

PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE SANTANDER PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES  
LÍQUIDOS

JAVIER EDUARDO CHACÓN SUÁREZ  
MARIA CAMILA PINILLA GRANADOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2023

PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE SANTANDER PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES  
LÍQUIDOS

JAVIER EDUARDO CHACÓN SUÁREZ  
MARIA CAMILA PINILLA GRANADOS

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordóñez  
PhD. Ingeniería Química

Codirector

Edinson Lizarazo Sánchez  
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2023

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Javier y Mary, a quienes debo todo lo que soy. Enorgullecerlos para mí es un deber y privilegio. Este logro es tan mío como de ustedes.

**Javier Eduardo Chacón Suárez**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado para todas aquellas personas que fueron parte, desde incluso el ángulo más agudo, de esta hermosa etapa de mi vida.

Una dedicatoria especial al profesor Leonidas Vásquez Chaparro, quién me enseñó a aprender a amar la ingeniería.

**María Camila Pinilla Granados**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, porque más que pedirle, tengo mucho que agradecerle. A todas las personas que han contribuido de manera significativa en mi trayecto por la Universidad, mi más sincero agradecimiento. A mis hermanos Mariana y Javier Alexi, quienes son mi referencia y modelo a seguir.

A mis amigos, mis panitas, Bryan y Alejandro, por estar incondicionalmente en las buenas, las malas y las peores. Quiero agradecer a quienes una vez fueron solo compañeros de clases en la carrera y hoy día somos grandes amigos (Mecapanas).

A mi director de proyecto por sus orientaciones y paciencia durante el proceso, y a mi compañera de proyecto y especial amiga, María Camila. Finalmente, quiero agradecer a mis profesores de la carrera, por ayudarme a trazar un camino, a descubrir mis pasiones y a forjar mi carácter. Mención especial al profesor Leonidas Vásquez Chaparro.

**Javier Eduardo Chacón Suárez**

## **AGRADECIMIENTOS**

A cada profesor, mentor, amigo y ser querido que haya estado a mi lado a lo largo de este recorrido, mi gratitud es infinita.

A todas las circunstancias, experiencias y momentos de vida que han tejido el tapiz de mi trayectoria académica. Cada desafío, cada oportunidad y cada obstáculo han sido entrelazados para moldear lo que soy ahora como profesional y como persona.

A todas las fuentes de inspiración y conocimiento. Los trabajos de otros académicos, las obras literarias y artísticas, las contribuciones científicas han sido fundamentales para mi crecimiento y desarrollo académico.

A la Coral Universitaria UIS por su invaluable regalo. Su música, su aura, sus personas desbloquearon en mi habilidades, cualidades y sensaciones que nunca hubiera descubierto por mi cuenta.

A mi director de tesis, Yesid Rueda, así como a mi compañero de tesis y amigo, Javier, por sus indispensables aportes para la elaboración de este proyecto.

A las personas más importantes de mi vida y por quienes aquí me encuentro: mi papá Fredy y mi mamá Margoth.

A mi *UY Scuti*, la estrella más grande que he encontrado en mi universo, mi hermana Daniela.

**María Camila Pinilla Granados**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS .....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
2.MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 ANTECEDENTES .....	19
2.2 CONCEPTOS.....	20
2.2.1 Material plástico .....	20
2.2.2 Tipos de plástico.....	20
2.2.3 Degradación y uso masivo .....	20
2.2.3 Tipos de polímeros plásticos .....	21
2.2.4 Pirolisis .....	22
2.2.5 Análisis próximo .....	23
2.2.6 Análisis último.....	23
2.2.7 Rendimiento .....	24
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1 PANORAMA INSTITUCIONAL .....	25
3.2 IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS MÁS ABUNDANTES.....	26
3.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN .....	26
3.4 SIMULACIÓN .....	30
3.4.1 Configuración de compuestos, propiedades y métodos: <i>PROPERTIES</i> .....	31
3.4.2 Configuración de la simulación (SIMULATION).....	35
3.4.2.1 Etapa 1: descomposición y separación del sólido .....	37
3.4.2.2 Etapa 2: reactor de pirólisis .....	42

3.4.3.3 Etapa 3: Condensado y separación del combustible.....	44
4. RESULTADOS.....	47
4.1 PANORAMA INSTITUCIONAL .....	47
4.1.1 Descripción geográfica y de población.....	47
4.1.2 Disponibilidad de residuos plásticos.....	48
4.2 IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS MÁS ABUNDANTES.....	52
4.3 REVISIÓN DE LITERATURA: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN..	54
4.3.1 Análisis próximo y análisis último .....	54
4.3.2 Rendimiento en función de la temperatura de reacción .....	57
4.3.3 Distribución de productos de pirólisis .....	63
4.4 SIMULACIÓN .....	67
4.4.1 Escenarios de pirólisis de los residuos plásticos.....	67
4.4.1.1 Polietileno Tereftalato (PET).....	68
4.4.1.2 Polietileno de alta densidad (HDPE) .....	70
4.4.1.3 Polipropileno (PP) .....	71
4.4.2 Validación de rendimientos.....	73
4.4.2.1 Polietileno tereftalato (PET).....	73
4.4.2.2 Polietileno de alta densidad (HDPE) .....	75
4.4.2.3 Polipropileno (PP) .....	77
4.4.3 Validación de productos .....	80
4.4.3.2 Polietileno de alta densidad (HDPE) .....	82
4.4.3.3 Polipropileno (PP) .....	85
5. CONCLUSIONES.....	89
6. TRABAJO FUTURO .....	91
BIBLIOGRAFIA .....	92
ANEXOS .....	97

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros para la revisión de literatura .....	27
Tabla 2. Revisión bibliográfica relacionada con la información requerida .....	28
Tabla 3. Bloques componentes de la sección DESCOMPOSICIÓN Y SECADO. ....	38
Tabla 4. Bloque componente de la sección reactor de pirólisi. ....	43
Tabla 5. Bloques componentes de la sección condensado y secado.....	44
Tabla 6. Tipos de residuos generados en la UIS – Cede Central .....	48
Tabla 7. Cantidad de residuos reciclables producida certificada por la UIS en el año 2022 .....	52
Tabla 10. Análisis elemental para PET, HDPE y PP .....	56
Tabla 9. Lista con productos de pirólisis para PET, HDPE y PP .....	63

## LISTA DE CUADROS

pág.

Cuadro 1. Análisis gravimétrico porcentual de cada tipo de plástico caracterizado .....	53
Cuadro 2. Análisis próximo para PET, HDPE y PP .....	55
Cuadro 3. Resultados de simulación para pirólisis de PET a 973°C. Fuente: autores. ...	69
Cuadro 4. Resultados de simulación para pirólisis de HDPE a 650°C .....	71
Cuadro 5. Resultados de simulación para pirólisis de PP a 400°C .....	72
Cuadro 6. Resultados de desviación estándar de fracción líquida para pirólisis de PET condensado a 25°C .....	74
Cuadro 7. Resultados de desviación estándar de fracción líquida y gaseosa para pirólisis de HDPE condensado a 25°C .....	77
Cuadro 8. Resultados de desviación estándar de fracción líquida y gaseosa para pirólisis de PP condensado a 25°C .....	79
Cuadro 9. Distribución de productos para pirólisis de PET a 773°C y condensación a 25°C .....	80
Cuadro 10. Distribución de productos para pirólisis de HDPE a 580°C y condensación a 25°C .....	83
Cuadro 11. Distribución de productos para pirólisis del PP a 300°C y condensación a 25°C .....	85

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tipos de plástico según su clasificación numérica (SPI).....	22
Figura 2. Configuración de inicio en Aspen Plus®.....	30
Figura 3. Configuración para añadir componentes a utilizar en la simulación.....	32
Figura 4. Componentes utilizados en simulación de pirólisis de PP.....	32
Figura 5. Configuración de métodos y propiedades .....	33
Figura 6. Creación de variable poder calorífico .....	33
Figura 7. Introducción del poder calorífico para el PP .....	34
Figura 8. Selección de métodos para el cálculo de entalpías y densidades del material de entrada no convencional .....	34
Figura 9. Configuración global de simulación.....	35
Figura 10. Pasos para crear corriente con material de entrada.....	36
Figura 11. Configuración de la corriente de entrada no convencional .....	37
Figura 12. Esquema de planta empleado para las simulaciones .....	37
Figura 13. Configuración de los componentes a la salida del bloque DESCOMP.....	39
Figura 14. Menú de configuración de variables del bloque de cálculo C-1 .....	40
Figura 15. Lista de variables definidas con respectivos atributos.....	40
Figura 16. Rutina en FORTRAN para los cálculos .....	40
Figura 17. Configuración de pestaña Sequence .....	41
Figura 18. Configuración del bloque SEP .....	42
Figura 19. Configuración del reactor RGibbs .....	44
Figura 20. Pasos para configurar separador FLASH.....	46
Figura 21. Distribución de la Comunidad Universitaria UIS, Cede Central.....	48
Figura 22. Distribución porcentual de los residuos entregados a la Misión Recicla en el año 2022 .....	50
Figura 23. Distribución porcentual de los residuos entregados a ESP en el año 2022 ..	51

Figura 24. Caracterización de los residuos plásticos disponibles en la universidad. De izquierda a derecha: PP, PET, HDPE y PS.....	53
Figura 25. Rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PET a temperatura de condensación de 25°C .....	59
Figura 26. Rendimiento de fracción líquida para pirólisis de HDPE a temperatura de condensación de 25°C .....	60
Figura 27. Rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de HDPE a temperatura de condensación de 25°C .....	60
Figura 28. Rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PP a temperatura de condensación de 25°C .....	62
Figura 29. Rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de PP a temperatura de condensación de 25°C .....	63
Figura 30. Esquema de planta para la simulación de pirólisis de PET .....	69
Figura 31. Esquema de planta para la simulación de pirólisis de HDPE .....	70
Figura 32. Esquema de planta para la simulación de pirólisis de PP .....	72
Figura 33. Comparación de rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PET con temperatura de condensación de 25°C .....	74
Figura 34. Comparación de rendimiento de fracción líquida para pirólisis de HDPE con temperatura de condensación de 25°C .....	76
Figura 35. Comparación de rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de HDPE con temperatura de condensación de 25°C .....	76
Figura 36. Comparación de rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PP con temperatura de condensación de 25°C .....	78
Figura 37. Comparación de rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de PP con temperatura de condensación de 25°C .....	78

## LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Residuos plásticos entregados a la misión recicla de la alcaldía de la ciudad de Bucaramanga y EMAB .....	97
Anexo B. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en marzo/2022 - EDEPSA ESP .....	98
Anexo C. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en abril/2022 - EDEPSA ESP .....	100
Anexo D. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en mayo/2022 - EDEPSA ESP .....	102
Anexo E. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en junio/2022 - EDEPSA ESP .....	104
Anexo F. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en agosto/2022 - EDEPSA ESP .....	106
Anexo G. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en septiembre/2022 - EDEPSA ESP .....	108
Anexo H. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en octubre/2022 - EDEPSA ESP .....	110
Anexo I. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en noviembre/2022 - EDEPSA ESP .....	112
Anexo J. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en diciembre/2022 - EDEPSA ESP .....	114
Anexo K. Condiciones de operación de los reactores de pirólisis revisados en la literatura para la obtención de productos comunes.....	116

## RESUMEN

**TÍTULO:** PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS\*

**AUTORES:** JAVIER EDUARDO CHACÓN SUÁREZ, MARÍA CAMILA PINILLA GRANADOS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** PIROLISIS, RESIDUOS PLÁSTICOS, COMBUSTIBLES LIQUIDOS, POLIESTIRENO, POLIETILENO, POLIPROPILENO

### DESCRIPCIÓN:

Los plásticos de un solo uso han llamado la atención en las últimas décadas debido a su alta demanda y los esfuerzos limitados de reciclaje. Al mismo tiempo, la pirólisis de plásticos ha despertado interés en diversos sectores como una alternativa para abordar los problemas de generación de residuos, proporcionando un ciclo de vida circular y apoyando el desarrollo sostenible. El presente proyecto de grado pretende analizar la conversión de los plásticos más comunes generados en la sede central de la Universidad Industrial de Santander en un producto con mayor valor energético mediante la pirólisis.

Inicialmente se determina la disponibilidad mensual de plásticos en el flujo de residuos e identifican los tipos más frecuentes utilizando la clasificación SPI. A continuación, se realiza un estudio fisicoquímico de los polímeros y se crean modelos matemáticos para predecir su comportamiento durante la pirólisis, así como para consolidar los posibles compuestos químicos presentes en los productos resultantes. En la sección final, se utiliza el software Aspen Plus® para simular la pirólisis de los polímeros seleccionados en la primera sección.

Se determinó que la universidad cuenta con una disponibilidad mensual de 60,4 kg de plásticos, siendo el PET, el HDPE y el PP los más abundantes, representando el 54%, 22% y 18%, respectivamente. Las simulaciones revelaron que el rendimiento de la fracción líquida disminuye con el aumento de la temperatura de reacción, y que los productos resultantes contienen principalmente hidrocarburos aromáticos, ampliamente utilizados en la vida cotidiana.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordóñez, Doctorado en Ingeniería Química.

## ABSTRACT

**TITLE:** PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS\*

**AUTHORS:** JAVIER EDUARDO CHACÓN SUÁREZ, MARÍA CAMILA PINILLA GRANADOS\*\*

**KEYWORDS:** PIROLISIS, RESIDUOS PLÁSTICOS, COMBUSTIBLES LIQUIDOS, POLIESTIRENO, POLIETILENO, POLIPROPILENO

### DESCRIPTION:

Single-use plastics have gained attention in recent decades due to their high demand and limited recycling efforts. In parallel, plastic pyrolysis has sparked interest across various sectors as an alternative to address waste generation issues, providing a circular lifecycle and supporting sustainable development. The project's objective is to analyze the conversion of the most common plastics generated at the Universidad Industrial de Santander into a product with higher energy value through pyrolysis.

The first step involves determining the monthly availability of plastics in the waste stream and identifying the most frequent types using the SPI classification. Next, a physical-chemical study of the polymers is conducted, along with the creation of mathematical models to predict their behavior during pyrolysis, as well as the consolidation of potential chemical compounds present in the resulting products. In the final section, the Aspen Plus® software is used to simulate the pyrolysis of the selected polymers from the first section.

The university was found to have a monthly availability of 60.4 kg of plastics, with PET, HDPE, and PP being the most abundant, representing 54%, 22%, and 18%, respectively. The simulations revealed that the yield of the liquid fraction decreases with increasing reaction temperature, and the resulting products primarily contain aromatic hydrocarbons, widely utilized in everyday life.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordóñez, PhD in Chemical Engineering.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son una de las problemáticas ambientales, sanitarias y económicas más crónicas de la mayoría de los países en desarrollo.<sup>1</sup> Curiosamente, la gran mayoría de estos RSU consisten en desechos plásticos, la mayoría de los cuales no son biodegradables. Anualmente, según datos de la *Asociación Plastics Europe*, se estima que se generan aproximadamente 400 millones de toneladas de estos residuos plásticos a nivel mundial.

En Colombia, el sector plástico llegó a generar 1,4 millones de toneladas en 2022 y, según el PGIRS (Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos), en el área metropolitana de Bucaramanga alrededor del 51% de los residuos ordinarios recolectados no aprovechables corresponden a plásticos, siendo estos destinados al relleno sanitario “el carrasco”. Así, la mayor coyuntura puede radicar en la explotación de recursos naturales no renovables y problemas de disposición y tratamiento de residuos.<sup>2</sup>

En búsqueda de soluciones a esta problemática medio ambiental se han planteado algunas técnicas para tratar con los residuos plásticos. De aquí destacan el reciclado mecánico, el aprovechamiento energético y el reciclado químico, donde se encuentran pirólisis y gasificación.

La pirólisis es un proceso mediante el cual un material sólido o líquido experimenta una descomposición térmica en moléculas más pequeñas y volátiles, sin ninguna interacción

---

<sup>1</sup> MONTES CORTÉS, Carolina. Estudio de los Residuos Sólidos en Colombia. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, 2018. ISBN: 9789587729245.

<sup>2</sup> MANCHENO, Myriam, *et al.* Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. En: *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*. 2016, vol. 23, nro.1, pp. 60-67.

con el oxígeno u otros agentes oxidantes.<sup>3</sup> Dicha tecnología se encarga de producir aceites de pirólisis para reemplazar a los combustibles fósiles convencionales. Su capacidad para manipular plástico sucio y sin clasificar es una de las grandes ventajas que presenta esta tecnología, además de la no emisión de gases tóxicos o nocivos, a diferencia de la incineración de los residuos.<sup>4</sup> Así, este método contribuye en aprovechamiento y la disminución de la cantidad de residuos plásticos acumulados.

A partir de la ejecución del presente trabajo de grado, se buscan respuestas ante interrogantes como los siguientes: ¿Es posible transformar los residuos plásticos en un producto de mayor valor energético a través de un proceso de pirólisis?, ¿de qué factores depende los tipos de productos obtenidos?, ¿es viable obtener resultados fidedignos a partir de una simulación de un proceso de pirolisis?

---

<sup>3</sup> ARACIL SÁEZ, Ignacio. Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP) [en línea]. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 2008. [Consultado 10 febrero 2023]. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis\\_doctoral\\_ignacio\\_aracil.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf)

<sup>4</sup> Ibid., p. 184.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar el proceso de transformación de residuos plásticos en un producto de mayor valor energético a través de un proceso de pirólisis en la Universidad Industrial de Santander

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Clasificar los tipos de residuos plásticos a utilizar en el proceso según la disponibilidad en la Universidad Industrial de Santander.
- Determinar modelos matemáticos que predigan el comportamiento de la pirólisis de distintos residuos plásticos en función de la temperatura.
- Validar los rendimientos y productos obtenidos de la simulación de pirólisis en Aspen Plus® con los estudios fuente de los modelos matemáticos

## 2.MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES

La pirólisis de plásticos de un solo uso ha despertado un creciente interés como una posible solución para abordar los problemas relacionados con estos residuos. Los plásticos de un solo uso, como las bolsas de plástico y los envases de comida para llevar, representan una importante fuente de contaminación y desechos.<sup>5</sup> La pirólisis se considera una alternativa prometedora para gestionar de manera más sostenible estos plásticos.

El proceso de pirólisis de plásticos de un solo uso implica calentarlos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Esto provoca la descomposición de los polímeros del plástico en diferentes productos, como gases, líquidos y sólidos. Estos productos pueden utilizarse como combustibles o materias primas químicas, y los sólidos pueden aprovecharse como carbono activado o en la fabricación de materiales de construcción. El rendimiento y la calidad de los productos obtenidos mediante la pirólisis pueden variar según diversos factores, como el tipo de plástico, las condiciones de pirólisis y el proceso utilizado.<sup>6</sup> Se han llevado a cabo investigaciones y desarrollos tecnológicos para mejorar la eficiencia y la calidad de los productos, así como para controlar las emisiones y minimizar los impactos ambientales.

A pesar de los avances, la pirólisis de plásticos de un solo uso aún enfrenta desafíos tecnológicos, económicos y reglamentarios. Es necesario optimizar los procesos, seleccionar adecuadamente los plásticos a tratar y gestionar correctamente los subproductos y residuos generados. No obstante, la pirólisis ofrece oportunidades para

---

<sup>5</sup> LINDWALL, Courtney. Plásticos de un solo uso 101. En: NRCD [Sitio Web]. Nueva York: Guide. [Consulta 11 de febrero 2023]. Disponible en: <https://www.nrcd.org/es/stories/plasticos-solo-uso-101#evitar>

<sup>6</sup> DÍAZ CALEÑO, Fardy. Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente. [Consulta 11 febrero 2023]. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf?sequence=5>

reducir la dependencia de los combustibles fósiles, promover la economía circular y abordar la problemática de los plásticos de un solo uso.

## **2.2 CONCEPTOS**

**2.2.1 Material plástico.** El plástico es un material ligero, higiénico y resistente que se puede moldear de distintas maneras y utilizar en una amplia gama de aplicaciones.<sup>7</sup> Se trata de un material sintético que se obtiene a partir del petróleo, adaptable a diferentes necesidades mediante procesos de polimerización del carbono. Sus características, como su resistencia, versatilidad, elasticidad y bajo costo, han hecho que algunas materias primas tradicionales sean reemplazadas en diversas aplicaciones, por lo que es un material presente en numerosos elementos cotidianos, tales como ropa, empaques de alimentos, bolsas, pitillos, vasos, entre otros.<sup>8</sup>

**2.2.2 Tipos de plástico.** Los plásticos pueden clasificarse según su respuesta al calor. Bajo este criterio, se distinguen dos tipos:

- **Termoplásticos:** se trata de una categoría de plásticos que pueden ser moldeados y deformados a temperatura ambiente. Al calentarse, se vuelven líquidos y al enfriarse se solidifican en estado vítreo. Estos procesos son reversibles, lo que significa que se pueden repetir varias veces, permitiendo su reutilización y reconfiguración.
- **Termoestables:** pertenecen a una familia de plásticos que experimentan cambios químicos irreversibles al ser calentados. Una vez calentados, no se pueden refundir ni reformar, lo que implica que no son susceptibles a procesos térmicos reversibles.

**2.2.3 Degradación y uso masivo.** El plástico es un material económico, versátil y duradero. Sin embargo, su uso masivo ha llevado a que el 7% del peso y el 20% del

---

<sup>7</sup> ONU MEDIO AMBIENTE. Plásticos de un solo uso: Una hoja de ruta para la sostenibilidad. 2018. p. 1-104.

