

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Caracterización y Evaluación del proceso productivo de composites a partir de polietileno y fibra vegetal de banano

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Katherine del Rocio Soto Baquero

Betsaida Belinda Torres Villalva

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2022

## DEDICATORIA

Dedicado a la mujer que día a día ha luchado por darme lo mejor, mi mamá Belinda. A mi abuelita Norma, base en mi crianza y valores. Las amo, esto es por y para ustedes. A mi papá Jhonny y toda mi familia por apoyarme siempre. A mi tío Geovanny allá en el cielo. A los Quimilovers por brindarme las mejores sonrisas.

Esto va dedicado para mí y todo aquel que de forma sincera confió en que cumpliría mis metas. ¡Un Ranger nunca se rinde!

### **Betsaida Torres Villalva**

Dedicado a mi mamá Teresa, que desde el día cero estuvo conmigo siendo mi apoyo y contención a lo largo del viaje. A mí tío Alex, por enseñarme todo lo que sé y no dudar nunca de lo que podía llegar a ser. Gracias por la confianza. A Milka, Ricardo y Ariel, por ser mi soporte e impulsarme cuando ya no me quedaban fuerzas ni ganas.

Finalmente, esto también va dedicado a mí, por iniciar y culminar esta etapa sin importarme las trabas del destino. ¡Tras las nubes, el cielo siempre es azul! – Cris Morena

### **Katherine Soto Baquero**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecida primero con Dios, por permitirme llegar hasta aquí. Gracias a nuestra tutora Diana Tinoco y cotutor Christian Macias, por todo el conocimiento y el seguimiento dado a nuestro proyecto.

A Katherine por su paciencia y empeño, te admiro. A Emi y el team Gran Prix, por el apoyo brindado. Gracias a todos quiénes de una u otra forma contribuyeron a hacer esto posible.

**Betsaida Torres Villalva**

En primer lugar, gracias a Dios por concederme la vida y permitirme transitarla hasta este momento. Gracias a nuestra tutora Ing. Diana Tinoco y cotutor Ing. Christian Macias por su paciencia, constancia y guía que nos permitió sacar adelante este proyecto.

A todos mis compañeros que me brindaron su guía y conocimiento. Y en general, a todo aquel que aportó de forma directa o indirecta en el desarrollo y culminación de este proyecto.

**Katherine Soto Baquero**

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Katherine del Rocio Soto Baquero y Betsaida Belinda Torres Villalva damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Betsaida B. Torres  
Villalva



---

Katherine R. Soto  
Baquero

# EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:  
DIANA LUCIA TINOCO  
CAICEDO

---

**MSc. Nadia Flores**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**PhD. Diana Tinoco Caicedo**

PROFESOR TUTOR



Firmado electrónicamente por:  
CHRISTIAN MARCELO  
MACIAS AGUIAR

---

**Mgtr. Christian Macias Aguiar**

PROFESOR COTUTOR

## RESUMEN

En el presente documento se realizó la caracterización y evaluación del proceso productivo de composites a partir de polietileno y fibra vegetal de banano mediante un análisis exergético, económico y de ciclo de vida con el propósito de validar su uso y rentabilidad en comparación del proceso convencional de obtención de plásticos.

Se realizaron los balances de materia y energía pertinentes para los cálculos de exergías por corriente, eficiencia exergética y exergía destruida. Además, se realizó un análisis económico mediante el uso del software Capcost para obtener la tasa de retorno (TIR) así como valor neto actual (VAN), además se utilizó el software OpenLCA para el análisis del ciclo de vida de ambos procesos considerando una producción de 120 kg/día de fibra seca.

Se concluye que el proceso propuesto cuenta con una eficiencia exergética del 92%, un TIR del 28.09%, así como un impacto ambiental evaluado por etapas de calentamiento global (0,6824 kg CO<sub>2</sub> eq), demanda de energía (32,5111 MJ), consumo de agua (0,0389 m<sup>3</sup>) y potencial de eutrofización (0,00025962 kg N eq). Mientras que el proceso convencional tiene una menor eficiencia exergética (74%), una menor tasa de retorno (10,29%), y un impacto ambiental de evaluado por etapas de calentamiento global (1,4720 kg CO<sub>2</sub> eq), demanda de energía (72,8000 MJ), consumo de agua (0,0078 m<sup>3</sup>) y potencial de eutrofización (0,00025 kg N eq). Por lo tanto, el uso de fibra vegetal de raquis de banano en la producción de compounds es un proceso que permite aprovechar de mejor forma la exergía, es rentable y de menor impacto ambiental.

