTT - Well to Tank))

Existen algunos estudios sobre la huella de carbono, en su mayoría casos europeos (Garyfalou, p. f.), la pirólisis casi siempre se compara con la incineración o la pirólisis en un vertedero. En este caso, la pirólisis siempre tiene una ventaja. Otros estudios se han centrado en

las emisiones de contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono, así como en trazas de metales como vanadio, níquel, mercurio y arsénico. En este caso, la pirólisis también resulta muy beneficiosa. En términos de gases de efecto invernadero (GEI), la pirólisis se compara favorablemente con el refinado de petróleo crudo ligero. Sin embargo, la pirólisis hace que el plástico desaparezca, lo que da como resultado una huella de carbono "plástica" negativa que debe restarse de la huella de carbono.

### Referencias

Aspen Plus. (2023). *AspenTech*. Obtenido de <https://www.aspentech.com/en/>

Berrueco, C. M. (2002). Production of waxes and tars from the continuous pyrolysis of high density polyethylene. Influence of operation variables. *Energy & Fuels*, 16, 1148-1153.

BESTON - RECYCLING FOR BETTER LIFE. (2023). *Planta de pirólisis*. Obtenido de [https://www.bestongrupo.es/planta-de-pirolisis/?network=g&xilie=Search-plantadepirolisis&adgroup=plantadepirolisis&FuJiaLink=&device=c&keyword=equipo%20de%20pirolisis&ads=&gclid=CjwKCAiAg9urBhB\\_EiwAgw88manLCYTkJLQ5viMbENakV6UkoVKJc67DtJ\\_L4ukiWyVvVZUJ54Okv](https://www.bestongrupo.es/planta-de-pirolisis/?network=g&xilie=Search-plantadepirolisis&adgroup=plantadepirolisis&FuJiaLink=&device=c&keyword=equipo%20de%20pirolisis&ads=&gclid=CjwKCAiAg9urBhB_EiwAgw88manLCYTkJLQ5viMbENakV6UkoVKJc67DtJ_L4ukiWyVvVZUJ54Okv)

Beston Group Co., Ltd. (2024). *PLANTA DE PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS*. Obtenido de <https://www.bestongroup.com/es/waste-plastic-pyrolysis-plant/>

BESTON GROUP CO.,LTD. (2024). *PLANTA DE PIRÓLISIS*. Obtenido de <https://www.bestongrupo.es/planta-de-pirolisis/>

Calderón Sáenz, F. (29 de noviembre de 2021). *CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE PLASTICOMBUSTIBLES*. Obtenido de Calderón Laboratorios Ltda.:

<http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Calculo%20de%20la%20Huella%20de%20Carbono%20en%20la%20Produccion%20de%20Plasticcombustibles.pdf>

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX. Ministerio de Transporte y Agenda Urbana. Gobierno de España. (diciembre de 2013). *Residuos Plásticos*. Obtenido de Catálogo de residuos utilizables en construcción: <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/252/valorizacion-energetica.html>

Cozzani, V. (1997). Characterization of coke formed in the pyrolysis of polyethylene. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36, 5090-5095.

DOING. (2023). *En segundo lugar: Productos / Planta de reciclaje*. Obtenido de Planta de reciclaje:

[https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis\\_plant/recycling\\_machines/coste\\_of\\_used\\_tyre\\_recycling\\_palnt\\_290.html](https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_plant/recycling_machines/coste_of_used_tyre_recycling_palnt_290.html)

Fernandez Diez, P. (22 de mayo de 2018). *XXVIII.- CENTRALES QUE QUEMAN BASURAS*. Obtenido de nanopdf.cpm: [https://nanopdf.com/download/xxviii-centrales-que-queman-basuras\\_pdf](https://nanopdf.com/download/xxviii-centrales-que-queman-basuras_pdf)

Ferreira Pozo, B. (28 de mayo de 2009). *Aprovechamiento térmico de los residuos de envase plásticos*. Obtenido de CÁTEDRA CEMEX DE SOSTENIBILIDAD: [https://catcemexsost.webs.upv.es/wp-content/uploads/Presentaci%C3%B3n-Beatriz-Ferreira\\_C%C3%A1tedra-CEMEX.pdf](https://catcemexsost.webs.upv.es/wp-content/uploads/Presentaci%C3%B3n-Beatriz-Ferreira_C%C3%A1tedra-CEMEX.pdf)

Globally Aktualno. (29 de julio de 2018). *La incineración de residuos salva los océanos y genera electricidad*. Obtenido de <https://globalno-aktualno.com/2018/07/seziganje-odpadkov-resuje-oceane-in-proizvaja-elektriko/>