<sup>8</sup> MASP y GREENPEACE COLOMBIA. Colombia, mejor sin plásticos. La contaminación plástica en Colombia y el mundo. 20'18.

volumen de los residuos domésticos sean plásticos.<sup>9</sup> A diferencia de los metales, los plásticos no se oxidan ni se corroen, pero en lugar de biodegradarse, se foto-degradan en micro plásticos. Según la ONU en 2018, los plásticos de un solo uso representaron el 36% de la producción mundial de plásticos en 2015, con un promedio de 400 millones de toneladas. Actualmente, el plástico es el principal residuo marino, con aproximadamente 46,000 fragmentos de plástico flotando por cada milla cuadrada de océano.<sup>10</sup>

### **2.2.3 Tipos de polímeros plásticos**

Los polímeros son un tipo particular de macromolécula que se caracteriza por tener una unidad que se repite a lo largo de la molécula. Además, la composición de los plásticos también le otorgan cierta naturaleza visual o de aspecto físico. A partir de esto dos parámetros, se puede derivar otra clasificación, en este caso para los residuos plásticos, según el polímero principal que haya en su estructura. Los polímeros más utilizados en la producción de plásticos de un solo uso son [15.1]:<sup>11</sup>

- Polietileno de baja densidad (PEBD): se fabrican bolsas, bandejas, recipientes, películas para envolver alimentos. Es ligero, flexible y de color lechoso. Puede llegar a ser transparente dependiendo de su espesor.
- Polietileno de alta densidad (PEAD): botellas de leche, bolsas para el congelador, botellas de champú, recipientes helados. Es opaco y de aspecto ceroso. Se puede encontrar en todas las tonalidades transparentes y opacas.
- Polietileno tereftalato (PET): se fabrican botellas de agua y otras bebidas, recipientes para el suministro de líquidos de limpieza. Tiene textura translúcida, cristalina y con brillo.
- Polipropileno (PP): platos aptos para microondas, tintas de helados, bolsas de papas fritas, tapas de botellas. Es de las resinas termoplásticas más comunes, Tiene textura translúcida y cerosa.

---

<sup>9</sup> SMV. Cómo realizar el correcto tratamiento de los residuos plásticos. Servicios Medioambientales de Valencia. 2019.

<sup>10</sup> ONU MEDIO AMBIENTE, Op. Cit., p. 12.

<sup>11</sup> MANCHERO, Op. Cit., p. 87.

- Poliestireno (PS): se fabrican platos, vasos y cubiertos. Se puede encontrar de apariencia transparente o blanca. Es duro y quebradizo. Produce ruido metálico cuando es sometido a un impacto.

El código internacional SPI (Society of Plastics Industry, Inc.), permite identificar cada tipo de plástico con un número y/o sus siglas respectivas. Esta clasificación aporta facilidad al momento del proceso de reciclaje (ver Figura 1).

Figura 1. Tipos de plástico según su clasificación numérica (SPI)



Fuente: SOCIETY OF PLASTICS INDUSTRY, INC. National Geographic elimina el plástico de su magazine y lo sustituye por papel reciclado.

**2.2.4 Pirolysis.** Es un proceso químico complejo que implica una serie de reacciones influidas por diferentes factores. Estos factores incluyen la composición y estructura de la materia que se está tratando, así como la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo que se mantiene la materia a altas temperaturas, la velocidad

de enfriamiento y la temperatura de todo el proceso. Todos estos elementos tienen un impacto en cómo se lleva a cabo la pirólisis y en los productos finales obtenidos.<sup>12</sup>

Durante la pirólisis, se generan gases que pueden ser enfriados y condensados para obtener aceites o ácidos piroleñosos, que son la parte líquida del proceso. El rendimiento y las características de estos productos finales dependen de las condiciones de operación, siendo la temperatura el factor más importante. A medida que aumenta la temperatura, se obtiene una mayor cantidad de gases en comparación con los aceites. Esta relación entre temperatura y rendimiento es clave para controlar las propiedades fisicoquímicas de los productos obtenidos.<sup>13</sup>

### **2.2.5 Análisis próximo**

Es una técnica utilizada para determinar la composición elemental aproximada de una muestra orgánica. El análisis próximo incluye la determinación de la cantidad de materia orgánica volátil, humedad, cenizas y carbono fijo. Esto es importante porque la composición de la muestra puede influir en los productos finales de la pirólisis, como la cantidad y calidad del biocarbon (carbón vegetal), gases y líquidos generados. Esta información suele obtenerse mediante análisis de laboratorio específicos y puede variar dependiendo del tipo de combustible utilizado [17.1].<sup>14</sup>

### **2.2.6 Análisis último**

El análisis último se refiere a la determinación de la composición elemental de algún material orgánico, como la cantidad de carbono (*C*), hidrógeno (*H*), oxígeno (*O*), nitrógeno (*N*), azufre (*S*) y cloro (*Cl*). Esto es importante para entender la calidad de los productos

---

<sup>12</sup> BRIDGWATER, A. V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids [en línea]. En: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999, vol. 51, nro. 1-2. [Consulta 12 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237099000054>

<sup>13</sup> DEMIRBAS, A. The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. En: *Fuel Processing Technology*, 2007, vol. 6.

<sup>14</sup> BENÉS GONZÁLEZ, Mario. Hidrodesoxigenación de Bio-oil procedente de la pirólisis flash de biomasa [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Universidad Zaragoza, 2017. [Consulta 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/64027/files/TAZ-TFG-2017-3457.pdf>

finales y cómo se pueden ajustar las condiciones de pirolisis para obtener productos más puros o específicos.<sup>15</sup>

**2.2.7 Rendimiento.** El rendimiento, en relación con procesos termoquímicos, se refiere a la cantidad relativa de productos generados a partir de la biomasa o combustible sometido al proceso de pirolisis. Este rendimiento puede variar dependiendo de diferentes factores, como la composición de la biomasa, las condiciones de la pirolisis y los productos específicos que se quieran obtener. Algunos estudios han reportado rendimientos de bio-oil (un líquido similar al petróleo) entre el 35% y el 75% en pirolisis de diferentes tipos de biomasa, mientras que el rendimiento de gas puede variar entre el 10% y el 50%.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> Ibid., p. 77.

<sup>16</sup> AGUIAR TRUJILLO, L., et al. Rendimiento de los productos del proceso de pirolisis en lecho fijo de los residuos de naranja del proceso de obtención de jugos concentrado en la provincia de Pinar del Río, Cuba. En: *Ingeniería Mecánica*, 2009, vol. 12, nro. 3, pp. 67-74.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 PANORAMA INSTITUCIONAL

La inclusión de cierta información enmarcada en el contexto institucional brinda los fundamentos necesarios para la comprensión y dimensión de los entornos de procedencia y generación de los residuos plásticos.

La Unidad de Información y Análisis Estadístico (UIAES),<sup>17</sup> desempeñó un papel crucial en la recopilación y gestión de datos relevantes. Se consiguió acceder a información demográfica, indicadores académicos, poblacionales y otros elementos clave para el análisis del panorama institucional.

En cuanto a la información relacionada con la producción y gestión de residuos del campus universitario, se realizaron inicialmente consultas en la literatura institucional contenida en el catálogo bibliográfico de la biblioteca de la universidad. Posterior a ello, a través de la información suministrada por la división de planta física universitaria, es posible comprobar y consolidar a través de los procesos de gestión de residuos de años anteriores, la disponibilidad aproximada en kilogramos con la ecuación 1, donde:

$$D = \frac{G_{plástico}}{m} \left[ \frac{Kg}{mes} \right] \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde  $D$ , es disponibilidad mensual aproximada de residuos plásticos generados por mes,  $G_{plástico}$  es la cantidad de plástico disponible en kilogramos y  $m$  el número de meses de la toma de datos.

---

<sup>17</sup> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. UIS en cifras [sitio web]. Bucaramanga. [Consulta 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://uis.edu.co/uis-cifras-es/>

### 3.2 IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS MÁS ABUNDANTES

Para identificar los tipos de residuos plásticos potenciales para el proceso de pirólisis, uno de los factores más influyentes es su disponibilidad. Para ello, con el respaldo nuevamente de la división de planta física, se llevó a cabo la caracterización y análisis gravimétrico de los residuos plásticos. Para este propósito, se realizaron los muestreos de residuos plásticos generados durante tres semanas en el campus central, uno cada semana. Para cada muestreo, se determinó el peso total del material recolectado a través de una báscula tipo gancho Trumax Xenit.<sup>18</sup> A continuación, se identificaron los diferentes tipos de plástico encontrados, siendo clasificados y pesados por separado. Luego de replicar el proceso para cada muestra, se calcula peso total experimental para cada tipo y se realiza el análisis gravimétrico con el objetivo de determinar los respectivos porcentajes de cada polímero.

A partir de los resultados anteriores y conociendo la disponibilidad ( $D$ ), se realizan los cálculos correspondientes para conocer la cantidad de cada tipo de plástico disponible mensualmente con una ecuación porcentual (ver Ecuación 2) donde:

$$D_{plastico_N} = \frac{D * \%P_N}{100\%} \left[ \frac{Kg}{mes} \right] \text{ (Ecuación 2)}$$

$D_{plastico_N}$ , es la capacidad de generación mensual de N tipo de plástico, y  $\%P_N$  es el porcentaje resultante del análisis gravimétrico de N tipo de plástico.

### 3.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN

Para realizar las actividades de esta sección son requeridos los resultados del inciso 4.2. Así, se determinó mediante la caracterización que los polímeros con mayor presencia en

---

<sup>18</sup> VANGUARDIA. La 'Misión Recicla' aprovecha 2.500 kilos de residuos al día en Bucaramanga [en línea]. Bucaramanga, 2020. [Fecha de consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://tinyurl.com/22wds155>

los residuos plásticos de la Universidad son: polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP), en un **54%, 22% y 19%**, respectivamente. Estos hallazgos sugieren la necesidad de revisar artículos y publicaciones que hayan estudiado y caracterizado estos polímeros mediante un proceso real de pirólisis con el fin de obtener los datos requeridos para la simulación, como análisis próximo, análisis último, productos característicos de la pirólisis y rendimientos específicos para cada uno. Es preciso señalar que los procesos cuantitativos en esta sección se llevaron a cabo mediante *Microsoft Excel*.

La metodología utilizada para la revisión de la literatura fue consistente en todas las búsquedas. Se recopiló información sobre análisis próximos y últimos en base húmeda, productos de reacción obtenidos en procesos de pirólisis y datos de rendimiento de las fracciones líquidas y gaseosas en función de la temperatura.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros considerados durante el proceso, junto con las observaciones realizadas; además, en la Tabla 2 se presentan las referencias de los artículos consultados en esta sección, correspondientes a cada ítem de información requerida.

Tabla 1. Parámetros para la revisión de literatura

<b>Parámetros en la revisión de literatura</b>		<b>Observaciones</b>
<b>Base de datos/recursos para la investigación</b>	Material disponible en Biblioteca virtual UIS, y extensiones de esta	ScienceDirect, Springer, Nature, Oxford, Sage, ASME, Google Academic
<b>Modo de búsqueda</b>	Por palabras clave dentro del contexto	Residuos plásticos, plásticos de un solo uso, pirólisis, estudio, simulación, polímeros, análisis, rendimiento

	Por año de publicación	2000 - actualidad
<b>Tipo de material revisado</b>	Artículos de investigación y publicaciones en revistas científicas	-
<b>Idioma del material</b>	Inglés, español	-
	Bibliometría	Indicadores bibliométricos seguidos: citas recibidas, factor de impacto, índice H.
<b>Criterios para la selección del material y utilización del contenido</b>	Impacto en la sociedad científica y estado del arte	-
	Referencias y presentación del documento	-
	Similitud entre el contenido del material y la información requerida	Artículos que realizaran estudios de pirólisis de plásticos y rendimientos de fracciones obtenidas

Tabla 2. Revisión bibliográfica relacionada con la información requerida

<b>Información requerida</b>	<b>Artículos consultados</b>
Análisis próximo y análisis último en base húmeda para PET, HDPE y PP.	HEIKKINEN, J.M., et al. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. En: <i>Journal of Analytical and Applied Pyrolysis</i> . 2004, vol. 71, nro.2 pp. 883-900. ZANNIKOS, F., et al. Converting Biomass and Waste Plastic to Solid Fuel Briquettes. En: <i>Journal of Renewable Energy</i> . 2012, vol. 2013. AHMAD, I., et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En:

Información requerida	Artículos consultados
	<p data-bbox="703 285 1446 373">International Journal of Green Energy. 2015, vol. 12, nro. 7.</p> <p data-bbox="703 394 1446 594">AMAR GIL, Sebastián. Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. En: Ingeniería y Desarrollo. 2019, vol. 37, nro. 2.</p> <p data-bbox="703 615 1446 867">XU, Fanfan, et al. Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis. En: Energy Conversion and Management. 2018, vol. 171. pp. 1106-1115.</p> <p data-bbox="703 888 1446 1087">DUBDUB, Ibrahim y AL-YAARI, Mohammed. Thermal Behavior of Mixed Plastics at Different Heating Rates: I. Pyrolysis Kinetics. En: Polymers. 2021, vol. 13, nro. 19.</p>
<p data-bbox="253 1381 659 1528">Distribución de productos obtenidos en un proceso de pirólisis de PET, HDPE y PP.</p>	<p data-bbox="695 1108 1446 1423">MIN-HAWN, Cho; SU-HWA, Jung y JOO-SIK, Kim. Pyrolysis of Mixed Plastic Wastes for the Recovery of Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) Aromatics in a Fluidized Bed and Chlorine Removal by Applying Various Additives. En: Energy Fuel. 2010, vol. 24, nro. 2. pp. 1389-1395.</p> <p data-bbox="711 1444 1446 1644">CEPELIOGULLAR, Özge y PÜTÜN, Ayse. Thermal and kinetic behaviors of biomass and plastic wastes in co-pyrolysis. En: Energy Conversion and Management. 2013, vol. 75. pp. 263-270.</p> <p data-bbox="695 1665 1446 1801">MIANDAD, R. et al. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. En: International Biodeterioration &amp; Biodegradation. 2017, vol. 119. pp.239-252.</p>

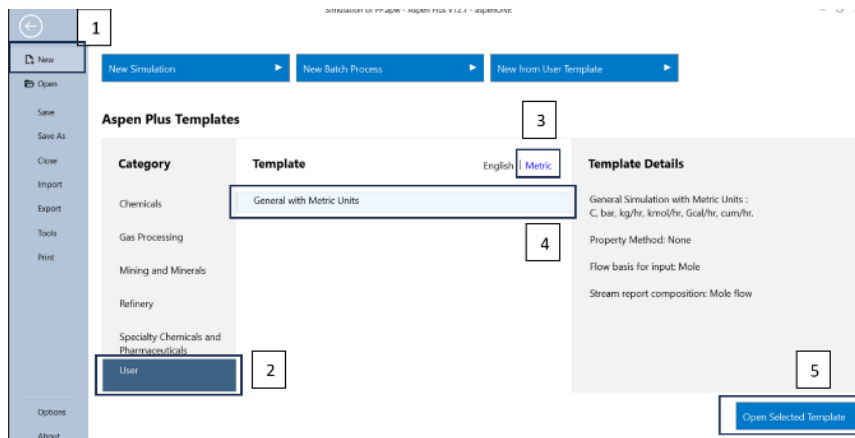
Información requerida	Artículos consultados
	DIMITROV, N., et al. Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography. En: Polymer Degradation and Stability. 2013, vol. 98, nro. 5. pp.972-979.
Datos de rendimiento en fracciones líquida y sólida en función de temperatura de reacción de PET, HDPE y PP.	AHMAD, I., et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. 2015, vol. 12, nro. 7.

### 3.4 SIMULACIÓN

El paquete de simulación que ofrece la empresa Aspen Tech es de los más demandados en el mercado actualmente por quienes buscan realizar diversas labores de simulación en procesos termoquímicos, de plantas petroleras y destilación, mediante un desarrollo técnico especializado y preciso. Además, la Universidad Industrial de Santander brinda a estudiantes y profesores acceso a la licencia de dicho paquete. De entre varios softwares que ofrece, Aspen Plus ® fue el elegido para realizar las simulaciones, por sugerencia del director. Así, el desarrollo de este objetivo se basó en el aprendizaje por parte de los autores hacia con el programa y afines.

A manera general, el desarrollo de cada simulación puede dividirse en dos etapas: etapa de configuración de compuestos, propiedades y métodos (*PROPERTIES*), y etapa de configuración de los elementos de planta y corrientes con los que se llevará a cabo la simulación (*SIMULATION*). Ambas opciones aparecen en el árbol de la izquierda del programa. Las funciones en dicho árbol cambian dependiendo de cuál de las dos opciones se encuentre seleccionada. La Figura 2 muestra la ventana de inicio de *ASPEN PLUS* con los pasos para crear el archivo de trabajo bajo unidades del sistema métrico.

Figura 2. Configuración de inicio en Aspen Plus®



### 3.4.1 Configuración de compuestos, propiedades y métodos: *PROPERTIES*

- La Figura 3 muestra la ventana principal por defecto, bajo la opción *PROPERTIES* seleccionada, en la carpeta del árbol *Components > Specifications*, en donde el software pide como entrada qué componentes se van a utilizar en la simulación y qué tipo de componentes son. En esta sección introducimos el nombre o la fórmula química de este, además de si es convencional, no convencional o pseudo convencional.
- Se introducen los componentes que van a interactuar durante la simulación, especificando nombre o fórmula química, y el tipo. La Figura 4 muestra un ejemplo con la lista de componentes introducidos para la simulación de pirólisis del PP. Algo importante que cabe señalar es que el material de entrada, para las 3 simulaciones, es no convencional, al igual que las cenizas(*ash*). Este tipo de entradas es distinto y hay que dotarlas con atributos como análisis próximo y último, como se verá más adelante. El tipo de material de carbono es sólido(*solid*).

Figura 3. Configuración para añadir componentes a utilizar en la simulación

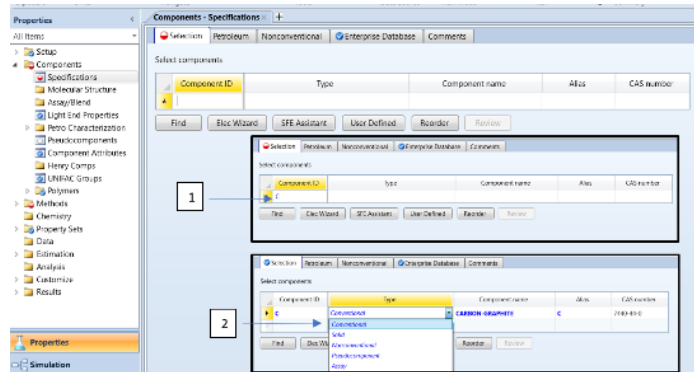
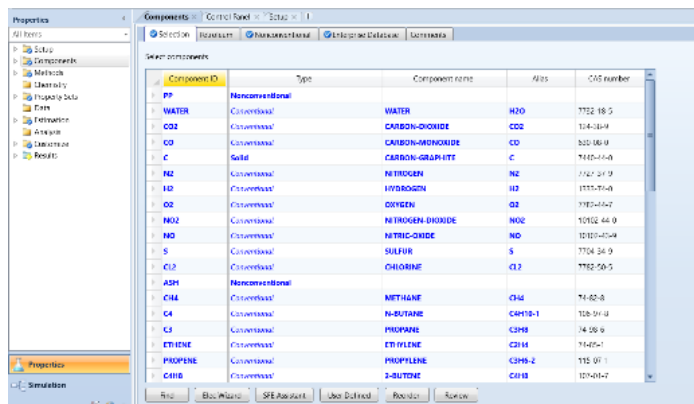
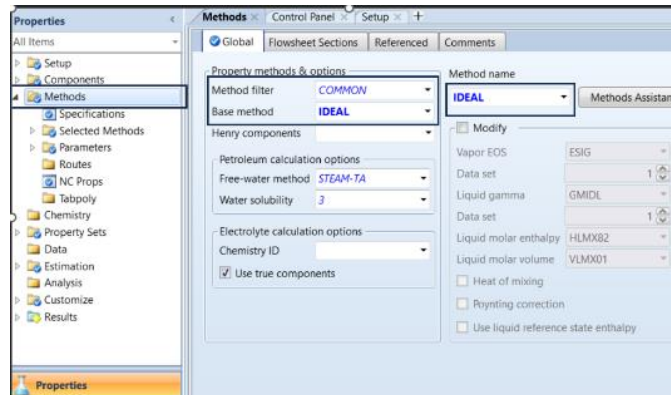


Figura 4. Componentes utilizados en simulación de pirólisis de PP



- Una vez se hayan introducido los compuestos que estarán presentes en la simulación, se presiona el botón *Next* ubicado en la parte superior de la pantalla. Este botón permite dirigirse hacia la siguiente entrada que requiera el programa para seguir configurando.
- El botón *Next* lleva el programa a la opción *Methods*. Aquí se escoge el método con el que se dotará de propiedades físicas y químicas a los compuestos que van a reaccionar en la simulación. La Figura 5 muestra cómo se configuró esta sección para las 3 simulaciones.

Figura 5. Configuración de métodos y propiedades



- A continuación, se selecciona la opción *Methods > Parameters > Pure Components > New > Nonconventional > OK*, para introducir el valor del poder calorífico superior (HHV). Este valor dependerá de cada polímero usado. En este proyecto, dichos valores fueron extraídos de la literatura. Las Figuras 6 y 7 muestran la serie de pasos para creación de esta variable.