**Palabras Clave:** polietileno, análisis exergético, ciclo de vida, fibra, tasa de retorno

## **ABSTRACT**

*In this document, the characterization and evaluation of the productive process of composites from polyethylene and banana vegetal fiber was carried out through an exergetic, economic and life cycle analysis in order to validate its use and profitability compared to the conventional process to obtain plastics. The relevant material and energy balances were made for the calculation of exergies per current, exergetic efficiency and exergy destroyed. In addition, an economic analysis was made using the Capcost to obtain the return rate (IRR) as well as net present value (NPV). Also, the OpenLCA software was applied for the analysis of the life cycle of both processes considering a production of 120 kg/day of dry fiber.*

*It is concluded that the proposed process has an exergetic efficiency of 92%, an IRR of 28.09%, as well as an environmental impact evaluated by stages of global warming (0.6824 kg CO<sub>2</sub> eq), energy demand (32.5111 MJ), water consumption (0.0389 m<sup>3</sup>) and eutrophication potential (0.00025962 kg N eq). While the conventional process has a lower exergetic efficiency (74%), a lower rate of return (10.29%) and an environmental impact of global warming evaluated by stages (1.4720 kg CO<sub>2</sub> eq), energy demand (72.8000 MJ), water consumption (0.0078 m<sup>3</sup>) and eutrophication potential (0.00025 kg N eq). Therefore, the use of vegetal fiber from banana rachis in the production of compounds is a process that allows a better use of exergy, is profitable and has less environmental impact.*

**Keywords:** *polyethylene, exergetic analysis, life cycle, fiber, return rate*

# ÍNDICE GENERAL

|                                                        |      |
|--------------------------------------------------------|------|
| EVALUADORES.....                                       | 5    |
| RESUMEN .....                                          | I    |
| <i>ABSTRACT</i> .....                                  | II   |
| ÍNDICE GENERAL .....                                   | III  |
| ABREVIATURAS.....                                      | VI   |
| SIMBOLOGÍA.....                                        | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                  | X    |
| CAPÍTULO 1 .....                                       | 11   |
| 1.    Introducción .....                               | 11   |
| 1.1 <i>Descripción del problema</i> .....              | 11   |
| 1.2 <i>Justificación del problema</i> .....            | 13   |
| 1.3 <i>Objetivos</i> .....                             | 14   |
| 1.3.1    Objetivo General .....                        | 14   |
| 1.3.2    Objetivos Específicos.....                    | 15   |
| 1.4 <i>Marco teórico</i> .....                         | 15   |
| 1.4.1    Composite.....                                | 15   |
| 1.4.2    Análisis exergético .....                     | 23   |
| 1.4.3    Análisis de ciclo de vida .....               | 23   |
| CAPÍTULO 2 .....                                       | 25   |
| 2.    Metodología .....                                | 25   |
| 2.1 <i>Descripción del Sistema</i> .....               | 25   |
| 2.1.1    Proceso propuesto .....                       | 25   |
| 2.2 <i>Caracterización del proceso propuesto</i> ..... | 26   |

|                  |                                                    |    |
|------------------|----------------------------------------------------|----|
| 2.2.1            | Obtención de la fibra .....                        | 26 |
| 2.2.2            | Obtención del compound .....                       | 30 |
| 2.3              | <i>Análisis exergético</i> .....                   | 31 |
| 2.4              | <i>Análisis de ciclo de vida</i> .....             | 33 |
| 2.5              | <i>Análisis económico</i> .....                    | 34 |
| CAPÍTULO 3 ..... |                                                    | 35 |
| 3.               | RESULTADOS .....                                   | 35 |
| 3.1              | <i>Caracterización del proceso propuesto</i> ..... | 35 |
| 3.2              | <i>Análisis Exergético</i> .....                   | 36 |
| 3.2.1            | Análisis exergético Proceso Propuesto .....        | 36 |
| 3.2.2            | Análisis exergético Proceso Convencional .....     | 42 |
| 3.3              | <i>Análisis económico</i> .....                    | 45 |
| 3.4              | <i>Análisis de Ciclo de Vida</i> .....             | 50 |
| 3.4.1            | ACV del proceso propuesto .....                    | 50 |
| 3.4.2            | ACV del proceso convencional.....                  | 58 |
| 3.5              | <i>Comparativa entre procesos</i> .....            | 62 |
| 3.5.1            | Eficiencia Exergética .....                        | 62 |
| 3.5.2            | Exergía Destruida .....                            | 64 |
| 3.5.3            | Calentamiento Global.....                          | 65 |
| 3.5.4            | Demanda de energía acumulada .....                 | 66 |
| 3.5.5            | Agua Usada .....                                   | 68 |
| 3.5.6            | Potencial de eutrofización .....                   | 69 |
| 3.5.7            | Indicadores económicos.....                        | 70 |
| CAPÍTULO 4 ..... |                                                    | 71 |
| 4.               | Conclusiones y recomendaciones .....               | 71 |

|     |                       |    |
|-----|-----------------------|----|
| 4.1 | Conclusiones .....    | 71 |
| 4.2 | Recomendaciones ..... | 73 |
|     | BIBLIOGRAFÍA .....    | 74 |
|     | ANEXOS .....          | 77 |