Henan Doing Maquinaria S.L. (2014). *Planta de pirolisis*. Obtenido de [https://es.wastetireoil.com/pyrolysis\\_plant/pyrolysis\\_plant/waste\\_plastic\\_pyrolysis\\_mach\\_ine\\_192.html](https://es.wastetireoil.com/pyrolysis_plant/pyrolysis_plant/waste_plastic_pyrolysis_mach_ine_192.html)

*MANUAL DE GESTION INTEGRAL - RESIDUOS SOLIDOS URBANOS - CAPITULO V - TRATAMIENTO - Parte 4 - Incineración*. (s. f.). Obtenido de [https://www.cempre.org.uy/docs/manual\\_girsu/parte\\_4\\_incineracion.pdf](https://www.cempre.org.uy/docs/manual_girsu/parte_4_incineracion.pdf)

## Apéndice C. Viabilidad Económica

### 1. Antecedentes Económicos:

#### 1.1 Alcances del estudio de ingeniería

##### 1.1.1 Procesos de producción

La pirolisis es el proceso químico más efectivo para convertir los residuos sólidos plásticos en energía.

##### 1.1.2 Efectos económicos del proceso:

Se parte de la capacidad diaria para buscar la cotización de una planta de pirolisis básica que permita cumplir con estos parámetros, que se observan en la siguiente tabla de características:

**Tabla 1.**

*Tabla de características*

Model	BLL-16	BLL-30
Salida	12-16t/d	30-35t/d
Proceso de Trabajo	Semicontinuo	Fully continuous
Tamaño del Reactor	φ2800*7100mm	φ1800*18500mm
Material del Reactor	Q245R	310S stainless steel
Sistema de Manejo	500 reductor+7.5kw motor de accionamiento	Reductor ZQH650-50+motor de conversión de frecuencia de 15kw
Terreno (L*A*A)	30m*13m*8m	70m*20m*10m
Poder	55.6kw	256kw
Quemador	2*400,000 kcal	2.5 million kcal per set
Peso Total de los Materiales Enviados	Alrededor de 34.5t	Alrededor de 150t
Número de Contenedores	1*40FR+2*40HQ	25m*8m bulk cargo+8*40HQ
Ruido (dB)	≤60	≤60
Materiales de Calefacción	Diesel, natural gas, heavy oil, biomas, etc.	
Sistema de Condensación	Condensador Vertical φ820*3600 Área de condensación de una sola pieza 35.6m <sup>2</sup> Condensador 3 en 1 8000*2260*2500 Área de condensación 49.5m <sup>2</sup>	φ920*3200 2 juegos de condensador vertical

*Nota:* Se considera la planta BLL-30 para este proceso de pirolisis. Tomado de: (BESTON - RECYCLING FOR BETTER LIFE, 2023)

Durante el estudio de los procesos de pirolisis requerido para valorar la viabilidad técnica del proyecto que se pueden aplicar a los plásticos se hacía necesario conocer las capacidades máximas y mínimas que una máquina de pirolisis puede realizar y las características de cada proceso. Este cuadro muestra la característica de un proceso de pirolisis en dos tipos de reactores que proporciona la caracterización de una maquina diseñada con dos tipos de capacidades

diferentes y el tipo de material a procesar.

## 1.2 Estudio de Mercado

La energía producida de los plásticos reciclados es un producto muy necesario en el mercado objetivo proyectado del área metropolitana de Bucaramanga.

Los altos costos de la energía actual distribuida desde las hidroeléctricas y canalizada a través de tendidos de redes de energía corriente y alterna de baja y alta tensión son establecidas según las proyecciones económicas vigentes.

Lo anterior, deja evidenciar que dichos costos encarecen los márgenes económicos de vida cotidiana y son muy costosos para la gente de común de un estrato social promedio.

Es por ello, que en la actualidad se encuentran diversos proyectos que buscan más alternativas de energía como la eólica mediante el uso de las turbinas, la solar mediante el uso de paneles entre otras.

La pirolisis nos garantiza energía a partir de residuos plásticos que son difíciles de procesar, reusar y reutilizar e incluso de ella se puede obtener un gas llamado Syngas que sirve para alimentar un motor eléctrico.

Distribución de energía del plástico no reciclado (Revista ei, 2018).

### 1.2.1 Posibles Productos

**Tabla 2.**

*Posibles productos*

Productos finales	Usos
Acete de pirolisis	1. Venta directa 2. Como combustible para acerías, plantas de calderas y plantas de cemento; 3. Transformado en fuel oil, mezclado con gasóleo estándar para maquinaria, barcos, etc.
Negro de humo	1. Hecho en briquetas como combustible; 2. Producción de nuevos productos de caucho; 3. Mezclado con materiales de construcción para hacer ladrillos y modificadores de asfalto.
Alambre de acero	1. Ser vendido directamente; 2. Ser utilizado en la fábrica de acero para producir barras y varillas de acero.