Figura 6. Creación de variable poder calorífico

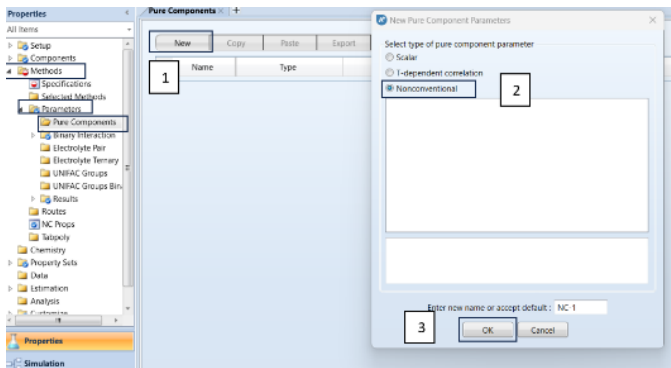
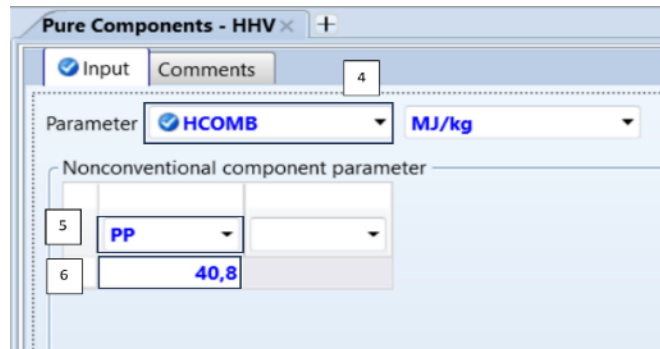
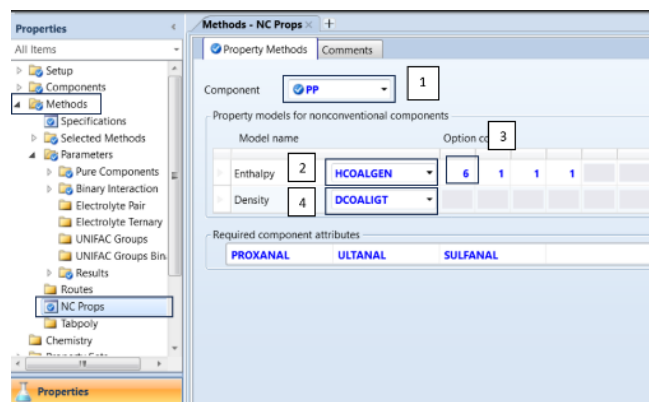


Figura 7. Introducción del poder calorífico para el PP



- Luego, se seleccionan los métodos para el cálculo de densidad y entalpía del material de entrada. Para esto, click en *Methods > NC Props* y se llenan las opciones como señala la Figura 8. Introducir el número 6 en la primera posición del vector *HCOALGEN* permite establecer el valor de poder calorífico que el usuario desee para el componente no convencional.

Figura 8. Selección de métodos para el cálculo de entalpías y densidades del material de entrada no convencional



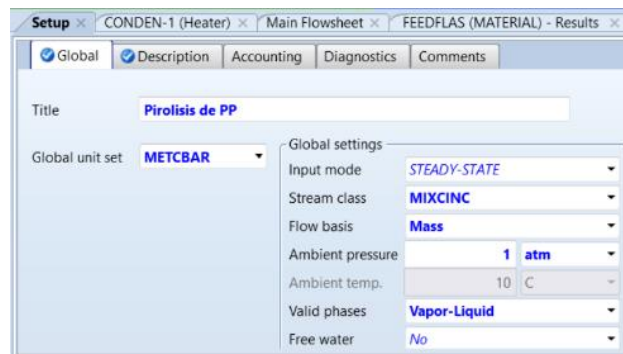
- Una vez esté configurada la opción *PROPERTIES*, se hace click en el botón *Run*, en la parte superior de la pantalla. Con esto el programa ejecutará las configuraciones hechas y verificará que las entradas estén completas y funcionen correctamente. De haber errores, el software mostrará una ventana advirtiendo que hay configuraciones deben ser revisadas antes de seguir. Si no hay errores, se selecciona la opción

*SIMULATION*, que se encuentra debajo de la opción *PROPERTIES* en la parte inferior izquierda de la pantalla, para empezar con la configuración de esta.

### 3.4.2 Configuración de la simulación (SIMULATION)

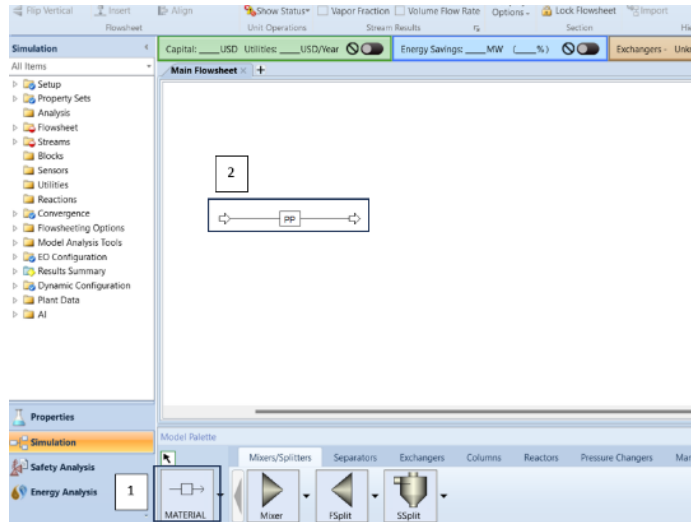
- Dentro de la opción *SIMULATION*, se despliega un nuevo conjunto de acciones y opciones en el árbol ubicado a la izquierda de la pantalla.
- Para empezar a configurar, se selecciona la opción *Setup > Global*. A continuación, se seleccionan las opciones de configuración como muestra la Figura 9.

Figura 9. Configuración global de simulación



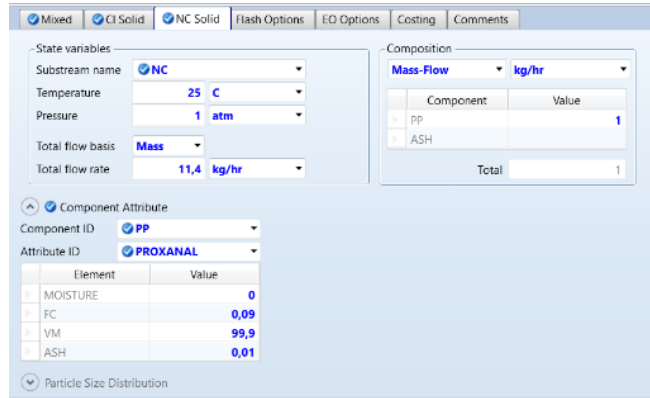
- Una vez configurado el *Setup*, se abrirá por defecto la pestaña *Main Flowsheet*. En esta sección es donde se crean las corrientes de entrada y salida, y se ubican los bloques de trabajo. Desde la barra inferior de opciones *Model Palette* se pueden arrastrar los diferentes bloques, y desde el botón *MATERIAL* se crean las corrientes de flujo másico, calor y trabajo necesarias.
- Se hace click en el botón *MATERIAL* y se crea la corriente de entrada. Esta contendrá el polímero. La Figura 10 señala los pasos para la creación de la corriente.

Figura 10. Pasos para crear corriente con material de entrada



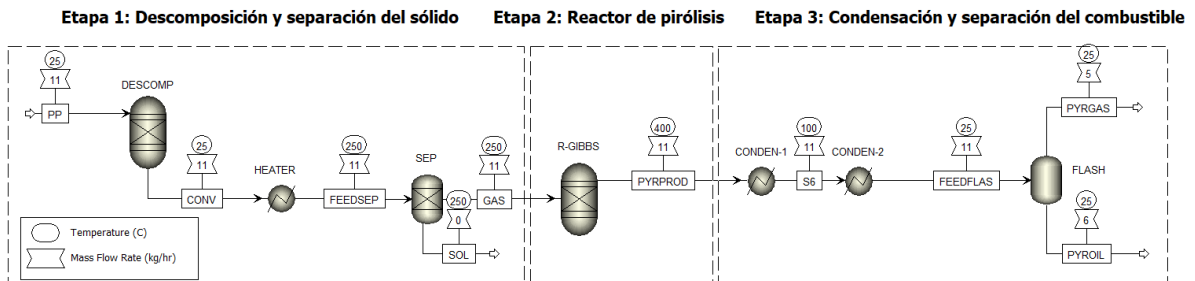
- A continuación, se hace doble click sobre la corriente creada para configurarla.
- En la nueva ventana abierta, se selecciona la pestaña *NC Solid*, donde se configurará la corriente con los atributos respectivos por ser no convencional. La Figura 11 muestra las opciones que deben seleccionarse para esta configuración. Los datos de *Total flow rate* dependen de la disponibilidad de flujo que se tenga para el material. En este caso el flujo másico en cada simulación depende de la proporción que se tenga de cada polímero. Para el PP se cuenta con 11,4 kg/h.
- En *Component Attribute* deben introducirse los valores característicos de análisis próximo y último en los respectivos vectores *PROXANAL* y *ULTANAL*.
- Hecha esta configuración, se da paso al esquema o diagrama de planta.

Figura 11. Configuración de la corriente de entrada no convencional



- Las 3 simulaciones se llevaron a cabo bajo el mismo esquema de planta, que se muestra en la Figura 12. Se divide en 3 etapas, conformas por *bloques* de procesos térmicos que ya han sido estudiados en materias previas durante el pregrado, como intercambiadores de calor, reactores y separadores de flujo.

Figura 12. Esquema de planta empleado para las simulaciones



El esquema se escogió porque cuenta con los elementos necesarios y justos para realizar el proceso de planta, además de ser sugerido por varios autores en simulaciones de pirólisis de biomasa/plásticos. Como se aprecia en la Figura 12, este se divide en 3 etapas, divididas en los incisos siguientes.

**3.4.2.1 Etapa 1: descomposición y separación del sólido.** Esta etapa tiene como función descomponer el material de entrada que se encuentra como *no convencional* en material *convencional*, con el que el software puede interactuar, realizar procesos

termodinámicos, de flujo y reacciones químicas. Además, esta sección se encarga de precalentar y separar en fases al material de entrada antes de llevarse a cabo la pirólisis. La Tabla 3 describe cada bloque de esta sección y su función.

Tabla 3. Bloques componentes de la sección DESCOMPOSICIÓN Y SECADO.

BLOQUE	TIPO	FUNCIÓN
DESCOMP	Reactor <i>R-Yield</i>	Descompone el material en moléculas simples para convertirlo en <i>convencional</i> . Utiliza una rutina en el lenguaje <i>FORTRAN</i> .
HEATER	Intercambiador de calor <i>Heater</i>	Calienta y seca al material de entrada descompuesto hasta fase de vapor o cercana.
SEP	Separador de fases	Divide la corriente de entrada según sea especificado por el usuario en una corriente de vapor y una de sólido. Los sólidos son desechados y el vapor se utiliza para la pirólisis.

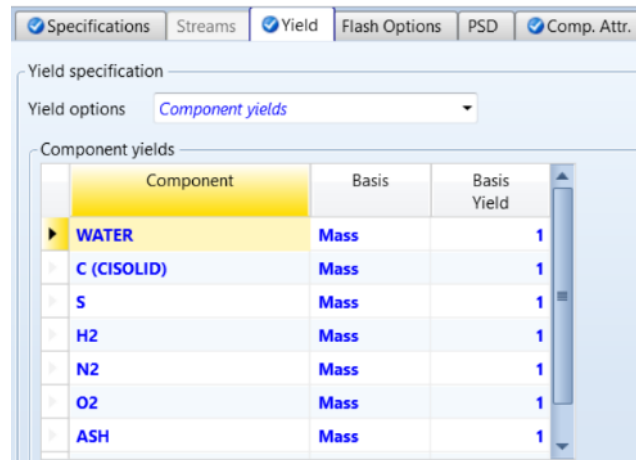
#### CONFIGURACIÓN DE LOS BLOQUES:

##### ✓ DESCOMP

1. Una vez insertado el reactor de descomposición al *Main Flowsheet*, en la pestaña de *Specifications* se seleccionan condiciones atmosféricas estándar: temperatura de 25°C y presión de 1 atm.
2. En la pestaña *Yield* se seleccionan los componentes que estarán a la salida del reactor, como se muestra en la Figura 13. Se selecciona la base como másica y en los rendimientos se supone como valor 1 para todos los componentes. Estos serán luego calculados por el bloque de cálculo *C-1*.

3. En la pestaña *Comp. Attr.* se ingresan los atributos de las cenizas (ASH) seleccionándolo en *Component ID*. En los atributos (*Attribute ID*), PROXANAL y ULTANAL se rellenan con ASH igual 100 y los demás se rellenan con ceros.

Figura 13. Configuración de los componentes a la salida del bloque DESCOMP



Component	Basis	Basis Yield
WATER	Mass	1
C (CISOLID)	Mass	1
S	Mass	1
H2	Mass	1
N2	Mass	1
O2	Mass	1
ASH	Mass	1

4. El **bloque de cálculo C-1** permite realizar los cálculos dentro del bloque DESCOMP para llevar la materia de no convencional a convencional.

5. En el árbol de la izquierda se despliega la pestaña *Flowsheeting Options > Calculator*.

6. Se selecciona *New* para nombrar al nuevo bloque de cálculo y empezar a configurarlo.

7. En la pestaña *Define* se definen y crean las variables que intervendrán en los cálculos. Click en *New > Enter variable name*.

8. En la sección de *Category* se selecciona *All* para todas las variables creadas.

9. En la sección *Reference* se selecciona el tipo, la corriente a la que pertenece la variable, el componente específico no convencional y los atributos. Cada variable creada tiene configuraciones distintas. La Figura 14 señala las partes del menú de configuración de las variables y la Figura 15 muestra una lista con las variables pertinentes a crear con sus respectivas configuraciones.

Figura 14. Menú de configuración de variables del bloque de cálculo C-1

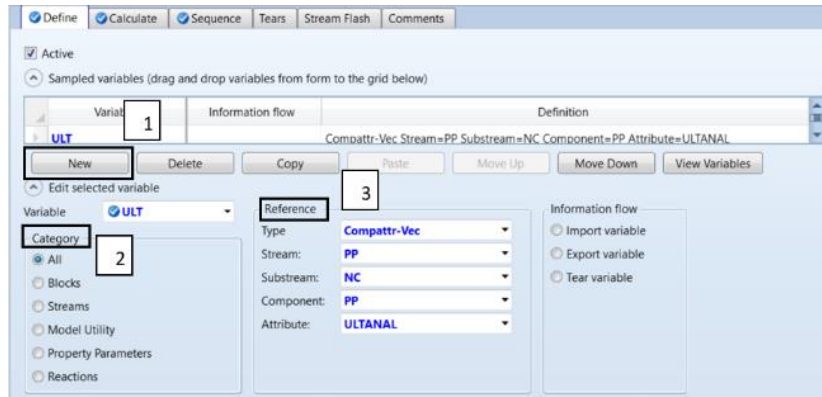
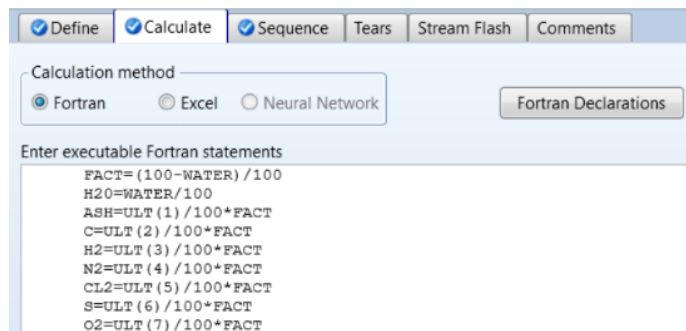


Figura 15. Lista de variables definidas con respectivos atributos

Variable	Information flow	Definition
ULT		Compattr-Vec Stream=PP Substream=NC Component=PP Attribute=ULTANAL
WATER		Compattr-Var Stream=PP Substream=NC Component=PP Attribute=PROXANAL Element=1
H2O		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=WATER ID2=MIXED
ASH		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=ASH ID2=NC
C		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=C ID2=CISOLID
H2		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=H2 ID2=MIXED
N2		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=N2 ID2=MIXED
S		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=S ID2=MIXED
O2		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=O2 ID2=MIXED
CL2		Block-Var Block=DESCOMP Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=CL2 ID2=MIXED

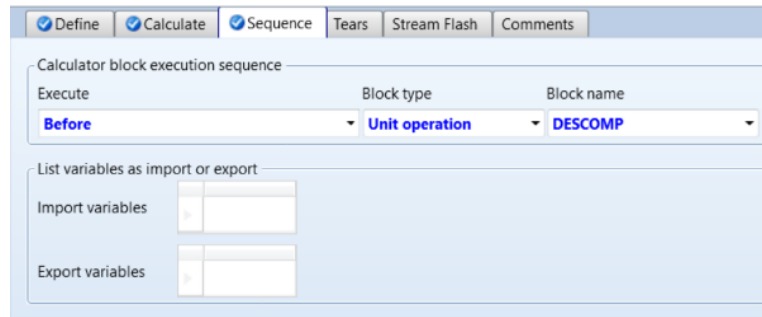
10. En la pestaña *Calculate* se selecciona FORTRAN en método de cálculo y se escribe el código como se muestra en la *Figura 16* [10]:

Figura 16. Rutina en FORTRAN para los cálculos



11. En la pestaña Sequence se configura: Execute > Before. Block type > Unit Operation. Block name > DESCOMP. De esta manera se le está indicando al software que aplique C-1 en el bloque DESCOMP. La Figura 17 muestra la configuración de esta pestaña.

Figura 17. Configuración de pestaña Sequence



✓ **HEATER:**

1. La corriente que sale de *DESCOMP* es la materia convertida en convencional. Se selecciona y arrastra el bloque *Heater* en la pestaña de *Exchangers* del *Model Palette* en la ventana *Main Flowsheet*.

2. Se especifican condiciones de funcionamiento: temperatura de calentamiento y presión de trabajo. La temperatura cambiará en función de las temperaturas a las que se lleve a cabo la pirólisis en el reactor *R-GIBBS*. Es decir, la temperatura de trabajo del calentador debe ser como mínimo la temperatura de reacción. De lo contrario, se estaría gastando energía en calentar la biomasa para luego tener que volver a enfriarla antes de entrar al reactor de pirólisis. La presión de funcionamiento será la atmosférica (1 atm).

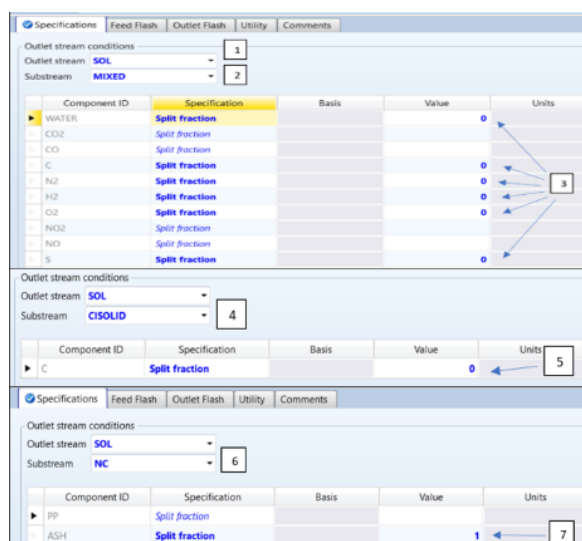
✓ **SEP:**

1. La corriente proveniente del calentador *HEATER* se conecta al un bloque separador, seleccionado en la pestaña *Separator* del *Model Palette*, específicamente el llamado *SEP*.

2. Una vez ubicado y conectado, se deben crear dos corrientes de salida para este bloque, seleccionando el botón *MATERIAL*. Una corriente se llamará *SOL* y la otra *GAS*, para diferenciar la separación de sólidos y vapores creados en el calentador.

3. Para configurar, se hace doble click en el bloque. En la pestaña *SPECIFICATIONS*, en el menú desplegable *Outlet streams*, se selecciona la corriente *SOL*. Ahora se configurarán los componentes que deben separarse hacia con esta corriente, como los sólidos remanentes en las moléculas creadas en R-YIELD: carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, azufre y cloro. La Figura 18 muestra la serie de pasos para configurar el separador.

Figura 18. Configuración del bloque SEP



### 3.4.2.2 Etapa 2: reactor de pirólisis

Tiene la función de llevar a cabo la pirólisis. Para este estudio, se variaron las temperaturas de reacción para conseguir una curva de rendimiento de las fracciones líquidas y gaseosas que estuvieran presentes en la salida de la simulación.

Este bloque es de suma importancia en el proceso. Su nombre *R-GIBBS* proviene del modus operandi. El reactor tiene como entrada, además de condiciones de funcionamiento como temperatura y presión, una lista con los posibles productos que van a formarse luego de la reacción. Dichos productos son conseguidos mediante la interacción de las moléculas en la corriente de entrada, a una temperatura específica, mientras se trata de minimizar la energía libre de Gibbs y se alcanza el equilibrio

termodinámico y termoquímico en las reacciones. Las ecuaciones y modelos con los que el reactor funciona son una caja negra para el usuario. La Tabla 4 muestra el nombre, tipo y función del bloque.

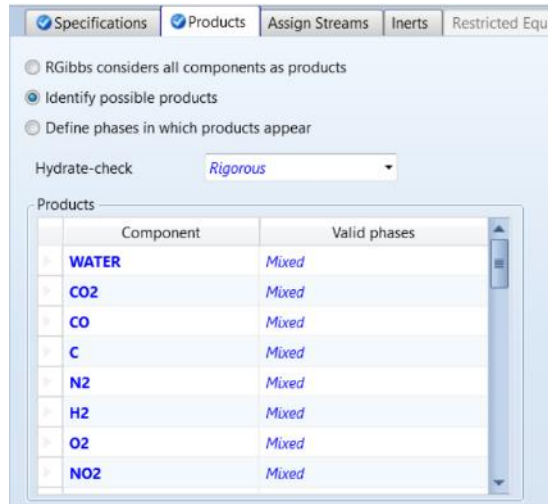
Tabla 4. Bloque componente de la sección reactor de pirólisi.

BLOQUE	TIPO	FUNCIÓN
R-GIBBS	Reactor de equilibrio <i>R-Gibbs</i>	Genera productos de reacciones químicas no especificadas mediante la minimización de energía libre de Gibbs, el equilibrio termodinámico y químico. Los posibles productos pueden ser o no especificados por el usuario.

#### CONFIGURACIÓN DEL BLOQUE:

1. Desde la sección de reactores en el *Model Palette* en la ventana *Main Flowsheet* se selecciona y arrastra el reactor a la ventana de simulación.
2. Se conecta como corriente de entrada al reactor la corriente de salida GAS del bloque separador.
3. Dentro de la configuración del reactor, en la pestaña *SPECIFICATIONS* se seleccionan las condiciones de operación. La temperatura de reacción varía en función del usuario y del estudio que se esté realizando. La presión se mantuvo siempre a 1 atm. En el menú desplegable *CALCULATION OPTION* se selecciona *Calculate phase equilibrium and chemical equilibrium*.
4. Dentro de la pestaña *PRODUCTS* se selecciona *Identify possible products*.
5. A continuación, deben seleccionarse los componentes que pueden aparecer en los productos de la reacción, como se muestra en la Figura 19. Estos productos son característicos de la pirólisis de cada polímero a diversas temperaturas.