## **ABREVIATURAS**

|       |                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral               |
| TULAS | Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria |
| ACV   | Análisis Ciclo de Vida                                 |
| ODS   | Objetivos de Desarrollo Sostenible                     |
| ONU   | Organización de Naciones Unidas                        |
| LLDPE | Linear Low-Density Polyethylene                        |
| TIR   | Tasa Interna de Retorno                                |
| VAN   | Valor Actual Neto                                      |
| PEC   | Purchased-equipment cost                               |
| PE    | Polietileno                                            |
| TCI   | Total Capital Investment                               |
| COV   | Compuestos Orgánicos Volátiles                         |

## SIMBOLOGÍA

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de Carbono |
| S                | Azufre             |
| N                | Nitrógeno          |
| O                | Oxígeno            |
| C                | Carbono            |
| H                | Hidrógeno          |
| H <sub>2</sub> O | Agua               |
| CH <sub>4</sub>  | Metano             |
| O <sub>3</sub>   | Ozono              |
| °C               | Grados centígrados |
| mm               | Milímetros         |
| kg               | Kilogramos         |
| L                | litros             |
| min              | Minutos            |
| kW               | Kilowatts          |
| MJ               | Megajulios         |
| m <sup>3</sup>   | Metros cúbicos     |
| kJ               | Kilojulios         |
| h                | Hora               |
| eq               | equivalente        |
| K                | Kelvin             |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|             |                                                                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1  | <i>Esquema de formas geométricas y espaciales que afectan las características de los composites. ....</i> | 16 |
| Figura 1.2  | <i>Estructura molecular del polietileno lineal de baja densidad.....</i>                                  | 18 |
| Figura 1.3  | <i>Diagrama del flujo del proceso convencional para la producción del LLDPE .....</i>                     | 20 |
| Figura 2.1  | <i>Diagrama de flujo del proceso propuesto.....</i>                                                       | 25 |
| Figura 2.2  | <i>Fibra extraída del raquis lista para el remojo.....</i>                                                | 27 |
| Figura 2.3  | <i>Fibra obtenida después del proceso de remojo.....</i>                                                  | 28 |
| Figura 2.4  | <i>Fibra colocada en el secador.....</i>                                                                  | 29 |
| Figura 2.5  | <i>Fibra seca.....</i>                                                                                    | 29 |
| Figura 2.6  | <i>Fibra molida y en proceso de tamizado.....</i>                                                         | 30 |
| Figura 3.1  | <i>Eficiencia exergética por etapas del proceso propuesto.....</i>                                        | 39 |
| Figura 3.2  | <i>Exergía destruida por etapas del proceso propuesto .....</i>                                           | 41 |
| Figura 3.3  | <i>Eficiencia exergética por etapas del proceso convencional.....</i>                                     | 44 |
| Figura 3.4  | <i>Exergía destruida por etapas del proceso convencional .....</i>                                        | 44 |
| Figura 3.5  | <i>Diagrama de flujo de caja del sistema propuesto .....</i>                                              | 48 |
| Figura 3.6  | <i>Diagrama de flujo de caja del sistema convencional .....</i>                                           | 49 |
| Figura 3.7  | <i>Calentamiento global por etapas del proceso propuesto.....</i>                                         | 50 |
| Figura 3.8  | <i>Demanda de energía acumulada por etapas del proceso propuesto.....</i>                                 | 52 |
| Figura 3.9  | <i>Agua consumida por etapas del proceso propuesto.....</i>                                               | 53 |
| Figura 3.10 | <i>Potencial de eutrofización por etapas del proceso propuesto.....</i>                                   | 56 |
| Figura 3.11 | <i>Calentamiento global por etapas del proceso convencional.....</i>                                      | 58 |
| Figura 3.12 | <i>Demanda de energía acumulada por etapas del proceso convencional</i>                                   | 59 |
| Figura 3.13 | <i>Agua consumida por etapas del proceso convencional.....</i>                                            | 61 |
| Figura 3.14 | <i>Potencial de eutrofización por etapas del proceso convencional.....</i>                                | 62 |
| Figura 3.15 | <i>Eficiencia exergética por proceso .....</i>                                                            | 63 |
| Figura 3.16 | <i>Exergía destruida por proceso .....</i>                                                                | 64 |
| Figura 3.17 | <i>Calentamiento global por proceso.....</i>                                                              | 66 |
| Figura 3.18 | <i>Demanda de la energía acumulada por proceso.....</i>                                                   | 67 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.19 <i>Agua consumida por proceso</i> .....             | 68 |
| Figura 3.20 <i>Potencial de eutrofización por proceso</i> ..... | 69 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1 Aditivos más utilizados en la industria del plástico reforzado con fibra vegetal.....    | 17 |
| Tabla 1.2 <i>Propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas relevantes del LDPE.</i><br>..... | 19 |
| Tabla 1.3 <i>Caracterización química del raquis de banano</i> .....                                | 22 |
| Tabla 1.4 <i>Caracterización mecánica del raquis de banano</i> .....                               | 23 |
| Tabla 3.1 <i>Caracterización del proceso propuesto</i> .....                                       | 35 |
| Tabla 3.2 <i>Análisis exergético del proceso propuesto</i> .....                                   | 36 |
| Tabla 3.3 <i>Eficiencia exergética y exergía destruida del proceso propuesto</i> .....             | 38 |
| Tabla 3.4 <i>Análisis exergético del proceso convencional</i> .....                                | 42 |
| Tabla 3.5 <i>Eficiencia exergética y exergía destruida del proceso convencional</i> .....          | 43 |
| Tabla 3.6 <i>PEC total para el proceso propuesto</i> .....                                         | 46 |
| Tabla 3.7 <i>Valores Z</i> .....                                                                   | 47 |
| Tabla 3.8 <i>Indicadores económicos del proceso propuesto</i> .....                                | 47 |
| Tabla 3.9 <i>Indicadores económicos del proceso convencional</i> .....                             | 48 |
| Tabla 3.10 <i>Indicadores económicos por procesos</i> .....                                        | 70 |