*Nota:* Tomado de: (BESTON - RECYCLING FOR BETTER LIFE, 2023)

Antes de definir el proceso que se requiere para transformar los plásticos, se hace necesario conocer el tipo de productos finales que se lograrían de este proceso, de esta forma se puede realizar la viabilidad técnica de dicho proceso, como una de las opciones. En este cuadro se puede observar las diferentes utilidades que algunos materiales o productos finales que se pueden dar después de realizado el proceso de pirolisis.

### 1.3 Estudio comercial

El proceso de comercialización de la energía generada de la pirolisis requiere una cantidad considerable de basuras sólidas plásticas y el procesamiento de generación de la misma hace necesario unas instalaciones físicas donde se puedan realizar dichos procesos, la cual se puede caracterizar como una planta de producción de energía.

Estos procesos químicos más que ser procesos delicados requieren de condiciones mínimas de caracterización en espacio, maquinaria, elementos de almacenaje, transformación y espacios de aplicación de dichas transformaciones.

Además, se debe considerar los producto o materias primas que quedan de un proceso como la pirolisis y que funcionan comercialmente para la industria petroquímica, estos materiales son: propileno, gases sintéticos, buteno aceites, carbón y etileno, entre otros.

#### Figura 1.

*Productos del proceso de Pirólisis*



Tomada de: (DOING, 2023)

Cabe mencionar que, al generar tantos productos de este tratamiento térmico, es un proyecto considerado viable comercialmente, debido a la gran cantidad de industrias que tiene en el mercado objetivo, del cual se desprenden muchas industrias que trabajarían con la totalidad de los productos resultantes de este proceso.

#### 1.4 Estudios Financieros

Lo primero que se debe tener presente es que la mayoría de los plásticos se obtienen de la recopilación que hacen las empresas recicladoras que compran los plásticos que son desechados en unidades familiares o en industrias que no les dan mas uso o los consideran desecho.

Por lo anterior, lo primero que se debe contemplar es el hecho de la compra misma por parte de las empresas recicladoras que se encargan de realizar una primera limpieza, selección y agrupación por tipo de plásticos, peso de este, definición de cantidades totales recicladas por tipo de plástico. Entre otros indicadores pertinentes para este tipo de procesos.

##### 1.4.1 Costos de compra de los plásticos según su tipo en Bucaramanga

**Tabla 2.**

*Costos de compra de los plásticos según su tipo en Bucaramanga*

Descripción	Precio plástico reciclado por tipo			
	Nomenclatura	Unid	Cant	Vr und
Poliestireno	Ps	Kg	1	1350
Polietileno de baja densidad	Ldpe	Kg	1	2530
Polietileno de alta densidad	Hdpe	Kg	1	2850
Polietileno tereftalato	Pet	Kg	1	1150
Policloruro de vinilo	Pvc	Kg	1	498
Polipropileno	Pp	Kg	1	1376

Tomado de: (Acoplásticos, 2023)

Una vez se completa el estudio técnico, se hace necesario iniciar el estudio financiero, para lo cual se debe conocer el precio por kilo de cada uno de los tipos de plásticos que se pueden conseguir en el área metropolitana. Esta tabla presenta la relación del tipo de plásticos que se puede conseguir en la ciudad de Bucaramanga y sus alrededores, además, los precio de

ellos, por kilo, esta información es la base para saber la viabilidad financiera de este proyecto.

#### 1.4.2 Costo Anual (Cantidades Producidas Diarias en el AMB)

**Tabla 3.**

*Costo Anual (Cantidades Producidas Diarias en el AMB)*

Nomenclatura	Unid	Cant	Vr und	Vr mensual	Vr anual
PS	KG	28.601,42	1350	38.611.917,00	463.343.004,00
LDPE /PEBD	KG	66.133,64	2530	167.318.109,20	2.007.817.310,40
HDPE /PEAD	KG	18.661,38	2850	53.184.933,00	638.219.196,00
PET	KG	27.059,00	1150	31.117.850,00	373.414.200,00
PVC	KG	7.864,44	498	3.916.491,12	46.997.893,44
PP	KG	22.431,74	1376	30.866.074,24	370.392.890,88
TOTAL	KG	170.751,62		325.015.374,56	3.900.184.494,72

Lo anterior, permite ver que la planta debe diseñarse para procesar 170.751,62 kg mensuales de plásticos posiblemente utilizables, lo cual implica que se consideran 7 días laborables de cada semana se tiene una cantidad diaria de plásticos por kilo de 5.712,67 kg para ser procesados y a esto hay que agregarle los plásticos sucios que se reciclan a diario en el área metropolitana y otros municipios, que según el cuadro anterior se tienen 89.498,44 kg de este tipo que en determinado momento pueden servir si se contempla una zona de lavado, secado y selección de los mismos.