Figura 19. Configuración del reactor RGibbs



### 3.4.3.3 Etapa 3: Condensado y separación del combustible

Es la tercera etapa del esquema de planta. Su función es llevar los productos de pirólisis a fases de líquido (*PYROIL*) y gas (*PYRGAS*). Debe tenerse en cuenta que no aparecen sólidos porque fueron extraídos previamente en el bloque *SEP*. La Tabla 5 muestra los bloques componentes en esta sección.

Tabla 5. Bloques componentes de la sección condensado y secado

BLOQUE	TIPO	FUNCIÓN
CONDEN1	Intercambiador de calor <i>Heater</i> .	Primera fase de condensación. Intercambiador de calor que enfría y lleva los productos hasta una temperatura especificada por el usuario.
CONDEN2	Intercambiador de calor <i>Heater</i> .	Segunda fase de condensación. Intercambiador de calor que enfría y lleva los productos hasta una temperatura especificada por el usuario.

BLOQUE	TIPO	FUNCIÓN
FLASH	Intercambiador de calor y separador de fases en líquido y gas <i>FLASH2</i> .	Divide la corriente de entrada estrictamente en dos fases: vapor y líquido. Los rendimientos dependerán de la fase de condensado previa y de la temperatura propia del separador.

#### ✓ **CONDEN1**

1. Una vez insertado el bloque en el *MAIN FLOWSHEET*, se conecta como corriente de entrada los productos del reactor de pirólisis. En esta primera etapa de condensado se pretende disminuir la temperatura hasta un valor medio entre la temperatura de pirólisis y la temperatura final de condensado.
2. Se selecciona el bloque. En la pestaña *SPECIFICATIONS* se configuran las condiciones de operación: temperatura y presión. La temperatura variará en función del usuario y del estudio que se desee realizar. La presión se mantendrá constante en 1 atm.

#### ✓ **CONDEN2**

1. Una vez insertado el bloque en el *MAIN FLOWSHEET*, se conecta como corriente de entrada los productos condensados en *CONDEN1*. En esta segunda etapa de condensado se pretende disminuir la temperatura hasta el valor final al que se desea obtener el combustible.
2. Se selecciona el bloque. En la pestaña *SPECIFICATIONS* se configuran las condiciones de operación: temperatura y presión. La temperatura variará en función del usuario y del estudio que se desee realizar. La presión se mantendrá constante en 1 atm.

#### ✓ **FLASH**

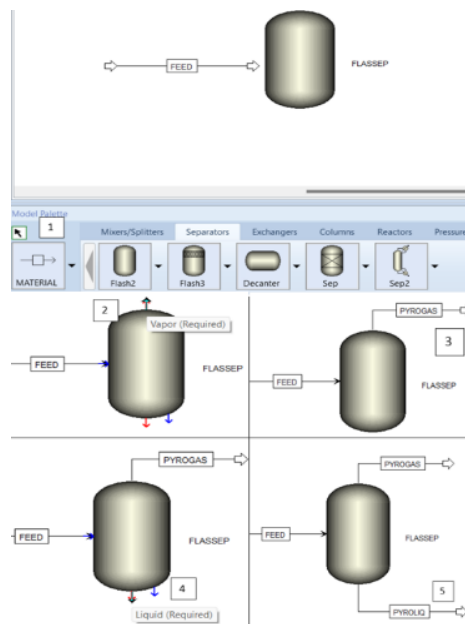
1. Una vez insertado el bloque *FLASH2* en el *MAIN FLOWSHEET*, se conecta como corriente de entrada los productos condensados en *CONDEN2*. En esta misma ventana, al seleccionar el botón *MATERIAL* y dirigir el mouse hacia el separador *FLASH* el software

permitirá la opción de crear las dos corrientes de salida del mismo: una en fase de vapor y otra de líquido. La Figura 20 muestra el procedimiento.

2. Se selecciona el bloque. En la pestaña *SEPECIFICATIONS* se configuran las condiciones de operación: temperatura y presión. La temperatura debe ser la misma del bloque *CONDEN2* y la presión 1 atm.

3. Las corrientes de salida serán el aceite de pirólisis *PYROIL* y los gases no condensables de pirólisis *PYROGAS*.

Figura 20. Pasos para configurar separador FLASH



## 4. RESULTADOS

### 4.1 PANORAMA INSTITUCIONAL

**4.1.1 Descripción geográfica y de población.** El campus central de la Universidad Industrial de Santander (UIS) se encuentra al noreste de la ciudad de Bucaramanga, específicamente en la intersección de la calle 9 y la carrera 27. Ubicado en la región montañosa de los Andes colombianos con una altitud aproximada de 1000 metros sobre el nivel del mar y temperatura media de 23°C, se localiza en la parte este del río de Oro, entre dicho río y el Macizo ígneo-metamórfico de Santander, sobre la cordillera oriental de Colombia siendo sus coordenadas geográficas 7°6'53.5" de latitud norte y 73°7'42.16".<sup>19</sup>

Por su parte, la comunidad universitaria (incluyendo las sedes y campus central) se conforma por un total de 23831 personas, de las cuales:

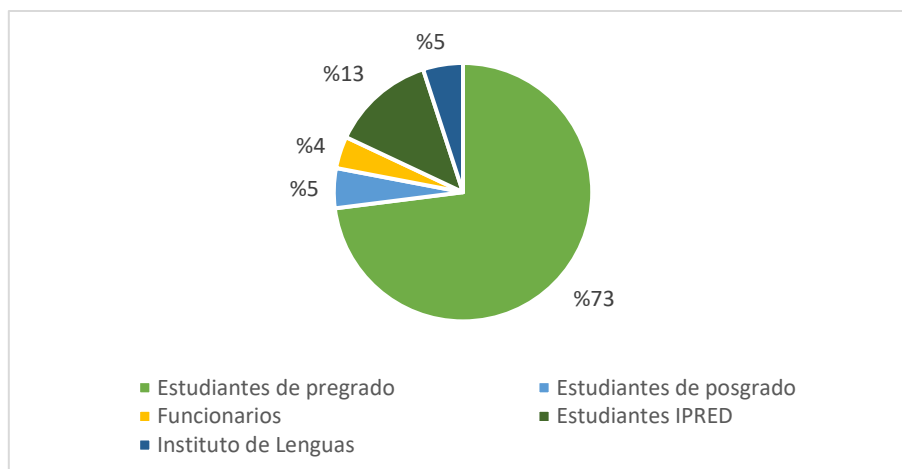
- 73% son estudiantes de pregrado
- 5% estudiantes de posgrado
- 4% funcionarios y empleados
- 13% estudiantes de INSED (Instituto de Educación a Distancia)
- 5% estudiantes del Instituto de Lenguas (ver Figura 21).<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> BALLESTEROS GÓMEZ, Luis Eduardo, et al. Estudio del aprovechamiento de los residuos celulosicos de la basura de la UIS. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bucaramanga, 1985.

<sup>20</sup> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Op. Cit.

Figura 21. Distribución de la Comunidad Universitaria UIS, Cede Central



**4.1.2 Disponibilidad de residuos plásticos.** La UIS destaca como una de las instituciones educativas más grandes de Bucaramanga, y su magnitud también se refleja en la generación de residuos. Los residuos sólidos que se generan en la universidad son principalmente de naturaleza institucional, ya que abarcan una amplia gama de espacios y áreas funcionales. Entre estos espacios se incluyen: salones de clases, laboratorios, oficinas, auditorios, cafeterías, comedores y áreas verdes. Los residuos predominantes para cada área son clasificados en la Tabla 6 mostrada a continuación:

Tabla 6. Tipos de residuos generados en la UIS – Cede Central

Lugar	Residuos
Oficinas	La mayoría de los residuos encontrados son de naturaleza reciclable, como papel, cartón y otros residuos de consumo. Entre estos últimos se incluyen vasos desechables, pitillos y en menor proporción, productos de icopor.
Salones de clase	Papeles sin potencial de reciclaje a causa de manchas con líquidos o tinta. Minoritariamente, lapiceros gastados, servilletas y papel higiénico.
Laboratorios de estudiantes	Amplia variedad de residuos: desde sustancias químicas y vidrios, hasta papeles de filtro, guantes, restos de concreto,

<b>Lugar</b>	<b>Residuos</b>
	vegetales en descomposición, pilas, cables entre otros. Además, también se encuentran los residuos comunes de las aulas de clase, como papel.
Cafeterías	Amplia variedad de elementos desechables, entre los cuales se incluyen vasos, cajas de cartón, servilletas, empaques de frituras, galletas, envolturas y otros similares.
Biblioteca	Se centra en materiales de papelería, como papel, cartón y aquellos comunes en los salones de clase como lapiceros, lápices y viruta de borrador.
Calles y zonas verdes	Numerosos residuos de poda, como ramas y hojas secas. Además, se lleva a cabo el barrido de las calles para mantener la limpieza del campus diariamente.

Fuente: BALLESTEROS GÓMEZ, Luis Eduardo, et al. Estudio del aprovechamiento de los residuos celulósicos de la basura de la UIS. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bucaramanga, 1985.

Para conocer la disponibilidad de residuos plásticos, es necesario hacer una ponderación en relación con los demás residuos. Debido a la pandemia COVID-19, durante los años 2020 y 2021 los indicadores de producción de residuos aprovechables de la comunidad universitaria fueron imprecisos e incluso inexistentes. Para evitar afectar negativamente la precisión de los indicadores, se decidió realizar el análisis de los parámetros de clasificación y disponibilidad con la información más reciente y completa registrada postpandemia en relación con la gestión de residuos aprovechables de la comunidad universitaria, la cual corresponde al año 2022.

Para entonces, y a lo largo del tiempo, la UIS ha tenido convenios con algunas empresas gestoras de residuos. En 2022, se gestionaron dichos residuos a través de dos entidades: la Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB) S.A E.S.P. y Edepsa Soluciones Ambientales (ESP) S.A.S.

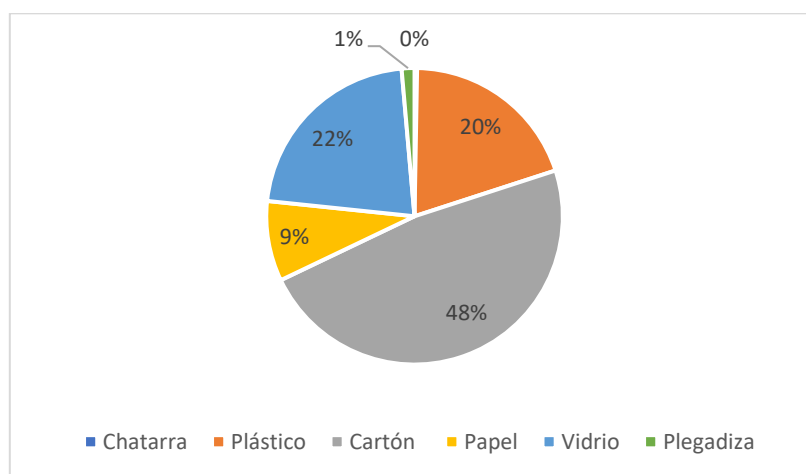
▪ **Empresa de Aseo de Bucaramanga EMAB S.A.S**

La Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB) S.A E.S.P. es la entidad municipal responsable de brindar el servicio público domiciliario de aseo en la ciudad de Bucaramanga. Sus funciones abarcan el barrido, recolección y transporte, disposición final y tratamiento de residuos sólidos. Además, se encarga de llevar a cabo actividades adicionales relacionadas con este servicio, todo ello en cumplimiento de la Ley 142 de 1994.<sup>21</sup>

En 2019, la Administración Municipal y la EMAB emprendieron la “Misión Recicla”, con la que se pretende elevar para el presente año el índice de reciclaje del 2% al 30%.<sup>22</sup>

En 2022, la UIS entregó a la “Misión Recicla”, en el periodo comprendido entre el 31 de marzo y el 22 de agosto, 1075 kg de residuos reciclables clasificados en: Chatarra, plástico, cartón, papel, vidrio y plegadiza donde el 20% corresponde a plástico con un peso total de 212 Kg (ver anexo A y Figura 22).

Figura 22. Distribución porcentual de los residuos entregados a la Misión Recicla en el año 2022



<sup>21</sup> EMAB [sitio web]. Bucaramanga. [Consulta 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://emab.gov.co/>

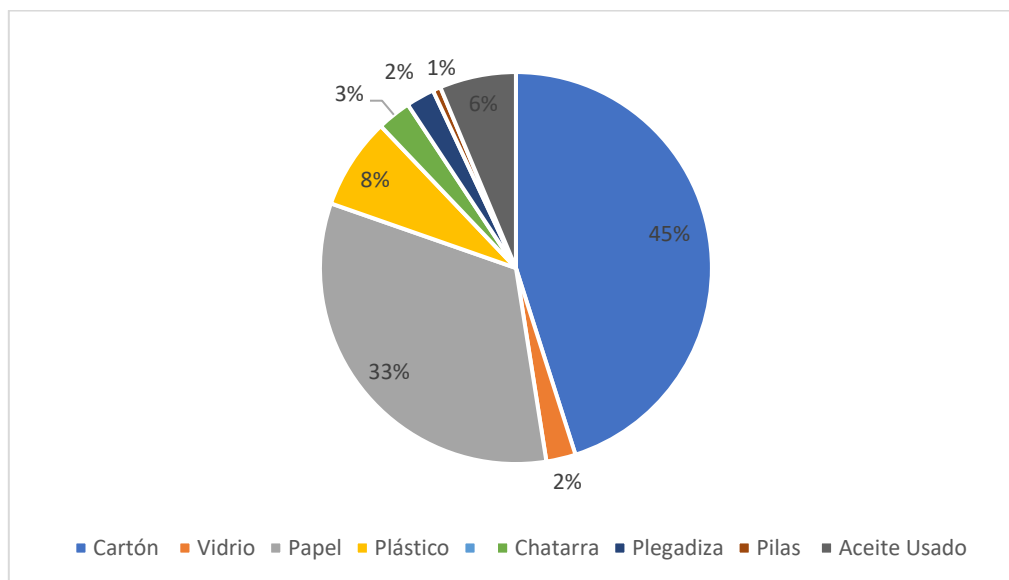
<sup>22</sup> VANGUARDIA, Op. Cit.

▪ **EDEPSA Soluciones Ambientales (ESP) S.A.S.**

ESP es una entidad del sector privado que tiene como objetivo proporcionar una amplia gama de servicios relacionados con la gestión integral de residuos peligrosos, monitoreo de aguas, fumigación, desinfección, asesoría técnica ambiental y comercialización de insumos.<sup>23</sup>

Para el año 2022, la UIS también realizó gestión de residuos reciclables a través de esta entidad. Dentro de los certificados mensuales de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables (ver Anexos del B al J), comprendidos desde el mes de marzo hasta diciembre de 2022, se evidenció la clasificación y cantidad de residuos gestionados con dicha entidad, donde, de los 5200,43 Kg de residuos totales (ver anexo K), 45% corresponde a plástico con un peso total de 392,44Kg (ver Figura 23).

Figura 23. Distribución porcentual de los residuos entregados a ESP en el año 2022



<sup>23</sup> EDEPSA E.S.P. Quiénes somos [Sitio Web]. [Consulta 20 febrero 2023]. Disponible en: <https://edepsaesp.com/quienes-somos-edepsa>

Así, de acuerdo con los procesos de recolección certificados por la UIS, se pudo establecer que del total de residuos reciclables gestionados con ambas entidades en el año 2022 (6275,43 Kg) **604,44 Kg** corresponde a residuos plásticos (ver Tabla 7).

Tabla 7. Cantidad de residuos reciclables producida certificada por la UIS en el año 2022

<b>RESIDUOS RECICLABLES GESTIONADOS - UIS 2022</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>ESP</b>	<b>EMAB</b>	<b>TOTAL</b>
Total plásticos [Kg]	392,44	212	<b>604,44</b>
Total residuos gestionados (incluidos plásticos) [Kg]	5200,43	1075	6275,43

Teniendo en cuenta que ambas gestiones fueron realizadas a lo largo de 10 meses (registro inexistente de enero y febrero), se obtiene a partir de la ecuación 1 que la cantidad aproximada de residuos plásticos generados basada en registros documentales es de 60,4 kg por mes (ver Ecuación 3).

$$G = \frac{Gen_{plástico}}{mes} = \frac{604,44 [Kg]}{10 [mes]} = 60,44 \left[ \frac{Kg}{mes} \right] \text{ (Ecuación 3)}$$

#### **4.2 IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS MÁS ABUNDANTES**

Se lograron identificar 4 tipos de plásticos predominantes: Polipropileno (PP), Tereftalato de polietileno (PET), Polietileno de alta densidad (HDPE) y Poliestireno (PS).

En el caso del PP, los desechos más comunes consistieron en tapas de gaseosa, vasos plásticos y paquetes de frituras. En cuanto al PET, la gran mayoría, casi en su totalidad, se compone de botellas de refrescos y gaseosas, y en menor medida, envases para comida para llevar. Los desechos de los envases de productos de limpieza, como limpia pisos, alcohol, cloro y ceras líquidas, corresponden al tipo de plástico HDPE. Por último,

el PS es el tipo de plástico menos común y se encuentra principalmente en envases para comida para llevar (ver Figura 24).

Figura 24. Caracterización de los residuos plásticos disponibles en la universidad. De izquierda a derecha: PP, PET, HDPE y PS



A continuación, en el cuadro 1 se presentan los resultados de los tres muestreos realizados, los cuales revelan la predominancia del PET con un 53,95% de los desechos recogidos. Seguido del HDPE y el PP con un 22% y 18,86%, respectivamente, mientras que el PS se encuentra en menor proporción, representando únicamente el 5% de los desechos encontrados.

Cuadro 1. Análisis gravimétrico porcentual de cada tipo de plástico caracterizado

N°	Fecha	Polímero [Kg]				TOTAL [Kg]
		PET	HDPE	PP	PS	
Muestra 1	27/04/2023	2,66	1,38	1,35	0,23	5,62
Muestra 2	4/05/2023	4,74	1,59	3,59	0,62	10,54
Muestra 3	11/05/2023	8,24	3,49	0,53	0,57	12,83
Total [Kg]		15,64	6,46	5,47	1,42	28,99
Porcentaje [%]		PET	HDPE	PP	PS	Total [%]
		53,95	22,00	18,86	5,19	100,00

Basados en los resultados de disponibilidad y teniendo en cuenta el gran porcentaje de volumen en relación con la densidad de este plástico, se descarta el PS para la continuidad del estudio.

Conociendo los porcentajes experimentales de la disponibilidad de cada tipo de plástico, es posible calcular la capacidad de generación mensual de cada plástico con la Ecuación 2:

$$D_{\text{PET}} = \frac{D * \% \text{PET}}{100\%} = \frac{60,44 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right] * 53,95\%}{100\%} = 32,61 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right] \text{ (Ecuación 4)}$$

$$D_{\text{HDPE}} = \frac{D * \% \text{HDPE}}{100\%} = \frac{60,44 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right] * 22\%}{100\%} = 13,30 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right] \text{ (Ecuación 5)}$$

$$D_{\text{PP}} = \frac{D * \% \text{PP}}{100\%} = \frac{60,44 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right] * 18,86\%}{100\%} = 11,40 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right] \text{ (Ecuación 6)}$$

Así, se concluye que mensualmente la Universidad cuenta con aproximadamente 32,61 kg de PET, 13,3 kg de HDPE y 11,4 kg del PP.

### 4.3 REVISIÓN DE LITERATURA: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN

**4.3.1 Análisis próximo y análisis último.** La caracterización proximal y elemental de cada uno de los polímeros es requerida como una de las varias entradas para la simulación. Esto permite otorgar composición de humedad, carbono fijo, materia volátil y cenizas, así como los porcentajes elementales del cual están compuestos los materiales de entrada como no convencionales (C,H,O,N,S).

De los artículos seleccionados en el cuadro 1 se extrajeron los análisis para cada plástico estudiado. Los cuadros 2 y 3 muestran los resultados a utilizar en la simulación, para análisis próximo y último respectivamente.

Cuadro 2. Análisis próximo para PET, HDPE y PP

<b>Tipo de plástico</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Carbono fijo (%)</b>	<b>Material volátil (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>	<b>Referencias</b>
<b>Polietileno tereftalato (PET)</b>	0,61	13,17	86,82	0,01	HEIKKINEN, J.M. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. En: Journal of Analytical Applied Pyrolysis. 2004, vol. 71. pp.883-900.
<b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b>	0	0,01	99,81	0,18	AHMAD, I., et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. 2015, vol. 12, nro. 7.
<b>Polipropileno (PP)</b>	0	0,09	99,9	0,01	XU, Fanfan, et al. Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis. En: Energy Conversion and

Tipo de plástico	Humedad (%)	Carbono fijo (%)	Material volátil (%)	Cenizas (%)	Referencias
					Management. 2018, vol. 171. pp. 1106-1115.

Tabla 8. Análisis elemental para PET, HDPE y PP

Tipo de plástico	C	H	O	N	S	Cl	Referencias
<b>Polietileno tereftalato (PET)</b>	75,21	3,9	16	4,88	0	0	CEPELIOGULLAR, Özge y PÜTÜN, Ayse. Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life. En: Digital Proceeding Of THE ICOEST'2013, Cappadocia. 2013. pp. 694-706
<b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b>	86,74	12,4	0	0,02	0,66	0	AHMAD, I., et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green

Tipo de plástico	C	H	O	N	S	Cl	Referencias
							Energy. 2015, vol. 12, nro. 7.
<b>Polipropileno (PP)</b>	86,1	13,59	0	0,14	0,16	0	SORUM, L.; GRONLI, M.G. y HUSTAD, J.E. Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes. En: Fuel. 2001, vol. 80. pp. 1217-1227.