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 *Descripción del problema*

La industria del plástico ha usado desde hace muchos años resinas vírgenes de origen fósil para la creación de plásticos de baja y alta densidad. Estas resinas siempre han tenido una alta competitividad entre sí en el mercado debido a sus componentes, su forma de obtención, las propiedades adquiridas por el uso de aditivos y su precio (Lerma Montejano, 2021). Por ello, cada resina presentaba un beneficio y limitante diferente; donde las empresas debían seleccionar la que mejor se ajustaba a su concepto de economía circular y sostenibilidad frente a los plásticos de un solo uso.

Con el inicio de la pandemia a finales del 2019, la demanda de resinas sufrió un incremento exponencial porque la cantidad de plásticos que se requerían para la producción industrial de diversos productos aumentó significativamente. Por lo tanto, las empresas empezaron a desarrollar opciones que otorgaran un alto rendimiento para la producción de materia prima sostenible. Por otro lado, el confinamiento progresivo y cierre de las fronteras, así como las diversas restricciones de seguridad sanitaria, interrumpieron la cadena de producción de suministros y distribución del producto resultante del craqueo de hidrocarburos; incrementando los costos de exportación de la resina virgen (Victory & Tudball, 2020).

En este proyecto se trabajará en colaboración con una empresa dedicada a la producción de artículos plásticos. Dicha empresa, en búsqueda de nuevas alternativas, ha optado por la investigación enfocada en la combinación de polímeros con fibras vegetales para la obtención de un producto más rentable y de bajo impacto ambiental. Hasta el momento, se ha encontrado por medio de experimentaciones la formulación óptima

desde el punto de vista de propiedades mecánicas del producto usando la fibra vegetal del raquis de banano; sin embargo, no se ha escalado el proceso. Dado que el proceso experimental requiere de etapas como el secado que consume altas cantidades de energía, y el lavado que consume altas cantidades de agua, se considera crítico el evaluar el impacto ambiental, el costo hasta el producto final, y la huella de exergía destruida de este proceso. Por otro lado, es necesario que el diseño propuesto garantice el cumplimiento de las normativas vigentes y los objetivos sostenibles. Por lo tanto, este proyecto se centrará en proponer un diseño para la producción compounds a partir de fibra vegetal obtenida del raquis de banano que sea eficiente desde el punto de vista exergético, y a su vez asegure un bajo costo e impacto ambiental.