Entonces se debe proyectar una planta de pirolisis con una capacidad instalada para el manejo del 16% del total de los plásticos sucios que son 95.211,11 kg diarios, si se considera que el 16% sería el plástico que se puede procesar con la instalación de una zona de limpieza y secado, lo cual implica que por hora se trabajara con 2.392,18 kg por hora, de tal forma que se cuente con un margen de 107,82 kg hora que se puede completar con los plásticos sucios que se sigan incrementando, esto por la caracterización de los plásticos sucios y su efecto sobre el medio ambiente. De esta forma se realizarán cálculos para maquinaria y equipos para un promedio de 2.500 kg/h. Que llevado a toneladas día serían 20 ton/d (2.500 kg/h por 8 h de labores diarias = 20.000 kg/d)

### 1.5 Condiciones Económicas

Según el cuadro anterior, se puede obtener una perspectiva global de la cantidad de material plástico que debe trabajar en la planta que se instale para realizar el proceso mas recomendado, en este caso, se relaciona el proceso de pirólisis, por lo cual se hace necesario realizar un listado de los posibles elementos que requiere la planta, considerando la capacidad de cada maquina o equipo, así:

**Tabla 4.**

*Análisis de planta de pirólisis para plásticos reutilizables*

Análisis de Planta de Pirólisis para plasticos reutilizables				
	unidad	cantidad	valor	V. General
<b>Material plastico reutilizable</b>	plastico utilizable	5,7 toneladas/día	\$ 325.015.374,56	
<b>Material plastico sucio</b>	plastico sucio 16%	14,3 toneladas/día	\$ 5.355.000,00	\$ 330.370.374,56
<b>otros materiales por tonelada</b>	global	1	\$ 1.000.000,00	\$ 1.000.000,00
<b>Combustible</b>	aceite de pirólisis	150 kg/día	\$1000/kg	\$ 150.000,00
<b>Electricidad</b>	54kw/h	18h	Consumo diario 972 kWh	\$ 17.496,00
<b>Trabajo</b>	6 personas	1 cuadrilla/hora	\$48/persona/día	\$ 2.080.969,60
<b>aceite de pirólisis</b>	45% Rendimiento de aceite	5,85 toneladas	\$ 450,000 / tonelada	\$ 2.632.500,00
<b>Carbón</b>	30% de rendimiento	3,9 toneladas	\$ 250,000/ tonelada	\$ 975.000,00
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>\$ 337.226.340,16</b>

Esta relación muestra los costos de inversión de la máquina de pirólisis para poder procesar un tope de 20 toneladas de plástico para el transformar.

Una vez se analizan los cuadros anteriores se pueden observar las capacidades diarias de plásticos a procesar y esto permite consolidar la información financiera que se debe conocer para dar inicio al diseño de la planta de pirólisis que se necesita con el fin de hacer un proyecto eficiente y rentable.

Ya que el diseño de la planta no solo debe proyectar la maquina a utilizar para realizar el proceso, sino la necesidad de espacios de almacenamiento, limpieza, secado, proceso de pirólisis, ubicación de productos finales, oficinas administrativas y contables además de oficinas de mercadeo y ventas de los productos finales. Lo anterior, lleva a definir el tamaño del lote a conseguir y el lugar donde se puede pensar sea su ubicación final.

### Referencias bibliográficas

Acoplásticos. (mayo de 2023). *Precios de reciclaje*. Obtenido de PLAS-TIC Tecnologías e información para la economía circular: [https://www.plas-tic.org/precios\\_de\\_reciclaje](https://www.plas-tic.org/precios_de_reciclaje)

BESTON - RECYCLING FOR BETTER LIFE. (2023). *Planta de pirólisis*. Obtenido de [https://www.bestongrupo.es/planta-de-pirolisis/?network=g&xilie=Search-plantadepirolisis&adgroup=plantadepirolisis&FuJiaLink=&device=c&keyword=equipo%20de%20pirolisis&ads=&gclid=CjwKCAiAg9urBhB\\_EiwAgw88manLCYTkJLQ5viMbENakV6UkoVKJc67DtJ\\_L4ukiWyVvVZUJ54Okv](https://www.bestongrupo.es/planta-de-pirolisis/?network=g&xilie=Search-plantadepirolisis&adgroup=plantadepirolisis&FuJiaLink=&device=c&keyword=equipo%20de%20pirolisis&ads=&gclid=CjwKCAiAg9urBhB_EiwAgw88manLCYTkJLQ5viMbENakV6UkoVKJc67DtJ_L4ukiWyVvVZUJ54Okv)

DOING. (2023). *En segundo lugar: Productos / Planta de reciclaje*. Obtenido de Planta de reciclaje:

[https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis\\_plant/recycling\\_machines/coste\\_of\\_used\\_tyre\\_recycling\\_palnt\\_290.html](https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_plant/recycling_machines/coste_of_used_tyre_recycling_palnt_290.html)