**4.3.2 Rendimiento en función de la temperatura de reacción.** Utilizando la metodología del inciso 3.3, se encontraron publicaciones que documentaban cómo la composición del material de entrada al reactor variaba de sólido a líquido y gas a medida que la temperatura de reacción aumentaba durante la pirólisis. Los análisis, según la literatura, se realizaron mediante termogravimetría y balance de masas. Se procuró conseguir estudios donde realizaran al menos 4 corridas con temperaturas distintas y se estuviera analizando los porcentajes de masa al final de cada reacción.

De esta manera, se utilizó la data recolectada y, mediante el software ofimático y estadístico *Microsoft Excel*, se construyeron curvas que describieran el comportamiento de las fracciones, para cada polímero, en orden de hacer comparaciones y validaciones entre los resultados de la simulación y resultados de experimentos de la literatura, en orden de darle un alcance mayor al proyecto. Los modelos matemáticos generados

fueron algebraicos. A demás, para cada uno se señala en la gráfica el coeficiente de correlación entre los datos reales y el modelo.

Dada la limitada cantidad de literatura científica disponible para respaldar la investigación, se construyó un modelo de rendimiento en el Polietileno, correspondiente al rendimiento de aceite. Sin embargo, para los modelos de rendimiento del HDPE y PP, fue posible hallar uno de fracción líquida y otro de fracción gaseosa para cada uno. A continuación, la descripción de sus comportamientos:

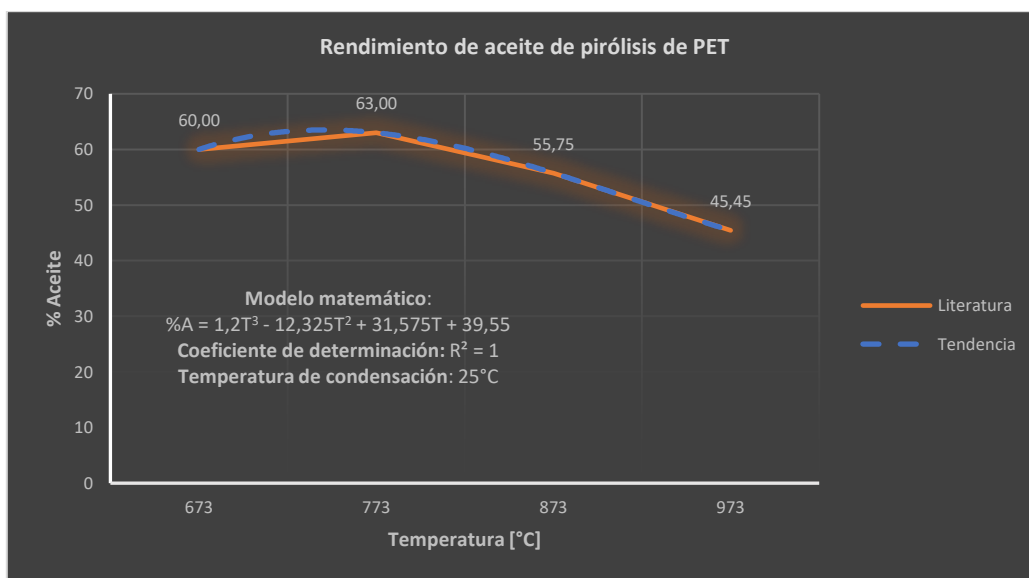
### **Modelo de rendimiento – PET**

En la Figura 25 puede señalarse que los datos tabulados generaron una función polinómica de grado 3. Se realizaron 4 corridas distribuidas uniformemente cada 100°C, desde 673°C hasta 973°C. El máximo local geométrico de la curva se acerca al punto (773°C, 63%). Esto indica que para esa temperatura se obtuvo el mayor rendimiento del PET hacia la fracción líquida. A demás, el coeficiente de determinación es igual que 1 para ese grado de polinomio, lo que indica un ajuste preciso del modelo matemático hacia los datos reales. La elaboración del presente modelo de rendimiento está basada en los los resultados del trabajo experimental de Muammer Canel.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> CIT, Ilkay, et al. Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET. En: Polymer Bulletin. 2010, vol. 64. pp. 817-834.

Figura 25. Rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PET a temperatura de condensación de 25°C



### Modelos de rendimiento – HDPE

Las Figuras 26 y 27 representan el rendimiento de fracciones líquidas y gaseosas para pirólisis de HDPE, respectivamente. Con un coeficiente de correlación igual a 1, los modelos matemáticos que más se ajustaron en ambos casos fueron polinomios de grado 3. Era de esperarse que en las dos curvas se obtuvieran modelos de misma naturaleza, pero con máximos y mínimos relativos opuestos, ya que, por conservación de la masa, si el líquido en un punto es máximo, el gas debe ser mínimo. Es decir, a manera general, de las gráficas puede inferirse que el estudio de termogravimetría presente en este artículo tiene resultados coherentes, desde el punto de vista de rendimientos, ya que las gráficas se corresponden entre sí. La elaboración de los modelos de rendimiento mostrados a continuación está basada en los resultados del trabajo experimental de Aya Soliman y colaboradores.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> SOLIMAN, Aya, et al. Pyrolysis of low-density polyethylene waste plastics using mixtures of catalysts. En: Journal of Material Cycles and Waste Management. 2020, vol. 22. pp. 1399-1406.

Figura 26. Rendimiento de fracción líquida para pirólisis de HDPE a temperatura de condensación de 25°C

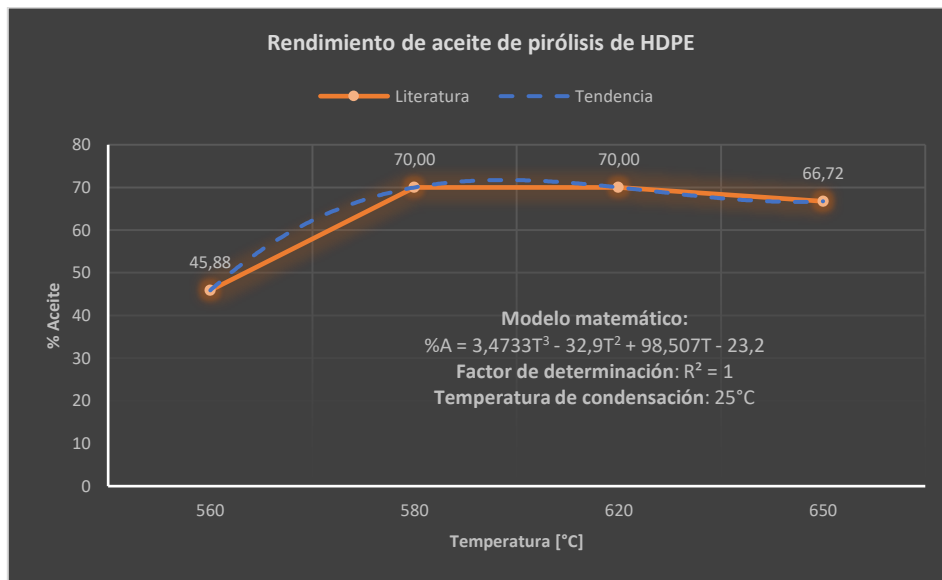
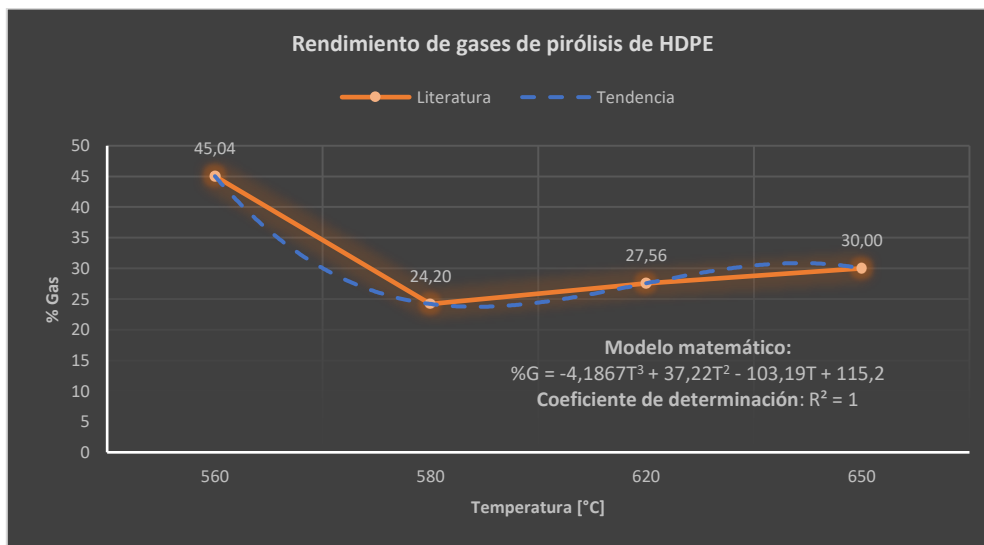


Figura 27. Rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de HDPE a temperatura de condensación de 25°C



Durante este experimento se realizaron 4 corridas: 560°C, 580°, 620° y 650°, de lo que puede inferirse que se estaría entrando en pirólisis “duras” o de temperaturas elevadas. La condensación de los líquidos se dio a 25°C. Para la fracción líquida se obtuvo un rendimiento máximo de 70% entre 580°C y 620°C, lo que es indicio de que ese rango de temperatura es el óptimo para la obtención de aceite de pirólisis para el HDPE. El rendimiento mínimo del gas estuvo en 580°C, con 24,2%. Las gráficas son correspondidas y guardan relación de conservación de masa ya que, para una misma temperatura de reacción (580°C aprox.) se obtiene un máximo de fracción líquida y un mínimo de fracción gaseosa.

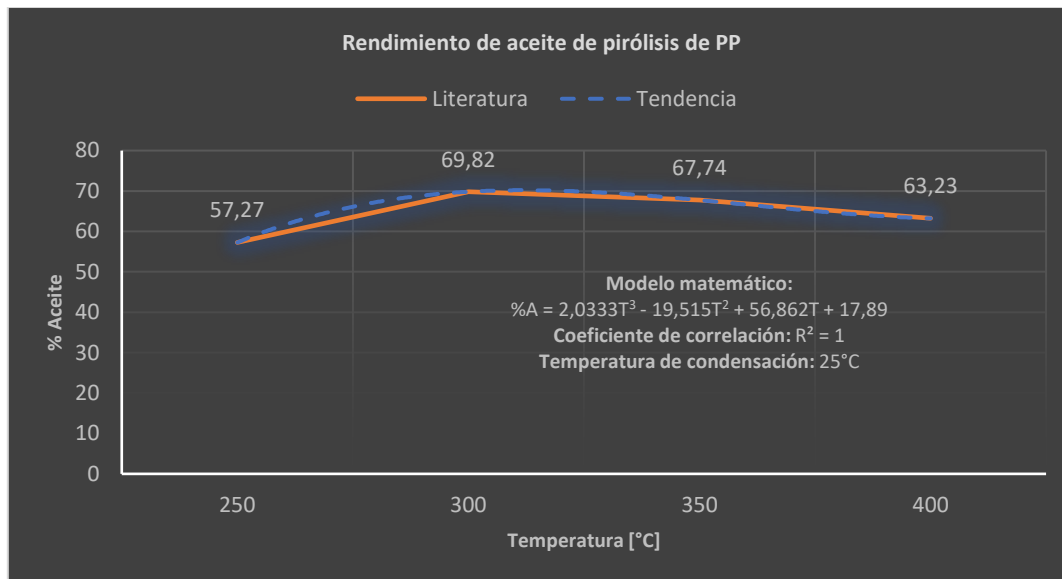
### **Modelos de rendimiento – PP**

Las Figuras 28 y 29 corresponden al rendimiento de las fracciones de PP, según la literatura, donde se tomaron 4 corridas: de 250°C hasta 400°C, distribuidas uniformemente cada 50°C. Ambas presentan un coeficiente de correlación igual a 1 cuando los modelos se ajustan en Excel a funciones polinómicas de grado 3. A diferencia de las curvas anteriores, estas no presentan gran variación en sus fracciones a medida que la temperatura de reacción aumenta. Por ejemplo, el rendimiento de gas aumenta solo un 2% desde la temperatura mínima a la máxima (de 29,5% hasta 31,07%). Sin embargo, es preciso señalar que para este intervalo de temperaturas el rendimiento máximo de aceite, 69,82%, está sobre los 300°C, temperatura a la cual el rendimiento de gas es mínimo, con un valor de 28,84%, demostrando que también se cumple el balance de masas, dándole validez y credibilidad a los resultados.

Demás estudios revisados en la sección 3.3 de la metodología obtuvieron resultados similares para el PP en materia de rendimientos. Cabe resaltar que la ligera variación de las fracciones puede deberse a que la pirólisis se realizó para temperaturas inferiores a los 500°C, a diferencia de los estudios para PET y HDPE donde se llevaron a cabo experimentos con temperaturas superiores, llegando a documentar variación de fracciones más significativas cuando los reactores alcanzaban hasta los 900°C de temperatura. En todo caso, desde el punto de inflexión(300°C) en adelante, el

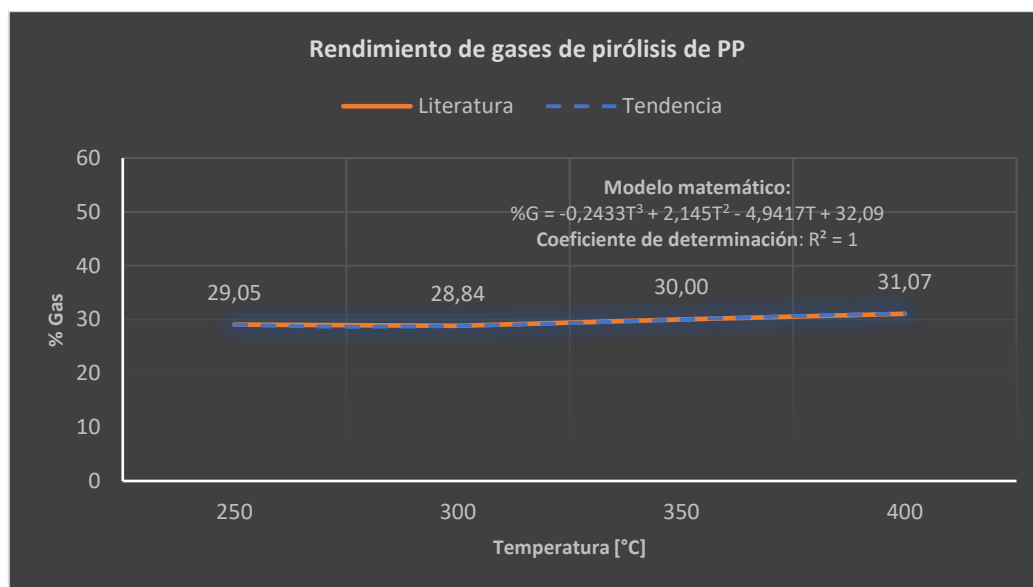
rendimiento de aceite presenta tendencia negativa, mientras que el de gas tendencia positiva. La elaboración de los modelos de rendimiento está basada en los los resultados del trabajo experimental de Ahmad, I y colaboradores.<sup>26</sup>

Figura 28. Rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PP a temperatura de condensación de 25°C



<sup>26</sup> AHMAD, I., et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. 2015, vol. 12, nro. 7.

Figura 29. Rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de PP a temperatura de condensación de 25°C



**4.3.3 Distribución de productos de pirólisis.** Bajo los criterios de selección planteados en la sección 3.3 y mediante la revisión del material literario, fueron establecidas 3 listas de posibles productos generados durante la pirólisis de los plásticos a estudiar. Los productos son necesarios para la configuración del modelo de reactor *R-GIBBS* que será utilizado en la simulación. En este sentido, los parámetros de funcionamiento de los reactores y generalidades en donde se realizaron los experimentos revisados en la literatura se aprecian en el Anexo L. La Tabla 9 enseña los productos resultantes seleccionados para cada plástico.

Tabla 9. Lista con productos de pirólisis para PET, HDPE y PP

	Polímero		
	PET	HDPE	PP
Productos	WATER	WATER	WATER
	CO2	CO2	CO2
	C	C	C

<b>Polímero</b>		
<b>PET</b>	<b>HDPE</b>	<b>PP</b>
N2	N2	N2
NO2	NO2	NO2
NO	NO	NO
O2	O2	O2
H2	H2	H2
S	S	S
ASH	ASH	ASH
CL2	CL2	CL2
PROPANON	TECTA-01	CH4
BENZO-01	2-HEX-01	C4
DIPHE-01	2-HEP-01	C3
DIPHE-02	2-oct-01	ETHENE
FLUOR-01	P-MEN-01	PROPENE
BENZO-02	1-TRA-01	C4H8
ANTHR-01	CYCLO-01	BUTADIEN
1-BUT-01	2:2:4-01	C6H12
M-TER-01	CYCLO-02	C6H10
METHY-01	BENZE-01	C7H14
CINNA-01	TOLUE-01	C8H16
P-PHE-01	1:7-O-01	C9H18
CARBO-01	CH4	C10H20
	SO2	C11H22
	STYRENE	C13H26
	BIPHENYL	C5
	INDENE	C6
		C7
		C8

		Polímero	
		PET	HDPE
		PP	
		C9	
		C10	
		C11	
		C12	
		C13	
		C14	
		BENZENE	
		TOLUENE	
		XYLENES	
		C8H10	
		STYRENE	
		INDENE	
		BIPHENYL	
<b>Fuente</b>	CEPELIOGULLAR, Özge y PÜTÜN, Ayse. Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life. En: Digital Proceeding Of THE ICOEST'2013, Cappadocia. 2013. pp. 694-706	SU-HWA, Jung, et al. Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. En: <i>Fuel Processing Technology</i> . 2010, vol. 91, nro. 3. pp. 277-284.	- -

Polímero		
PET	HDPE	PP
[DIMITROV, N., et al. Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography. En: Polymer Degradation and Stability. 2013, vol. 98, nro. 5. pp.972-979.		

De la tabla anterior debe acotarse que los primeros 9 productos son moléculas comunes y presentes en la mayoría de las reacciones termoquímicas. Estos no estaban explícitos en la literatura, sin embargo, fue recomendación del director incluirlos en la simulación ya que por razones de disociación molecular o reacciones incompletas podrían aparecer como productos. A demás, es preciso señalar que los hidrocarburos del C<sub>4</sub> al C<sub>13</sub> tienen presencia en los aceites de pirólisis del HDPE y PP así como los productos aromáticos benceno, tolueno, difenil, xileno, estireno, siendo característicos en la pirólisis de estos polímeros.<sup>27</sup> Los nombres mostrados en la tabla corresponden a los *ALIAS* o *Component ID* que están incluidos en las bibliotecas de *Aspen Plus*®.

<sup>27</sup> SU-HWA, Jung, et al. Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. En: Fuel Processing Technology. 2010, vol. 91, nro. 3.

## 4.4 SIMULACIÓN

**4.4.1 Escenarios de pirólisis de los residuos plásticos.** Los siguientes ítems muestran los resultados generales de la pirólisis para los 3 polímeros, señalando las etapas, bloques y corrientes que conforman el esquema de planta, además de los flujos másicos por corriente. Es preciso mencionar que las simulaciones se realizaron a las mismas temperaturas de reacción que sus respectivos estudios de la sección 4.3.2 (estudios de rendimiento). En orden de mostrar el escenario general en la fase final de cada experimento, los resultados que se muestran a continuación corresponden a las simulaciones llevadas a cabo con la temperatura final y más alta de cada estudio. Estas temperaturas fueron 973°C, 650°C y 400°C para el PET, HDPE y PP respectivamente. Las comparaciones con la literatura se llevarán a cabo en las secciones 4.4.2 y 4.4.3 para validación de rendimiento de fracciones y distribución de productos, respectivamente.

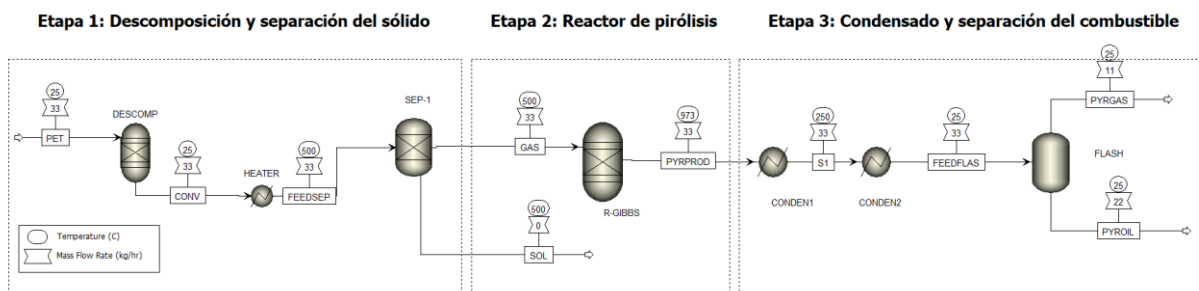
Por otra parte, son necesarios los flujos másicos disponibles de cada polímero como dato de entrada para las simulaciones. De acuerdo con los resultados obtenidos en la sección 4.2, este proyecto propone utilizar una planta de pirólisis una vez por mes, donde se consuma cada fracción de residuos en una hora. En este orden de ideas, el flujo másico de PET sería 32,61 kg/h, el de HDPE 13,3 kg/h y el del PP 11,4 kg/h.

- Como generalidades finales para las simulaciones, debe acotarse que:
- El esquema de planta tiene misma distribución para las tres simulaciones.
- La presión en todos los bloques fue de 1 atm.
- Los análisis próximos y últimos utilizados en cada simulación fueron los seleccionados de la literatura, mostrados en la sección 4.3.1.
- La temperatura del material de entrada no convencional fue de 25°C para las tres simulaciones.
- En cada caso, el calentador *HEATER* de la etapa 1 se calibró para que su temperatura fuera siempre fija y menor o igual que la temperatura de reacción mínima en *R-GIBBS*.