La producción de plásticos deriva en un sinnúmero de cargas ambientales que inician desde la adquisición de materia prima hasta la elaboración del producto final (Sarria-Villa & Gallo-Corredor, 2016). Es necesario que la producción de plásticos y sustitución de materia prima presente una metodología que se acredite bajo la normativa ISO 14000 y cumpla con las normativas establecidas dentro del Acuerdo Ministerial número 19, la Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de Un solo Uso, y Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULAS). Además, siendo un método de sustitución y optimización del proceso se debe considerar las restricciones económicas que acentúan el costo de producción e implementación de la resina reforzada, esta debe ser significativamente menor a los costos de compra de la resina virgen y su posterior utilización.

Partiendo de un estudio anterior, la resina reforzada con fibra de banano debe tener una composición de 93% de polietileno de baja densidad lineal, 2% de fibra de raquis de banano y 5% de anhídrido maleico. La composición presentada puede ser sometida a cambios para evaluar sus propiedades siempre y cuando se mantengan dentro de los

siguiente límites: fibra de banano entre un 2%-5% (Corral Santos & Barcia Mero, 2022).

## **1.2 Justificación del problema**

Las nuevas alternativas de materia prima buscan minimizar el uso de resinas vírgenes y presentan diversas características que pueden o no favorecer la producción de plásticos a través de los procesos de extrusión, inyección y soplado. Para aquellas empresas que centren su actividad en la fabricación de plásticos de uso agrícola, es importante considerar la facilidad de fabricación, manejo y reciclaje de dichos productos, así como un mínimo impacto a nivel económico y ambiental dentro de la industria (Lerma Montejano, 2021).

Un estudio de viabilidad acerca de esta nueva propuesta de resina que combina el polímero de baja densidad con fibra vegetal, dará una perspectiva amplia en cuanto a los beneficios o carencias que puede presentar este producto. Este propondrá un diseño de un proceso productivo que minimice los costos de producción, incremente la eficiencia exergética, y minimice los efectos negativos al ambiente.

Ecuador, es un país exportador global de banano siendo aún primicia la implementación de esta fibra vegetal de raquis de banano, que es uno de los principales residuos durante la cosecha de banano. Esta fibra tiene potencial como componente de refuerzo en materiales plásticos (Carvajal Romero et al., 2020).

El presente proyecto busca desarrollar un estudio de viabilidad que abarque los tres ejes principales: energía, economía y ambiente; en los que gira la empresa para la obtención de los parámetros necesarios que garanticen la calidad del producto final y la ejecución de los objetivos sostenibles. Un análisis exergético proporcionará la información acerca de la energía disponible y la energía realmente utilizada en la fabricación de los plásticos; además, tomando en cuenta opciones metabólicas

industriales otorgará una evaluación de la eficiencia exergética y el grado de interconexión de los sistemas ecológicos industriales. Citando un ejemplo, tenemos el análisis exergético realizado a la producción de plásticos para el sector automotriz, donde se demostró que la mayor inversión de exergía se realiza en los primeros pasos donde los recursos primarios se usan para obtener la resina virgen y la mayor pérdida se la localiza en la adición de adictivos.

Además, un análisis del ciclo de vida (ACV) brindará la información de manera real y objetiva referente a los impactos ambientales vinculados en el proceso y producto final, con el propósito de estimar y evaluar los impactos sobre el ambiente y las posibles estrategias de mejora. Un ACV de la producción tradicional de plásticos presentó que el vertido de residuos presenta un mayor impacto al medio, mientras que la gasificación y la pirólisis han demostrado tener menos efectos medioambientales en el tratamiento de plásticos (Alsabri et al., 2022). Es así como se busca el cumplimiento de uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que plantea la ONU: 12) Garantizar las pautas de consumo y producción responsable; y la inserción del concepto de economía circular dentro de la empresa.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

Evaluar un proceso productivo desde el punto de vista exergético, económica y ambiental para la elaboración de composites, a partir de polietileno de baja densidad y fibra vegetal de raquis de banano mediante el uso de datos experimentales.

### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Caracterizar el proceso productivo para la elaboración de compounds de fibra de raquis de banano y polietileno de baja densidad mediante el uso de los datos experimentales.
- Realizar un análisis exergético, económico y de ciclo de vida al proceso propuesto y al proceso convencional para la comparación de los indicadores obtenidos.
- Seleccionar el proceso que permita un equilibrio entre el costo del producto, el impacto ambiental, y la huella de exergía destruida.

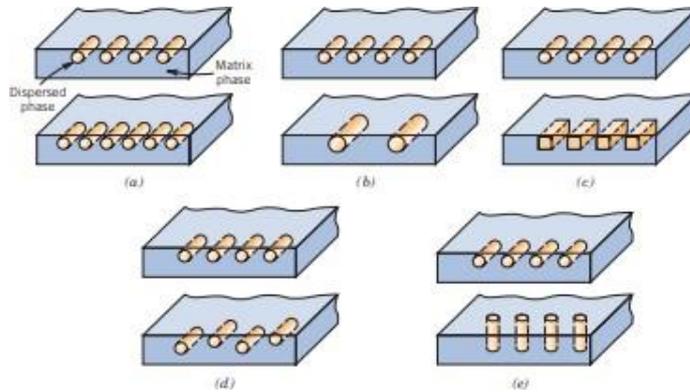
## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Composite.**

Un composite es una mezcla compuesta por un polímero y grupo de fibras naturales de alta resistencia que permiten la obtención de nuevos materiales compuestos con mejores propiedades que las que inicialmente tiene el polímero. Estos materiales de matriz polimérica se destacan en el desarrollo de piezas mecánicas, materiales y distintas estructuras. Las propiedades que posee el material junto a sus características y rendimiento se relacionan de forma directa con el porcentaje en peso del contenido de fibra y polímero (Mary Jasmin et al., 2022).

## Figura 1.1

*Esquema de formas geométricas y espaciales que afectan las características de los composites.*



Nota: La imagen muestra las diferentes distribuciones geométricas

Fuente: Egbo (2021)

El uso de los composites dentro de la industria de plásticos se relaciona a la modificación que la fibra realiza en la superficie del material logrando una mayor resistencia a la tracción y flexión del compuesto. Esto debido a las características favorables que presentan como: menor densidad, costos reducidos, nula toxicidad, resistencia e incluso propiedades de amortiguación en varios casos (Mudoj et al., 2021). Existen dos clases principales de materiales, compuestos de gran difusión que son generalmente los formados por fibras en composición normal y resinas de poliéster. Y por otro lado están los compuestos de alto rendimiento, que se realizan con fibras largas y resinas epoxi reforzadas (Hsissou et al., 2021).

### **1.4.1.1 Aditivos.**

Los aditivos son compuestos químicos que otorgan o mejoran ciertas propiedades de una mezcla polimérica con el fin de obtener un material apto y susceptible a ser comercializado en las distintas áreas de interés. Existen diversos tipos de aditivos de acuerdo con las propiedades

que se deseen modificar. A continuación, en la tabla 1.1 se presentan los aditivos más utilizados en la industria plástica de acuerdo con las características más relevantes:

**Tabla 1.1**

Aditivos más utilizados en la industria del plástico reforzado con fibra vegetal.

| Antioxidantes                                              |                                                                         |                       |                                                                                            |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Función                                                    | Aditivos                                                                | Tipos                 | Características                                                                            |
| <b>Bloquean el proceso de oxidación</b>                    | Hidroxilamina<br>Derivados de Benzofurano<br>Fenol Acriloílo Modificado | Captore de radicales  | Reaccionan rápidamente con el oxígeno del ambiente estabilizando a la muestra.             |
|                                                            | Aminas aromáticas.<br>Fenoles.                                          | Donantes de hidrógeno | Forman hidroperóxidos estabilizados como producto de la reacción con radicales peróxidos.  |
| Aditivos UV                                                |                                                                         |                       |                                                                                            |
| Función                                                    | Aditivos                                                                | Tipos                 | Características                                                                            |
| <b>Bloquean el proceso de foto-degradación</b>             | 2-hidroxibenzofenona<br>2-hidroxifenil-benzo-triazol                    | Absorción UV          | Absorben los rayos UV para luego disiparlos en forma de energía calorífica.                |
|                                                            | Compuestos de níquel                                                    | Quenching             | Disminuyen el estado de excitación recibiendo la energía proveniente de los cromóforos.    |
| Lubricantes                                                |                                                                         |                       |                                                                                            |
| Función                                                    | Aditivos                                                                | Tipos                 | Características                                                                            |
| <b>Reducen las fuerzas de fricción y desgaste por roce</b> | Ácido esteárico<br>Estearato cálcico y de plomo<br>Ceras de parafina    | Externos              | Minimizar y controlar la adhesión producida entre el polímero y el equipo de modificación. |

| <b>entre dos cuerpos.</b>                  | Ésteres de cera de Montana<br>Alcoholes de cadena larga<br>Gliceril ésteres | Internos         | Reducen la fricción intermolecular dentro del polímero mejorando el flujo de este. |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Antiestáticos                              |                                                                             |                  |                                                                                    |
| Función                                    | Aditivos                                                                    | Tipos            | Características                                                                    |
| Bloquear la adquisición de carga eléctrica | Monoestearato de Glicerol                                                   | Migración Rápida | Atrapan las moléculas de agua para generar una superficie de descarga              |
|                                            | Derivados de Aminas Etoxiladas                                              | Migración Lenta  |                                                                                    |

Nota: La tabla muestra la clasificación de aditivos de uso común en la industria del plástico.