- Al bloque *SEP-1* se le configuró para que tomara siempre los mismos compuestos y los separara hacia la corriente de salida *SOL*, como se explica en la sección 3.4.3.1 de la metodología.
- La lista de productos incluidos en la configuración del reactor *R-GIBBS* para cada polímero fue la sugerida por la literatura, en la sección 4.3.3.
- Por simulación de cada polímero, el único dato de entrada que varió fue la temperatura del reactor *R-GIBBS*. Las temperaturas utilizadas fueron las seleccionadas de la literatura, señaladas en las gráficas de la sección 4.3.2. Las demás entradas como parámetros de funcionamiento de los bloques y flujos másicos permanecieron constantes.
- La temperatura de enfriamiento en *CONDEN2* para las 3 simulaciones fue 25°C, como se llevó a cabo en los estudios revisados previamente.
- El separador *FLASH* de la etapa 3 se configuró por defecto. Es decir, utiliza un modelo propio para separar las corrientes de *PYROIL* y *PYRGAS*, en productos los finales líquidos y gaseosos respetivamente.
- Por ser corrientes de salida y desecho, *SOL* y *PYRGAS* no se mencionan en los resultados.

**4.4.1.1 Polietileno Tereftalato (PET).** La Figura 30 muestra el esquema de planta para pirólisis de PET. Encima de cada corriente se encuentra en encierro circular la temperatura y en encierro rectangular los flujos másicos. El flujo de entrada de PET fue de 32,61 kg/h. La reacción se llevó a cabo a 973°C. Los demás parámetros generales de operación se encuentran especificados en el inciso 4.4.1.

Figura 30. Esquema de planta para la simulación de pirólisis de PET



El cuadro 3 muestra los resultados de corrientes de entrada y salida de cada bloque en la simulación, separados por etapas. Para cada corriente se expresa el nombre, la temperatura, flujo másico y fracción en base 100.

Cuadro 3. Resultados de simulación para pirólisis de PET a 973°C. Fuente: autores.

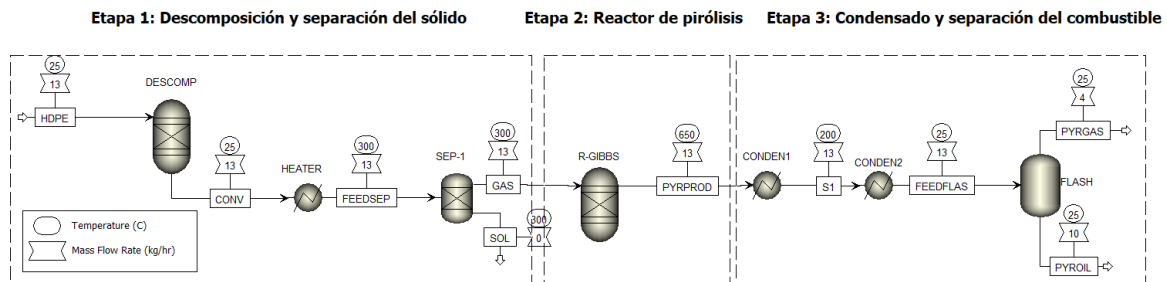
	Bloque	Entrada						Salida					
		Corriente	Temp. [°C]	Flujo [kg/h]	Fracción (%)			Corriente	Temp [°C]	Flujo [kg/h]	Fracción (%)		
					Sólida	Líquida	Vapor				Sólida	Líquida	Vapor
Etapa 1	DESCOMP	PET	25	32,61	Sólido no convencional			CONV	25	32,61	74,76	0	25,23
	HEATER	CONV	25	32,61	74,76	0	25,23	FEEDSEP	500	32,61	74,76	0	25,23
	SEP-1	FEEDSEP	500	32,61	74,76	0	25,23	GAS	500	32,5	74,75	0	25,24
Etapa 2	R-GIBBS	GAS	500	32,5	74,75	0	25,24	PYRRPROD	973	32,5	0	0	100
Etapa 3	CONDEN1	PYRRPROD	973	32,5	0	0	1	S1	250	32,5	0	28,79	71,2
	CONDEN2	S1	250	32,5	0	28,79	71,2	FEEDFLAS	25	32,5	0	66,18	33,81
	FLASH	FEEDFLAS	25	32,5	0	66,18	33,81	PYROIL	25	21,58	0	100	0

De este primer escenario debe señalarse que, partiendo de un flujo inicial de 32,61 kg/h de materia prima, se obtuvo un flujo final de aceite de 21,58 kg/h. Esto indica que para una temperatura de reacción de 973°C se obtuvo un porcentaje de rendimiento general del líquido de 70% en masa, que es un resultado apto y coherente para con el estudio. De la primera etapa de condensación (CONDEN1) a 250°C se obtuvo una fracción de vapor del 71% y 29% de líquido, mientras que de la segunda (CONDEN2), a temperatura ambiente, se obtuvo 66,18% de líquido. Es preciso recalcar que trabajar a esta

temperatura de enfriamiento no implica un gran suministro energético adicional para la condensación. De estos primeros resultados, puede inferirse que el PET, bajo las condiciones de operación especificadas, rinde con facilidad hacia la fracción líquida, teniendo en cuenta que la temperatura de reacción (973°C) sí implica un gasto energético contundente.

**4.4.1.2 Polietileno de alta densidad (HDPE).** La Figura 31 muestra el esquema de planta para pirólisis de HDPE. Encima de cada corriente se encuentra en encierro circular la temperatura y en encierro rectangular los flujos másicos. El flujo de entrada de HDPE fue de 13,3 kg/h. La reacción se llevó a cabo a 650°C, la temperatura máxima de la literatura seleccionada. Los demás parámetros generales de operación se encuentran especificados en el inciso 4.4.1.

Figura 31. Esquema de planta para la simulación de pirólisis de HDPE



El cuadro 4 muestra los resultados de corrientes de entrada y salida de cada bloque en la simulación, separados por etapas. Para cada corriente se expresa el nombre, la temperatura, flujo másico y fracción en base 100.

Cuadro 4. Resultados de simulación para pirólisis de HDPE a 650°C

	Bloque	Entrada						Salida					
		Corriente	Temp [°C]	Flujo [kg/h]	Fracción (%)			Corriente	Temp [°C]	Flujo [kg/h]	Fracción (%)		
					Sólida	Líquida	Vapor				Sólida	Líquida	Vapor
Etapa 1	DESCOMP	HDPE	25	13,3	<i>Sólido no convencional</i>			CONV	25	13,3	86,92	0,65	12,42
	HEATER	CONV	25	13,3	86,92	0,65	12,42	FEEDSEP	300	13,3	86,89	0	13,1
	SEP-1	FEEDSEP	300	13,3	86,89	0	13,1	GAS	300	13,27	86,89	0	13,1
Etapa 2	R-GIBBS	GAS	300	13,27	86,89	0	13,1	PYRRPROD	650	13,27	0	0	100
Etapa 3	CONDEN1	PYRRPROD	650	13,27	0	0	1	S1	200	13,27	0	0,305	99,69
	CONDEN2	S1	200	13,27	0	0,305	99,69	FEEDFLAS	25	13,27	0	71,89	28,1
	FLASH	FEEDFLAS	25	13,27	0	71,89	28,1	PYROIL	25	9,54	0	100	0

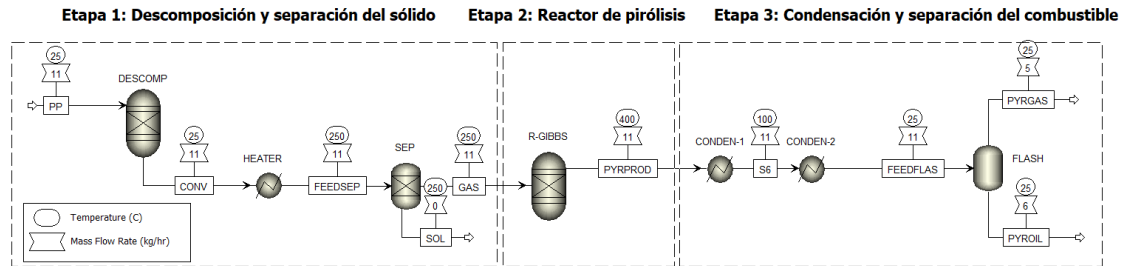
Con un flujo de entrada de 13,3 kg/h y salida de 9,54 kg/h, los resultados señalan un porcentaje de rendimiento en masa hacia la fase líquida (*PYROIL*) de 71%. La condensación final se realizó a 25°C en el bloque *CONDEN2*. La temperatura a la que se desarrolló la reacción, 650°C, es la temperatura más alta del estudio revisado en la literatura. De esto se infiere que para una temperatura media de pirólisis “dura”, el rendimiento en masa alcanza valores comprometedores para con los fines del proyecto.

La diferencia de las fracciones líquidas entre los dos bloques de condensado llama particularmente la atención. Para 200°C, el rendimiento de aceite tocaba apenas valores de 0.3%, mientras que para la fase final de condensación aumentó abruptamente a 72%. Estos valores permiten concluir que, específicamente para la pirólisis de este polímero, la temperatura de enfriamiento a la que se calibren los condensadores marca una gran diferencia en los resultados de rendimiento líquido.

**4.4.1.3 Polipropileno (PP).** La Figura 32 muestra el esquema de planta para pirólisis de PP. Encima de cada corriente se encuentra en encierro circular la temperatura y en encierro rectangular los flujos másicos. El flujo de entrada de HDPE fue de 11,4 kg/h. La reacción se llevó a cabo a 400°C, la temperatura máxima trabajada en la literatura

seleccionada. Los demás parámetros generales de operación se encuentran especificados en el inciso 4.4.1.

Figura 32. Esquema de planta para la simulación de pirólisis de PP



El cuadro 5 muestra los resultados de corrientes de entrada y salida de cada bloque en la simulación, separados por etapas. Para cada corriente se expresa el nombre, la temperatura, flujo másico y fracción en base 100.

Cuadro 5. Resultados de simulación para pirólisis de PP a 400°C

	Bloque	Entrada						Salida					
		Corriente	Temp [°C]	Flujo [kg/h]	Fracción (%)			Corriente	Temp [°C]	Flujo [kg/h]	Fracción (%)		
					Sólida	Líquida	Vapor				Sólida	Líquida	Vapor
Etapa 1	DESCOMP	PP	25	11,4	<i>Sólido no convencional</i>			CONV	25	11,4	0,8611	0,159	13,73
	HEATER	CONV	25	11,4	0,8611	0,159	13,73	FEEDSEP	250	11,4	0,8611	0	13,89
	SEP-1	FEEDSEP	250	11,4	0,8611	0	13,89	GAS	250	11,39	86,1	0	13,89
Etapa 2	R-GIBBS	GAS	250	11,39	86,1	0	13,89	PYRRPROD	400	11,39	0	0	1
Etapa 3	CONDEN1	PYRRPROD	400	11,39	0	0	1	S6	100	11,39	0	38,98	61,01
	CONDEN2	S6	100		0	38,98	61,01	FEEDFLAS	25	11,39	0	54,73	45,27
	FLASH	FEEDFLAS	25	11,39	0	54,73	45,27	PYROIL	25	6,23	0	1	0

Con un flujo másico de entrada de 11,4 kg/h y 6,23 kg/h de salida, fue convertida una fracción del 54,65% de polipropileno a aceite de pirólisis a 400°C. La literatura señala que el rendimiento máximo para líquido fue alcanzado a los 300°C, donde, de un 100% de materia prima, se obtuvo una conversión de final de 98,66%, donde el 69% corresponde

a fracción líquida.<sup>28</sup> Con un cálculo sencillo de desviación estándar, el error es 20%, al comparar los rendimientos de aceites simulado y experimental. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los resultados señalados anteriormente corresponden para simulación de pirólisis a 400°C, mientras que la literatura obtiene los valores mencionados a 300°C. Posteriormente en la sección 4.4.2 se profundiza en esta área. Por último, es preciso mencionar que, a diferencia del HDPE, este polímero no se ve radicalmente afectado por la temperatura de condensación. De la primera condensación, a 100°C, se obtuvo 39% de líquido, mientras que, de la segunda etapa, a temperatura ambiente, se obtuvo 54% de líquido. Estos valores indican un aumento del 15% hacia rendimiento de aceite, por 75°C de diferencia entre los bloques *CONDEN1 Y CONDEN2*.

#### **4.4.2 Validación de rendimientos**

En esta sección se compararon los rendimientos de las 3 simulaciones con los experimentos revisados en la literatura y expuestos en la sección 4.3.2. De esta manera, se puede observar en la pirólisis de cada polímero, cómo varían las fracciones de líquido y vapor en función de las 4 temperaturas de reacción. Además, se calcularon los errores de los rendimientos entre simulación y literatura mediante la función *DESVEST* de Excel y se mostraron en una tabla, donde también se resaltaron en gris los valores máximos de rendimientos del líquido, en cada caso. Debe acotarse que para el estudio del PET sólo se cuenta con datos bibliográficos de rendimiento líquido.

##### **4.4.2.1 Polietileno tereftalato (PET)**

La Figura 33 muestra las curvas de fracción líquida obtenida para el PET en función de la temperatura, según la simulación (teórica) y según la literatura (experimental).<sup>29</sup> La temperatura de condensación fue de 25°C. Se evidencia que la fracción líquida se maximiza en 773°C, llegando a 63% (ver Figura 33). Luego disminuye hasta 45% en la temperatura máxima de reacción. Los resultados para este comportamiento fueron

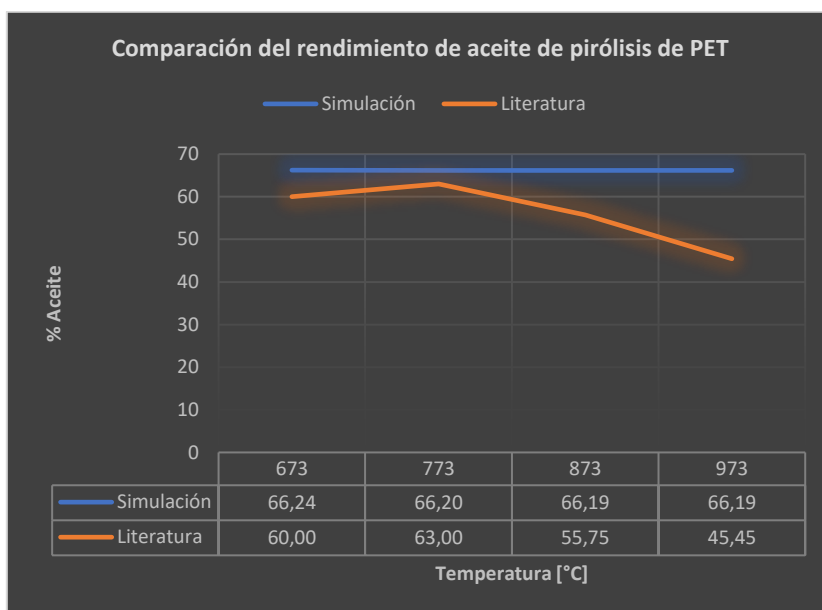
---

<sup>28</sup> AHMAD, Imtiaz, Op. Cit., p. 40.

<sup>29</sup> CIT, Ilkay, Op. Cit.

analizados en la sección 4.3.2. Por su parte, la curva de rendimiento de la simulación muestra una tendencia ligeramente ascendente.

Figura 33. Comparación de rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PET con temperatura de condensación de 25°C



El cuadro 6 muestra las comparaciones entre los rendimientos para cada temperatura.

Cuadro 6. Resultados de desviación estándar de fracción líquida para pirólisis de PET condensado a 25°C

<b>ACEITE DE PIRÓLISIS</b>				
<b>CONDENSADO</b>	<b>R-GIBBS</b>	<b>SIMULACIÓN</b>	<b>LITERATURA</b>	<b>COMPARACIÓN</b>
<b>Temperatura [C°]</b>	<b>Temperatura [C°]</b>	<b>% Líquido</b>	<b>% Líquido</b>	<b>Desviación std (%)</b>
25	673	<b>66,24</b>	60,00	<b>4,4155</b>
	773	66,20	<b>63,00</b>	<b>2,2659</b>
	873	66,19	55,75	<b>7,3838</b>
	973	66,19	45,45	<b>14,6626</b>

Los valores de porcentaje líquido de simulación muestran que la variación de la fracción fue menor al 1% durante las 4 corridas. Debe señalarse que se realizó una simulación previa en donde se condensaron los líquidos a 70°C para comparar como cambiaba la fracción de aceite y no se notaron reales cambios. Sin embargo, es preciso mencionar que la desviación de fracciones fueron casi todas menores al 10% y el error más pequeño está para la temperatura de mayor rendimiento de la literatura (773°C).

**4.4.2.2 Polietileno de alta densidad (HDPE).** Las Figuras 34 y 35 muestra las curvas de rendimiento para líquido y vapor respectivamente, obtenida para el HDPE en función de la temperatura, según la simulación(teórica) y según la literatura(experimental).<sup>30</sup> La temperatura de condensación fue de 25°C. el cuadro 7 muestra las comparaciones entre los rendimientos de ambas fracciones, para cada temperatura de reacción.

En comparación, puede apreciarse que, a medida que el rendimiento líquido de la simulación aumenta con la temperatura, el de vapor disminuye en igual proporción. Esto indica de entrada que la masa se conserva durante las 4 corridas. El punto de máximo rendimiento líquido en la literatura estuvo sobre los 580°C, alcanzando 24,2%, muy cercano al rendimiento de la simulación para la misma temperatura (26%). Debe resaltarse que los datos para graficar las curvas de simulación de líquido fueron tomados de la corriente *PYROIL*, y los datos de vapor fueron tomados de la corriente *PYRGAS* donde solo se conservan gases no condensables de pirólisis. Ambas corrientes finales se ubican después de la condensación a temperatura ambiente.

---

<sup>30</sup> SOLIMAN, Aya, Op. Cit.

Figura 34. Comparación de rendimiento de fracción líquida para pirólisis de HDPE con temperatura de condensación de 25°C

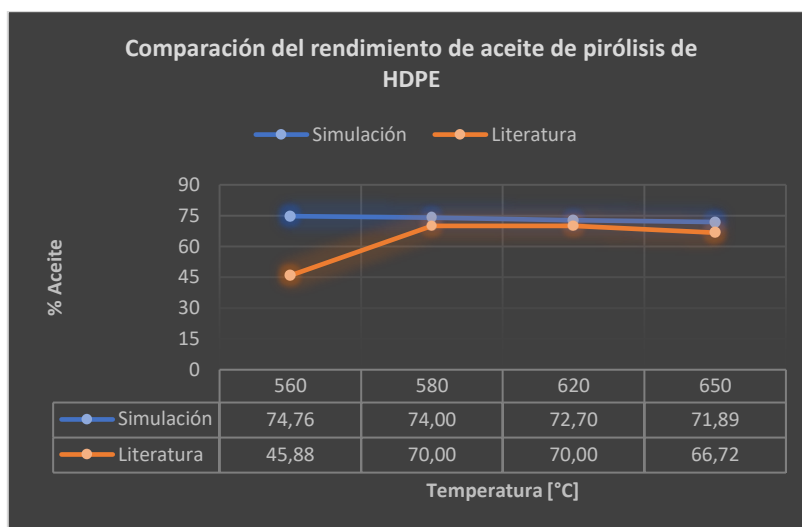
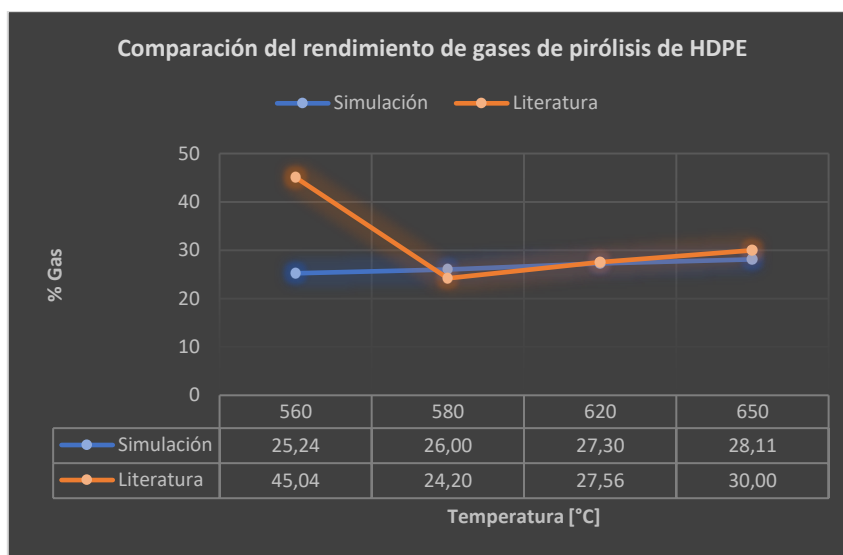


Figura 35. Comparación de rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de HDPE con temperatura de condensación de 25°C



Por su parte, el cuadro 7 enseña que los errores fueron menores al 3% en su mayoría. La temperatura donde más se presentó desviación para ambas fracciones fue 560°C, la primera de las 4 corridas. De lo anterior se puede concluir que, por ser la primera corrida, hubo quizás un error en la literatura al momento de hacer la toma de ese dato. Esto se

puede deber a una mala calibración inicial en la termocupla del sistema. A demás, las comparaciones indican que en general las curvas de simulación se correlacionan y ajustan apropiadamente con las de la literatura, para ambas fracciones.

Cuadro 7. Resultados de desviación estándar de fracción líquida y gaseosa para pirólisis de HDPE condensado a 25°C

		ACEITE DE PIRÓLISIS			GASES DE PIRÓLISIS NO CONDENSABLES		
CONDENSADO	R-GIBBS	SIMULACIÓN	LITERATURA	COMPARACIÓN	SIMULACIÓN	LITERATURA	COMPARACIÓN
Temp [C°]	Temp. [°C]	% Líquido	% Líquido	Desviación std (%)	% Vapor	% Vapor	Desviación std (%)
25	560	74,76	45,88	20,4216	25,24	45,04	14,0011
	580	74,00	70,00	2,8292	26,00	24,20	1,2720
	620	72,70	70,00	1,9066	27,30	27,56	0,1812
	650	71,89	66,72	3,6564	28,11	30,00	1,3371

**4.4.2.3 Polipropileno (PP).** Las Figuras 36 y 37 muestra las curvas de rendimiento para líquido y vapor respectivamente, obtenida para el PP en función de la temperatura, según la simulación (teórica) y según la literatura (experimental).<sup>31</sup> La temperatura de condensación fue de 25°C. El cuadro 8 muestra las comparaciones entre los rendimientos de ambas fracciones, para cada temperatura de reacción.