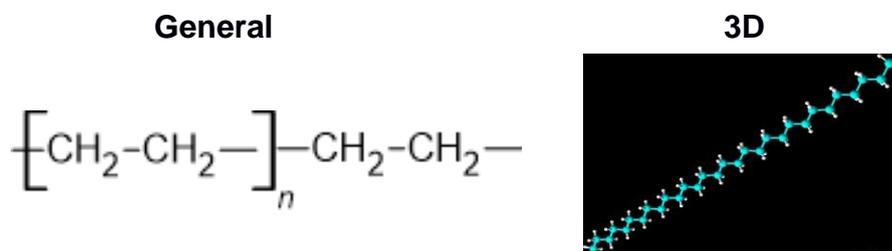
Fuente: Bonilla Palacios (2016); Kindsvater et al. (2019)

#### 1.4.1.2 Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE).

El polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) es un polímero de cadena lineal con extensas ramificaciones que se obtiene mediante un proceso a temperaturas de 500 °C y presiones entre 1500-2000 bar. En la figura 1.2 se puede observar las estructuras generales y en 3D de la molécula.

**Figura 1.2**

*Estructura molecular del polietileno lineal de baja densidad.*



Nota: Las figuras muestran la estructura molecular lineal y 3D del LDPE.

Fuente: ACD/ChemSketch (2022)

Este polímero presenta características mecánicas, térmicas y químicas notoriamente diferentes al polietileno lineal ordinario. Las propiedades más relevantes son detalladas en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2**

*Propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas relevantes del LDPE.*

| Propiedades físicas                            |                                                       |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Densidad</b>                                | 0.917 - 0.932 g/cm <sup>3</sup>                       |
| <b>Cristalinidad</b>                           | 40 - 50 %                                             |
| <b>Resistividad específica</b>                 | 1e13 - 1e17 ohm·m                                     |
| <b>Índex de refracción</b>                     | 1.57                                                  |
| Propiedades mecánicas                          |                                                       |
| <b>Módulo elástico</b>                         | 0.172 - 0.283 GPa                                     |
| <b>Resistencia mecánica a la compresión</b>    | 10.8 - 17.4 MPa                                       |
| <b>Resistencia mecánica a la tracción</b>      | 13.3 - 26.4 MPa                                       |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>                 | 0.439 - 0.457                                         |
| <b>Dureza</b>                                  | 2.7 - 4.4 HV                                          |
| Propiedades térmicas                           |                                                       |
| <b>Temperatura de transición vítrea</b>        | (-125) - (-90) °C                                     |
| <b>Temperatura de fusión</b>                   | 98 - 115 °C                                           |
| <b>Coefficiente de expansión lineal</b>        | 100e-6 - 200e-6 1/ °C                                 |
| <b>Conductividad térmica</b>                   | 0.322 - 0.348 W/m·K                                   |
| Propiedades químicas                           |                                                       |
| <b>Resistencia a los ácidos</b>                | Muy alta contra ac. débiles y alta contra ac. fuertes |
| <b>Resistencia a los álcalis</b>               | Elevada contra álcalis fuertes y débiles              |
| <b>Resistencia a los disolventes orgánicos</b> | Media                                                 |
| <b>Resistencia a la oxidación</b>              | Pobre a 500°C                                         |

Nota: Datos tomados de la Universidad de Barcelona (2011)