<sup>31</sup> AHMAD, Imtiaz, Op. Cit.

Figura 36. Comparación de rendimiento de fracción líquida para pirólisis de PP con temperatura de condensación de 25°C

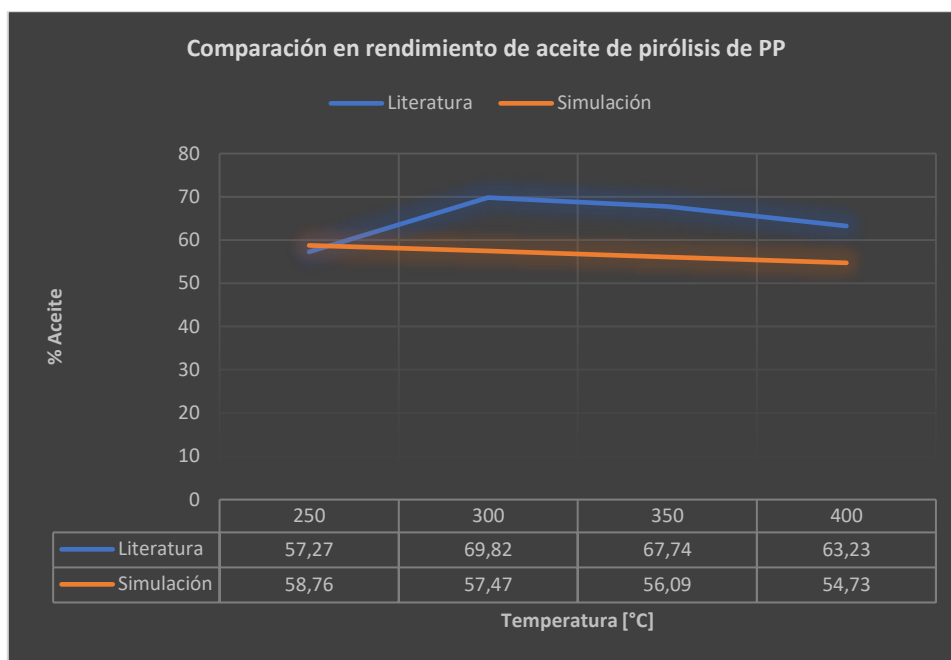
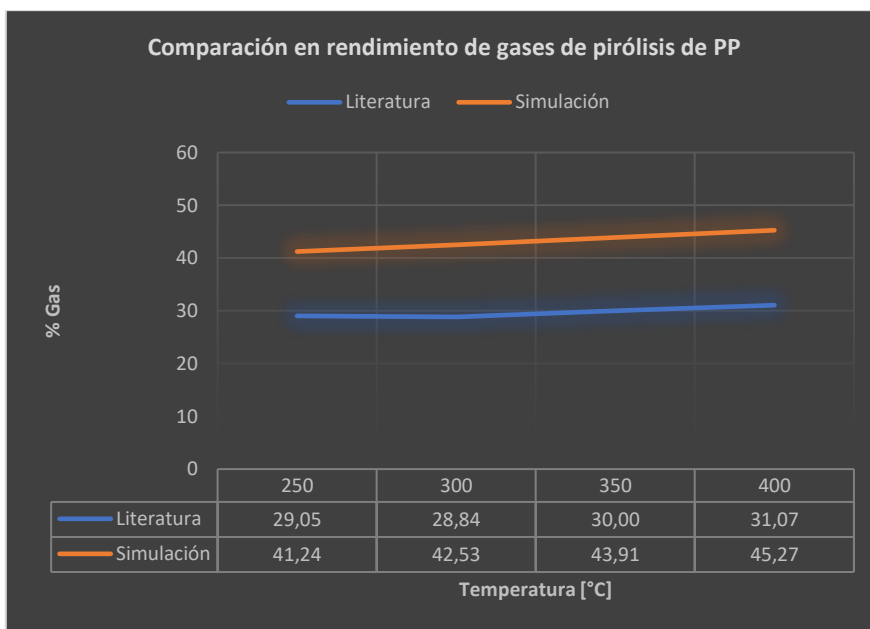


Figura 37. Comparación de rendimiento de fracción gaseosa para pirólisis de PP con temperatura de condensación de 25°C



Cuadro 8. Resultados de desviación estándar de fracción líquida y gaseosa para pirólisis de PP condensado a 25°C

		ACEITE DE PIRÓLISIS			GASES DE PIRÓLISIS NO CONDENSABLES		
CONDENSADO	R-GIBBS	SIMULACIÓN	LITERATURA	COMPARACIÓN	SIMULACIÓN	LITERATURA	COMPARACIÓN
Temp. [C°]	Temp. [C°]	% Líquido	% Líquido	Desviación std. (%)	% Vapor	% Vapor	Desviación std. (%)
25	250	58,76	57,27	<b>1,0562</b>	41,24	29,05	<b>8,6171</b>
	300	57,47	69,82	<b>8,7304</b>	42,53	28,84	<b>9,6779</b>
	350	56,09	67,74	<b>8,2343</b>	43,91	30,00	<b>9,8324</b>
	400	54,73	63,23	<b>6,0104</b>	45,27	31,07	<b>10,0409</b>

En las curvas de simulación puede apreciarse cómo, a medida que aumenta la temperatura, las fracciones son inversamente proporcionales entre sí, lo que indica conservación de la masa. Ambas curvas presentaron tendencia lineal. El rendimiento para 250°C fue casi el mismo para la curva experimental y teórica del aceite, con valores de 57,27% y 58,76% respectivamente (1% de error), y para la última temperatura, simulación y literatura difirieron solo en un 6%. A manera general, se puede concluir de las gráficas que los rendimientos obtenidos en Apen Plus se ajustaron bien a los experimentales.

El cuadro 8 muestra los errores entre rendimientos para ambas fracciones, que no estuvieron por encima del 10%. Como se mencionó anteriormente, hubo apenas un 1% de error en la fracción de líquido (primera corrida), y un máximo de 8,7% (segunda). Respecto a las curvas de vapor, se presentaron ambas con tendencias lineales positivas, describiendo dos rectas casi paralelas. El mayor error fue de 10% y se dio en la última corrida, donde se alcanzó un rendimiento teórico y experimental de 45,27% y 31,07% respectivamente. Con estos resultados, la simulación puede considerarse válida en comparación con la literatura.

#### 4.4.3 Validación de productos

**4.4.3.1 Polietileno tereftalato (PET).** El cuadro 9 muestra la lista de productos de pirólisis de PET, sugerida por y anteriormente mostrada en la sección 4.3.2.<sup>32</sup> Esta lista fue introducida al bloque *R-GIBBS* para la simulación de PET. Además, la tabla muestra los resultados de la distribución de productos en fracción de base 1. Las temperaturas de reacción fueron las mismas utilizadas en 673°C, 773°C, 873°C y 973°C.<sup>33</sup> Sin embargo, en orden de validar los resultados para la temperatura de mayor rendimiento líquido, los datos mostrados corresponden a la segunda corrida (773°C).

Cuadro 9. Distribución de productos para pirólisis de PET a 773°C y condensación a 25°C

Compuestos obtenidos	Corrientes		
	GAS	PYRPROD	PYROIL
WATER	0,00610061	4,43E-06	6,05E-06
CO2	0	1,61E-04	1,12E-06
C	0,74758649	1,69E-26	0
N2	0,04850714	4,85E-02	2,20E-05
NO2	0	0	0
NO	0	2,16E-18	0
O2	0,15903981	4,89E-27	0
H2	0,03876595	1,68E-03	5,21E-08
S	0	0	0
ASH	0	0	0
CL2	0	0	0
PROPANON	0	2,82E-12	0
BENZO-01	0	6,77E-13	0
DIPHE-01	0	4,44E-03	6,71E-03
DIPHE-02	0	0	0

<sup>32</sup> CEPELIOGULLAR, Özge y PÜTÜN, Ayse, Op. Cit.

<sup>33</sup> CIT, Ilkay, et al., Op. Cit.

Compuestos obtenidos	Corrientes		
	GAS	PYRPROD	PYROIL
FLUOR-01	0	7,11E-02	0,107
BENZO-02	0	8,26E-11	1,25E-10
ANTHR-01	0	5,85E-01	0,8842
1-BUT-01	0	0	0
M-TER-01	0	9,63E-04	1,45E-03
METHY-01	0	3,84E-23	0
CINNA-01	0	1,05E-15	0
P-PHE-01	0	0	0
CARBO-01	0	2,88E-01	1,41E-04
C4	0	2,91E-11	4,76E-12

La intención de mostrar las corrientes de entrada y salida del reactor (*GAS Y PYRPROD*), y la corriente final de líquido separado (*PYROIL*), es para apreciar cómo los productos se van transformando antes y después de la reacción, y antes y después del enfriamiento/condensación. La corriente *GAS* está compuesta por moléculas simples: hidrógeno, nitrógeno, azufre, oxígeno, carbono y humedad, calculadas por el reactor *DESCOMP* y separadas del sólido por *SEP-1*. El modelo de reactor *R-GIBBS* convirtió estas moléculas en los productos sugeridos por la literatura, mediante su algoritmo de funcionamiento: minimización de energía libre de Gibbs y equilibrio termodinámico.

Así, se puede observar que esta corriente de pirólisis cuenta con la presencia de la mayoría de los productos esperados, de donde puede inferirse que se obtienen resultados esperados. Debe acotarse que el producto fenantreno (*P-PHE-01*), aunque se encuentra en la lista de sugeridos por la literatura, no intervino en las reacciones pues el software no contaba con las propiedades físicas en sus librerías y se emitía un mensaje de error al correr la simulación. Por esta razón, se decidió excluirlo.

Finalmente, en la tabla se resaltan en gris los productos que componen a la fracción de líquido: antraceno y fluoren, con 88,42% y 10,7%. El antraceno es un hidrocarburo aromático de usual presencia en pirólisis de plásticos y caucho, junto a otros aromáticos como el xileno, benceno y tolueno.<sup>34</sup> Tiene un punto de ebullición de 342°C, de inflamación de 121°C y de autoignición de 538°C. Es insoluble en agua pero se disuelve bien en benceno caliente. Tiene propiedades combustibles.<sup>35</sup> Casi todo el antraceno es oxidado para dar antraquinona y por lo tanto sustancia de partida en la síntesis de una amplia gama de colorantes como la alizarina. Además, se utiliza en la síntesis de algunos insecticidas, conservantes, etc.<sup>36</sup> Esto indica que la fracción líquida obtenida teóricamente en pirólisis de 773°C y condensación de 25°C está conformada principalmente por antraceno y fluoren, ambos contenedores de energía disponible para utilizar en algún proceso industrial – térmico.

**4.4.3.2 Polietileno de alta densidad (HDPE).** El cuadro 10 muestra la lista de productos de pirólisis de HDPE, sugerida por [27]<sup>37</sup> y anteriormente mostrada en la sección 4.3.2. Esta lista fue introducida al bloque *R-GIBBS* para la simulación de este polímero. Además, la tabla muestra los resultados de la distribución de productos en fracción de base 1. Las temperaturas de reacción fueron las mismas utilizadas en: 560°C, 580°C, 620°C y 650°C.<sup>38</sup> Sin embargo, en orden de validar los resultados para la temperatura de mayor rendimiento líquido, los datos mostrados corresponden a la segunda corrida(580°C).

---

<sup>34</sup> SU-HWA, Jung et al., Op. Cit.

<sup>35</sup> AHMAD, Imtiaz et al., Op. Cit.

<sup>36</sup> QUÍMICA.ES. Antraceno. Enciclopedia [en línea]. Disponible en: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Antraceno.html>

<sup>37</sup> SU-HWA, Jung et al., Op. Cit.

<sup>38</sup> SOLIMAN, Aya et al., Op. Cit.

Cuadro 10. Distribución de productos para pirólisis de HDPE a 580°C y condensación a 25°C

Compuestos obtenidos	Corrientes		
	GAS	PYRPROD	PYROIL
WATER	0	0	0
CO2	0	0	0
C	0,86896	0	0
N2	0,00020	2,00E-04	9,51E-08
NO2	0	0	0
NO	0	0	0
O2	0	0	0
H2	0,12422	4,86E-02	1,58E-06
S	0,00661	0,0066119	0,00893486
ASH	0	0	0
CL2	0	0	0
TECTA-01	0	0	0
2-HEX-01	0	1,86E-08	1,59E-08
2-HEP-01	0	5,73E-10	6,61E-10
2-oct-01	0	6,69E-12	0
P-MEN-01	0	5,85E-15	0
1-TRA-01	0	1,91E-13	0
CYCLO-01	0	9,00E-24	0
2:2:4-01	0	9,31E-23	0
CYCLO-02	0	1,17E-26	0
BENZE-01	0	7,00E-01	0,69315331
TOLUE-01	0	2,45E-01	0,29791013
1:7-O-01	0	1,23E-20	0

Las corrientes de entrada y salida del reactor (*GAS Y PYRPROD*), y la corriente final de líquido separado (*PYROIL*), se muestran en orden de apreciar cómo los productos se van transformando durante la pirólisis y durante enfriamiento/condensación. La corriente *GAS* está compuesta por moléculas simples: hidrógeno, nitrógeno, azufre, oxígeno, carbono y humedad, calculadas por el reactor *DESCOMP* a partir del análisis próximo y último, y separadas del sólido por *SEP-1*. El modelo de reactor *R-GIBBS* convirtió estas moléculas en productos sugeridos por la literatura mediante la minimización de energía libre de Gibbs y equilibrio termoquímico.

Los productos esperados aparecen en un 95%, desde el hexeno (*2-HEX-01*) hasta el tolueno (*TOLUE-01*), comprobando de esta forma la existencia de productos reales de pirólisis de HDPE en la simulación. La tabla resalta en gris los compuestos de mayor abundancia en la fracción final de combustible: benceno y tolueno con 69,31% y 29,79% de presencia, respectivamente. Estos dos compuestos pertenecen al grupo de los hidrocarburos aromáticos y se encuentran normalmente en procesos térmicos y termoquímicos donde intervienen plásticos, pigmentos, caucho, entre otros.<sup>39</sup>

El benceno, conocido también como benzol, es un componente importante de la gasolina y es usado en muchos procesos de manufactura. Se evapora rápidamente en el aire y es solo ligeramente soluble en agua. Es un compuesto sumamente inflamable.<sup>40</sup> Tiene un punto de ebullición de 79°C y una temperatura de autoinflamación de 498°C. Es una sustancia reactiva y bajo condiciones ambientales es químicamente estable.<sup>41</sup>

Así, se llega a la conclusión de que, para una pirólisis de HDPE a 580°C, la primera fracción de líquido obtenida luego de condensar los productos a temperatura ambiente está compuesta en un 70% de benceno y 30% de tolueno, fracción potencialmente utilizable en procesos industriales, térmicos y de manufactura.

---

<sup>39</sup> SU-HWA, Jung et al., Op. Cit.

<sup>40</sup> AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES, ATSDR. Resumen de Salud Pública. 2007.

<sup>41</sup> ROTH. Ficha de datos de seguridad. 2006.

**4.4.3.3 Polipropileno (PP).** El cuadro 11 muestra la lista de productos de pirólisis de PP, encontrada en experimentos por Su-Hwa y colaboradores.<sup>42</sup> Precisamente, es el mismo estudio de donde se extrajeron los productos del polietileno de alta densidad. Esta lista fue introducida al bloque *R-GIBBS* para la simulación de pirólisis del polipropileno. Además, la tabla muestra los resultados de la distribución de productos en fracción de base 1. En orden de validar resultados, las temperaturas de reacción fueron las mismas utilizadas en: 250°C, 300°C, 350°C y 400°C.<sup>43</sup> Sin embargo, los datos mostrados en la tabla anterior corresponden a la segunda corrida(300°C), donde se obtuvo un mayor rendimiento líquido.

Cuadro 11. Distribución de productos para pirólisis del PP a 300°C y condensación a 25°C

Compuestos obtenidos	Corrientes		
	GAS	PYRPROD	PYROIL
WATER	0	0	0
CO2	0	0	0
CO	0	0	0
C	0,86108611	8,02E-45	0
N2	0,00140014	0,00140014	4,58E-07
H2	0,13591359	3,13E-05	6,99E-10
O2	0	0	0
NO2	0	0	0
NO	0	0	0
S	0,00160016	0,00160016	0,00278418
CL2	0	0	0
ASH	0	0	0
CH4	0	0,36893153	0,0003235

<sup>42</sup> SU-HWA, Jung et al., Op. Cit.

<sup>43</sup> AHMAD, Imtiaz et al., Op. Cit.

Compuestos obtenidos	Corrientes		
	GAS	PYRPROD	PYROIL
C4	0	1,24E-08	1,53E-09
C3	0	2,17E-06	7,19E-08
ETHENE	0	5,88E-07	2,71E-09
PROPENE	0	9,50E-08	2,58E-09
C4H8	0	9,09E-10	1,22E-10
BUTADIEN	0	3,30E-11	3,55E-12
C6H12	0	3,44E-14	0
C6H10	0	0	0
C7H14	0	3,93E-16	0
C8H16	0	6,73E-19	0
C9H18	0	5,07E-18	0
C10H20	0	1,13E-19	0
C11H22	0	1,78E-31	0
C13H26	0	3,01E-35	0
C5	0	6,09E-11	2,26E-11
C6	0	2,38E-13	0
C7	0	1,01E-15	0
C8	0	4,56E-18	0
C9	0	1,59E-20	0
C10	0	6,49E-23	0
C11	0	2,72E-25	0
C12	0	9,88E-28	0
C13	0	4,27E-30	0
C14	0	1,53E-32	0
BENZENE	0	0,12387906	0,12815952
TOLUENE	0	0,02795847	0,04036377
XYLENES	0	0	0

Compuestos obtenidos	Corrientes		
	GAS	PYRPROD	PYROIL
C8H10	0	7,63E-33	0
STYRENE	0	6,15E-06	1,03E-05
INDENE	0	0,00051526	0,00088957
BIPHENYL	0	0,47567509	0,82746867

En la tabla se muestran las corrientes de entrada y salida del reactor (*GAS Y PYRPROD*), y la corriente final de líquido separado (*PYROIL*). Se puede apreciar cómo en los primeros productos de pirólisis (*PYRPROD*) los compuestos extraídos de la bibliografía aparecen en diferentes fracciones.

El metano (CH<sub>4</sub>), resaltado en gris, está en un 36% de la fracción total de *PYRPROD* y tiene presencia muy baja en *PYROIL* (0.032%). De esto se puede inferir que los productos de pirólisis del PP también pueden rendir hacia gases como el metano. Es preciso señalar que ese rendimiento se obtuvo para pirólisis a 300°C, donde se maximiza la fracción líquida. Es decir que, para temperaturas más altas de reacción, se puede llegar a mejorar la fracción gaseosa mediante pirólisis. Sin embargo, existen procesos mejor orientados para estos fines como la gasificación.

Por otro lado, los compuestos de mayor presencia en el líquido fueron el bifenilo en 82,74% y benceno en 12,81%. El benceno es el hidrocarburo aromático principal de este grupo, usualmente presente en pirólisis de plásticos, caucho y pigmentos.<sup>44</sup> Este compuesto está presente en la fracción líquida del HDPE, como se señaló en el inciso anterior. El bifenilo (o difenil) por su parte, en solución es un líquido incoloro. Tiene propiedades combustibles, es insoluble en agua y soluble en disolventes orgánicos comunes.<sup>45</sup> Tiene un punto de ebullición de 256°C, de inflamación de 113°C y de

<sup>44</sup> SU-HWA, Jung et al., Op. Cit.

<sup>45</sup> ONLINE COSMOS. Información Técnica y Comercial del Bifenilo (fenilbenceno, difenilo) [en línea]. Disponible en: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/bifenilo-fenilbenceno-difenilo-cxqh.html>

autoignición de 540°C.<sup>46</sup> Esto indica que la fracción líquida final de pirólisis a 300°C y condensación a temperatura ambiente contiene gran porcentaje de un compuesto potencialmente utilizable en aplicaciones energéticas.

---

<sup>46</sup> ONU. Ficha técnica Bifenilo. 2006.

## 5. CONCLUSIONES

- Al considerar la población universitaria y la producción per-cápita de plástico se estima que la universidad presenta una tasa de generación de plástico con un potencial de aprovechamiento significativamente superior.
- La caracterización de los residuos plásticos proporciona información acerca de patrones de consumo en el campus. Esto permite tomar decisiones efectivas en la implementación de estrategias que contemplen el aprovechamiento energético de los mismos mediante proyectos impulsados por los entornos académicos
- Se concluye que la metodología de investigación propuesta para el objetivo dos fue eficaz y permitió conseguir la información requerida para con el proyecto.
- Se puede inferir que los análisis próximos y últimos guardaron una relación directa con los productos obtenidos durante la simulación, ya que en estos análisis estaban presentes las fracciones de carbono e hidrógeno de cada plástico que, luego del proceso termoquímico, se transforman finalmente en los compuestos de los productos líquidos aprovechables. Los aceites producidos en las 3 simulaciones se conforman principalmente por hidrocarburos aromáticos que tienen propiedades combustibles y de reactividad, que, debido a sus características, tienen campo de aplicación a nivel industrial y energético.
- En relación con los comportamientos de las curvas de rendimiento, se puede concluir que las temperaturas de reacción y condensación son las variables más influyentes. Finalmente, puede concluirse que, a menor temperatura de condensación, se alcanzan mejores rendimientos de aceite. Sin embargo, esto puede implicar gastos energéticos adicionales.

- De este proyecto se concluye que puede llevarse a cabo un estudio acerca de pirólisis de residuos plásticos para analizar el proceso de transformación hacia productos con mayor energético sin la estricta condición de realizar experimentos reales. No obstante, sí tomando en cuenta datos fidedignos del contexto.

## 6. TRABAJO FUTURO

Como complemento a los desarrollos previos, también se pueden incluir las siguientes actividades:

- Estudiar las aplicaciones que pueda tener el poliestireno expandido (PS) dentro de un proceso termoquímico o afín, teniendo en cuenta su presencia como residuo en el campus universitario y su exclusión en la pirólisis.
- Llevar a cabo experimentos reales de pirólisis en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica y validar los resultados mediante la simulación.
- Dotar el proceso de simulación con configuraciones más precisas para acercarlo más a la realidad, como por ejemplo la configuración de los intercambiadores de calor, teniendo en cuenta factores como la transferencia de calor posible entre los productos de pirólisis y agua a temperatura ambiente.
- Ampliar el proyecto hacia el análisis cuantitativo del potencial energético que ofrecen los productos de las fracciones líquidas obtenidas de la simulación, así como las aplicaciones que se le puedan dar en la industria.
- Realizar un estudio de viabilidad de instalación de una planta de pirólisis a escala donde se contemplen aspectos sociales, tecnológicos, económicos y analizará los posibles beneficios energéticos de los productos resultantes.

## BIBLIOGRAFIA

AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES, ATSDR. Resumen de Salud Pública. 2007.

AGUIAR TRUJILLO, L., et al. Rendimiento de los productos del proceso de pirolisis en lecho fijo de los residuos de naranja del proceso de obtención de jugos concentrado en la provincia de Pinar del Rio, Cuba. En: Ingeniería Mecánica, 2009, vol. 12, nro. 3, pp. 67-74.

AHMAD, I., et al. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products. En: International Journal of Green Energy. 2015, vol. 12, nro. 7.

AMAR GIL, Sebastián. Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. En: Ingeniería y Desarrollo. 2019, vol. 37, nro. 2.

ARACIL SÁEZ, Ignacio. Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP) [en línea]. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 2008. [Consultado 10 febrero 2023]. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis\\_doctoral\\_ignacio\\_aracil.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf)

BALLESTEROS GÓMEZ, Luis Eduardo, et al. Estudio del aprovechamiento de los residuos celulosicos de la basura de la UIS. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bucaramanga, 1985.

BENÉS GONZÁLEZ, Mario. Hidrodesoxigenación de Bio-oil procedente de la pirolisis flash de biomasa [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Universidad Zaragoza, 2017. [Consulta 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/64027/files/TAZ-TFG-2017-3457.pdf>

BRIDGWATER, A. V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids [en línea]. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1999, vol. 51, nro. 1-2. [Consulta 12 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237099000054>

BROOKS, Amy; JAMBECK, Jenna y MOZO REYES, Eliana. Gestión y fuga de residuos plásticos en América Latina y el Caribe. BID, 2020.

CEPELIOGULLAR, Özge y PÜTÜN, Ayse. Thermal and kinetic behaviors of biomass and plastic wastes in co-pyrolysis. En: Energy Conversion and Management. 2013, vol. 75. pp. 263-270.

CEPELIOGULLAR, Özge y PÜTÜN, Ayse. Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life. En: Digital Proceeding Of THE ICOEST'2013, Cappadocia. 2013. pp. 694-706

CIT, Ilkay, et al. Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET. En: Polymer Bulletin. 2010, vol. 64. pp. 817-834.

DEMIRBAS, A. The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. En: Fuel Processing Technology, 2007, vol. 6.

DÍAZ CALEÑO, Fardy. Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente. [Consulta 11 febrero 2023]. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf?sequence=5>

DIMITROV, N., et al. Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography. En: Polymer Degradation and Stability. 2013, vol. 98, nro. 5. pp.972-979.

DUBDUB, Ibrahim y AL-YAARI, Mohammed. Thermal Behavior of Mixed Plastics at Different Heating Rates: I. Pyrolysis Kinetics. En: Polymers. 2021, vol. 13, nro. 19.

EDEPSA E.S.P. Quiénes somos [Sitio Web]. [Consulta 20 febrero 2023]. Disponible en: <https://edepsaesp.com/quienes-somos-edepsa>

EMAB [sitio web]. Bucaramanga. [Consulta 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://emab.gov.co/>

HEIKKINEN, J.M., et al. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2004, vol. 71, nro.2 pp. 883-900.

LINDWALL, Courtney. Plásticos de un solo uso 101. En: NRCD [Sitio Web]. Nueva York: Guide. [Consulta 11 de febrero 2023]. Disponible en: <https://www.nrdc.org/es/stories/plasticos-solo-uso-101#evitar>

MANCHENO, Myriam, et al. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. En: La Granja. Revista de Ciencias de la Vida. 2016, vol. 23, nro.1, pp. 60-67.

MASP y GREENPEACE COLOMBIA. Colombia, mejor sin plásticos. La contaminación plástica en Colombia y el mundo. 20'18.

MIANDAD, R. et al. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. En: International Biodeterioration & Biodegradation. 2017, vol. 119. pp.239-252.

MIN-HAWN, Cho; SU-HWA, Jung y JOO-SIK, Kim. Pyrolysis of Mixed Plastic Wastes for the Recovery of Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) Aromatics in a Fluidized Bed and Chlorine Removal by Applying Various Additives. En: Energy Fuel. 2010, vol. 24, nro. 2. pp. 1389-1395.

MONTES CORTÉS, Carolina. Estudio de los Residuos Sólidos en Colombia. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, 2018. ISBN: 9789587729245.

ONLINE COSMOS. Información Técnica y Comercial del Bifenilo (fenilbenceno, difenilo) [en línea]. Disponible en: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/bifenilo-fenilbenceno-difenilo-cxqh.html>

ONU MEDIO AMBIENTE. Plásticos de un solo uso: Una hoja de ruta para la sostenibilidad. 2018. p. 1-104.

ONU. Ficha técnica Bifenilo. 2006.

QUÍMICA.ES. Antraceno. Enciclopedia [en línea]. Disponible en: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Antraceno.html>

ROTH. Ficha de datos de seguridad. 2006.

SMV. Cómo realizar el correcto tratamiento de los residuos plásticos. Servicios Medioambientales de Valencia. 2019.

SOLIMAN, Aya, et al. Pyrolysis of low-density polyethylene waste plastics using mixtures of catalysts. En: Journal of Material Cycles and Waste Management. 2020, vol. 22. pp. 1399-1406.

SU-HWA, Jung, et al. Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. En: Fuel Processing Technology. 2010, vol. 91, nro. 3. pp. 277-284.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. UIS en cifras [sitio web]. Bucaramanga. [Consulta 13 febrero 2023]. Disponible en: <https://uis.edu.co/uis-cifras-es/>

VANGUARDIA. La 'Misión Recicla' aprovecha 2.500 kilos de residuos al día en Bucaramanga [en línea]. Bucaramanga, 2020. [Fecha de consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://tinyurl.com/22wdsI55>

XU, Fanfan, et al. Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis. En: Energy Conversion and Management. 2018, vol. 171. pp. 1106-1115.

ZANNIKOS, F., et al. Converting Biomass and Waste Plastic to Solid Fuel Briquettes. En: Journal of Renewable Energy. 2012, vol. 2013.

## ANEXOS

Anexo A. Residuos plásticos entregados a la misión recicla de la alcaldía de la ciudad de Bucaramanga y EMAB

MISION RECICLA EMAB						
FECHA	CHATARRA	PLÁSTICO (Kg)	CARTÓN (Kg)	PAPEL (Kg)	VIDRIO (Kg)	PLEGADIZA (Kg)
31/03/2022	0	2	0	19	0	0
07/04/2022	0	3	4	10	0	0
12/04/2022	0	7	10	0	4	0
19/04/2022	0	3	4	0	2	0
21/04/2022	0	7	10	0	0	0
09/05/2022	0	0	10	10	0	4
12/05/2022	0	0	15	15	0	0
14/05/2022	0	10	20	10	0	6
16/05/2022	0	15	15	10	0	0
17/05/2022	0	0	4	2	100	0
31/05/2022	0	10	5	0	0	0
02/06/2022	0	0	10	3	0	0
07/06/2022	0	10	25	0	0	5
08/06/2022	0	5	50	0	20	0
18/06/2022	3	0	80	0	20	0
23/06/2022	0	20	60	0	0	0
19/07/2022	0	10	8	0	40	0
25/07/2022	0	10	25	0	0	0
28/07/2022	0	20	30	0	0	0
03/08/2022	0	30	40	0	0	0
08/08/2022	0	10	40	5	0	0
22/08/2022	0	40	50	10	50	0
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>212</b>	<b>515</b>	<b>94</b>	<b>236</b>	<b>15</b>

Anexo B. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en marzo/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE  
RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(218,26 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **marzo** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/03/2022 Hasta 31/03/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
24872	18/03/2022	CARTON	77,70	APROVECHAMIENTO
24872	18/03/2022	VIDRIO R	72,56	APROVECHAMIENTO
24877	25/03/2022	CARTON	56,00	APROVECHAMIENTO
24877	25/03/2022	PAPEL	9,00	APROVECHAMIENTO
24877	25/03/2022	PET	3,00	APROVECHAMIENTO



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)



Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/03/2022 Hasta 31/03/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>218,26</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 6 días del mes de abril de 2022.

Cordialmente,

**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Anexo C. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en abril/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE  
RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(290,59 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **abril** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/04/2022 Hasta 30/04/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
24886	01/04/2022	CARTON	44,00	APROVECHAMIENTO
24886	01/04/2022	PAPEL	100,00	APROVECHAMIENTO
24886	01/04/2022	PET	13,00	APROVECHAMIENTO
25703	13/04/2022	CARTON	36,21	APROVECHAMIENTO
25703	13/04/2022	PAPEL	60,32	APROVECHAMIENTO
25703	13/04/2022	PET	13,80	APROVECHAMIENTO
25714	22/04/2022	CARTON	23,26	APROVECHAMIENTO



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/04/2022 Hasta 30/04/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>290,59</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 4 días del mes de mayo de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Anexo D. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en mayo/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(295,80 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **mayo** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/05/2022 Hasta 31/05/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
25735	06/05/2022	CARTON	46,16	APROVECHAMIENTO
25735	06/05/2022	PAPEL	16,25	APROVECHAMIENTO
25735	06/05/2022	PET	10,24	APROVECHAMIENTO
25743	13/05/2022	CARTON	20,00	APROVECHAMIENTO
25852	20/05/2022	CARTON	91,20	APROVECHAMIENTO
25852	20/05/2022	PAPEL	90,05	APROVECHAMIENTO
25852	20/05/2022	PET	13,90	APROVECHAMIENTO
25863	27/05/2022	CARTON	8,00	APROVECHAMIENTO

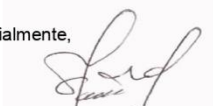


Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
 PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/05/2022 Hasta 31/05/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>295,80</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 6 días del mes de junio de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

---

Anexo E. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en junio/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(595,76 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **junio** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/06/2022 Hasta 30/06/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
25870	03/06/2022	CARTON	133,66	APROVECHAMIENTO
25870	03/06/2022	CHATARRA	6,00	APROVECHAMIENTO
25870	03/06/2022	PET	18,00	APROVECHAMIENTO
26301	10/06/2022	CARTON	10,26	APROVECHAMIENTO
26301	10/06/2022	PAPEL	95,86	APROVECHAMIENTO
25884	17/06/2022	CARTON	96,00	APROVECHAMIENTO
25884	17/06/2022	PAPEL	128,00	APROVECHAMIENTO
25884	17/06/2022	PET	3,00	APROVECHAMIENTO
25892	24/06/2022	CARTON	56,92	APROVECHAMIENTO
25892	24/06/2022	CHATARRA	17,82	APROVECHAMIENTO
25892	24/06/2022	PAPEL	13,96	APROVECHAMIENTO
25892	24/06/2022	PET	16,28	APROVECHAMIENTO

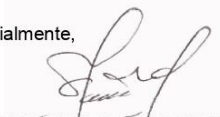


Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
 PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/06/2022 Hasta 30/06/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>595,76</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 7 días del mes de julio de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepso@edepso.com](mailto:edepso@edepso.com)

Anexo F. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en agosto/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE  
RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(1.225,27 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **agosto** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/08/2022 Hasta 31/08/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
26286	05/08/2022	CARTON	75,20	APROVECHAMIENTO
26286	05/08/2022	PLASTICO	19,65	APROVECHAMIENTO
26286	05/08/2022	PAPEL	15,80	APROVECHAMIENTO
26286	05/08/2022	PLEGADIZA	10,55	APROVECHAMIENTO
26834	12/08/2022	CARTON	254,50	APROVECHAMIENTO
26834	12/08/2022	PAPEL	344,00	APROVECHAMIENTO
26834	12/08/2022	PLEGADIZA	79,00	APROVECHAMIENTO
26834	12/08/2022	PET	29,00	APROVECHAMIENTO
26853	19/08/2022	CARTON	86,40	APROVECHAMIENTO
26853	19/08/2022	CHATARRA	6,10	APROVECHAMIENTO
26853	19/08/2022	PAPEL	167,65	APROVECHAMIENTO
26853	19/08/2022	PET	18,10	APROVECHAMIENTO
27066	26/08/2022	CARTON	51,50	APROVECHAMIENTO
27066	26/08/2022	CHATARRA	12,50	APROVECHAMIENTO
27066	26/08/2022	PAPEL	26,00	APROVECHAMIENTO
27066	26/08/2022	PET	29,32	APROVECHAMIENTO



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/08/2022 Hasta 31/08/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>1.225,27</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 1 días del mes de septiembre de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

---

Anexo G. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en septiembre/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(631,20 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **septiembre** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/09/2022 Hasta 30/09/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
26609	02/09/2022	CARTON	70,00	APROVECHAMIENTO
26609	02/09/2022	PLASTICO	6,45	APROVECHAMIENTO
26609	02/09/2022	CHATARRA	63,00	APROVECHAMIENTO
26609	02/09/2022	PLEGADIZA	12,35	APROVECHAMIENTO
26609	02/09/2022	PET	16,00	APROVECHAMIENTO
26609	02/09/2022	VIDRIO R	13,00	APROVECHAMIENTO
27084	09/09/2022	CARTON	31,00	APROVECHAMIENTO
27084	09/09/2022	PLASTICO	3,00	APROVECHAMIENTO
27084	09/09/2022	CHATARRA	13,00	APROVECHAMIENTO
27089	16/09/2022	CARTON	103,40	APROVECHAMIENTO
27089	16/09/2022	PLASTICO	1,00	APROVECHAMIENTO
27089	16/09/2022	PAPEL	10,00	APROVECHAMIENTO
27097	30/09/2022	CARTON	161,90	APROVECHAMIENTO
27097	30/09/2022	VIDRIO R	14,70	APROVECHAMIENTO
27097	30/09/2022	PAPEL	109,20	APROVECHAMIENTO
27097	30/09/2022	PET	3,20	APROVECHAMIENTO



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
 PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/09/2022 Hasta 30/09/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>631,20</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 3 días del mes de octubre de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Anexo H. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en octubre/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(878,90 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **octubre** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/10/2022 Hasta 31/10/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
27506	07/10/2022	CARTON	94,70	APROVECHAMIENTO
27506	07/10/2022	CHATARRA	2,40	APROVECHAMIENTO
27506	07/10/2022	PAPEL	139,80	APROVECHAMIENTO
27506	07/10/2022	PLEGADIZA	20,00	APROVECHAMIENTO
27506	07/10/2022	PET	16,40	APROVECHAMIENTO
27516	14/10/2022	CARTON	149,50	APROVECHAMIENTO
27516	14/10/2022	CHATARRA	8,00	APROVECHAMIENTO
27516	14/10/2022	PAPEL	126,50	APROVECHAMIENTO
27516	14/10/2022	PET	31,80	APROVECHAMIENTO
27523	21/10/2022	CARTON	52,40	APROVECHAMIENTO
27523	21/10/2022	PAPEL	63,30	APROVECHAMIENTO
27523	21/10/2022	PET	10,00	APROVECHAMIENTO
27532	28/10/2022	CARTON	33,70	APROVECHAMIENTO
27532	28/10/2022	PLASTICO	56,40	APROVECHAMIENTO
27532	28/10/2022	CHATARRA	3,00	APROVECHAMIENTO
27532	28/10/2022	PAPEL	59,00	APROVECHAMIENTO



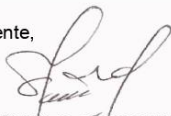
Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
 PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/10/2022 Hasta 31/10/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
27532	28/10/2022	PET	7,00	APROVECHAMIENTO
27532	28/10/2022	PILAS	5,00	APROVECHAMIENTO

**TOTAL 878,90**

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 2 días del mes de noviembre de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepso@edepso.com](mailto:edepso@edepso.com)

Anexo I. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en noviembre/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(431,40 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **noviembre** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/11/2022 Hasta 30/11/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
27544	04/11/2022	CARTON	69,50	APROVECHAMIENTO
27544	04/11/2022	PAPEL	7,00	APROVECHAMIENTO
27544	04/11/2022	PET	6,00	APROVECHAMIENTO
27753	11/11/2022	CARTON	52,10	APROVECHAMIENTO
27753	11/11/2022	PAPEL	7,50	APROVECHAMIENTO
27753	11/11/2022	PET	9,00	APROVECHAMIENTO
27760	18/11/2022	CARTON	53,40	APROVECHAMIENTO
27760	18/11/2022	VIDRIO R	5,00	APROVECHAMIENTO
27760	18/11/2022	PAPEL	16,50	APROVECHAMIENTO
27760	18/11/2022	PET	8,40	APROVECHAMIENTO
27760	18/11/2022	PILAS	29,10	APROVECHAMIENTO
27769	25/11/2022	CARTON	46,00	APROVECHAMIENTO
27769	25/11/2022	PET	10,00	APROVECHAMIENTO
27769	25/11/2022	ACEITE USADO R	111,90	APROVECHAMIENTO

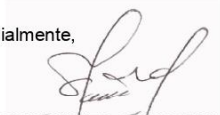


Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/11/2022 Hasta 30/11/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>431,40</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 2 días del mes de diciembre de 2022.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Anexo J. Certificado de tratamiento y disposición final de residuos aprovechables en diciembre/2022 - EDEPSA ESP



**CERTIFICADO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS APROVECHABLES**

Por medio de la presente acta, **EDEPSA ESP**, sociedad legalmente constituida, debidamente licenciada por la autoridad competente **CDMB** para el desarrollo de sus actividades certifica que recibió la cantidad de **(632,80 Kg)**, de residuos Aprovechables de **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** identificado con NIT 890201213-4 para realizar su tratamiento y disposición final, de los residuos generados en el mes de **diciembre** de 2022. Por la entidad **UIS CENTRAL**

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/12/2022 Hasta 31/12/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
27692	06/12/2022	ACEITE USADO R	143,00	APROVECHAMIENTO
27692	06/12/2022	CARTON	105,00	APROVECHAMIENTO
27692	06/12/2022	PAPEL	67,00	APROVECHAMIENTO
27792	09/12/2022	CARTON	36,00	APROVECHAMIENTO
27792	09/12/2022	PAPEL	2,00	APROVECHAMIENTO
26727	15/12/2022	CARTON	119,00	APROVECHAMIENTO
26727	15/12/2022	VIDRIO R	21,00	APROVECHAMIENTO
26727	15/12/2022	CHATARRA	14,00	APROVECHAMIENTO
26727	15/12/2022	PAPEL	32,40	APROVECHAMIENTO
26727	15/12/2022	PET	20,50	APROVECHAMIENTO
26727	15/12/2022	ACEITE USADO R	72,90	APROVECHAMIENTO



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
 PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

Periodo (Recolección, Transporte y Disposición Final)		Desde 01/12/2022 Hasta 31/12/2022		
Remision	FECHA	Nombre de Reactivo o Análisis	Cantidad (Kg)	Proceso tratamiento y disposición final
<b>TOTAL</b>			<b>632,80</b>	

En constancia se expide la certificación de tratamiento y disposición final a los 4 días del mes de enero de 2023.

Cordialmente,



**GLORIA YANETH SANDOVAL**  
GERENTE GENERAL



Carrera 21 # 90 - 07 Diamante 2, Bucaramanga  
PBX: 7000240 - 643 25 98  
[edepsa@edepsa.com](mailto:edepsa@edepsa.com)

---

Anexo K. Condiciones de operación de los reactores de pirólisis revisados en la literatura para la obtención de productos comunes

Condiciones de operación de los experimentos revisados para obtener productos de pirólisis									
Polímero	Tipo de reactor	Temperaturas de reacción	Temperatura de condensación	Rata de incremento de temperatura	Sensor de termometría	Flujo másico a la entrada	Gas de inerte de barrido	Tiempo de reacción	Dimensiones / Peso de la muestra pirolizada
<b>PET</b>	Lecho fijo, cilíndrico de acero inoxidable. Diámetro interno: 70mm. Calentado externamente por resistencia eléctrica	500 °C	0°C	10 °C/min	Termocupla en el interior del reactor	-	Nitrógeno o a 100cm <sup>3</sup> /min	50 min	10 mg
<b>HDPE</b>	Cilíndrico de acero inoxidable sus-316. Altura: 300m. Diámetro interno: 80mm. Calentado por resistencia eléctrica indirectamente	660 °C, 680 °C, 704 °C, 728 °C	-30 °C	10 °C/min	Termocupla en el interior del reactor	7 g/min	Nitrógeno	-	Partículas de 3 mm diámetro. 0,5 kg de material
<b>PP</b>	Cilíndrico de acero inoxidable sus-316. Altura: 300m. Diámetro interno: 80mm. Calentado por resistencia eléctrica indirectamente	668 °C, 703 °C, 727 °C, 746 °C	-30 °C	10 °C/min	Termocupla en el interior del reactor	7 g/min	Nitrógeno	-	Partículas de 3 mm diámetro. 0,5 kg de material