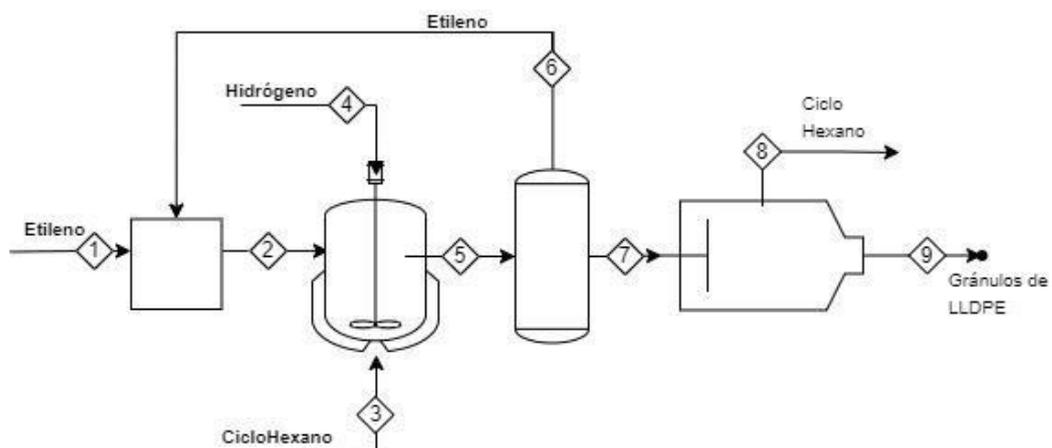
Se utiliza generalmente en la fabricación de fundas, envoltorios y capas o películas plásticas para el sector agrícola. Así como para manufacturar el revestimiento de alambres y cables, elaboración de piezas electro aislantes, carcasas de bombas y ventiladores, filtros y bidones en el sector industrial.

#### **1.4.1.3 Proceso de producción del polietileno lineal de baja densidad.**

El proceso convencional de fabricación de plástico se lo puede subdividir en cuatro secciones: Obtención de la materia prima, síntesis del polímero base, obtención del polímero base como producto moldeable y modelado del plástico para uso definitivo. La figura 1.3 representa el diagrama de flujo de dicho proceso.

**Figura 1.3**

*Diagrama del flujo del proceso convencional para la producción del LLDPE*



Nota: Diagrama realizado usando el software Draw.io

El proceso comienza con la recolección de materia prima en donde el etileno procedente de la refinería se comprime y pasa por un filtro que procura eliminar componentes indeseables como el CO<sub>2</sub> y S. Una vez

purificado el etileno es inyectado en un sistema de refrigeración por absorción donde se disolverá en una mezcla de ciclohexano y comonómeros (butano/eteno). El producto de esta absorción será la mezcla de alimentación del reactor (Bhagwat Bhardwaj, 2013).

Posteriormente se baja la temperatura a la corriente y se ingresa al reactor donde también se inyectan diferentes catalizadores, hidrógeno gaseoso y aditivos de activación para que dé comienzo la reacción de polimerización. Al finalizar el proceso, la corriente líquida que es evacuada contiene un 20% de polietileno disuelto mezclado con etileno y el comonómero que no reaccionó. Para terminar la reacción polimérica se agrega un desactivador químico y la corriente líquida es precalentada desde 295°C a los 310°C.

Una vez calentada la corriente, se añade un segundo desactivador que promueva la eliminación de los catalizadores en el adsorbedor. La corriente que sale del adsorbedor es conducida a un proceso de despresurización en etapas donde se separa el polímero de compuestos no deseables, tales como disolvente, etileno y comonómero (Bhagwat Bhardwaj, 2013).

El polímero fundido es transportado hasta la extrusora y peletizadora donde se corta y moldea como pequeños pellets sólidos. Luego del proceso de moldeado, el polímero es llevado a un stripper para eliminar los hidrocarburos volátiles presentes por medio de una corriente de vapor. Los pellets purificados son dirigidos aun secador giratorio y posteriormente son almacenados en los silos de conserva (Bhagwat Bhardwaj, 2013).

#### 1.4.1.4 Raquis de Banano.

Las fibras de raquis de banano son residuos fibrosos de pseudotallos y hojas que permanecen luego del cultivo del banano. Dicha fibra ha sido utilizada por su efecto en las propiedades del composite debido a que aumenta el módulo de tracción y a la vez, disminuye la resistencia a la misma. Sin importar el tamaño de la fibra a utilizarse, mejora las propiedades de flexión de la matriz polimérica, resistencia a la tracción y tiene una buena adición al polímero (Mary Jasmin et al., 2022).

Esta fibra tiene un alto contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa, porcentajes mostrados en la tabla 1.3, que sirven en industrias papeleras, alimentarias, cosméticas y de materiales. Existen estudios que refuerzan la creación de biopelículas a partir del almidón de banano y la incorporación de nanopartículas extraídas del raquis de banano. Incluso estas nanopartículas se pueden usar como extensores en películas, hidrogeles y emulsiones con aplicaciones de grado alimentario y en industria farmacéutica (García-Ramón et al., 2021).

**Tabla 1.3**

*Caracterización química del raquis de banano*

| Compuesto               | Celulosa | Hemicelulosa | Lignina | Cenizas | Humedad |
|-------------------------|----------|--------------|---------|---------|---------|
| <b>Raquis de Banano</b> | 49.33%   | 12.04%       | 13.88%  | 4.95%   | 12.43%  |

Nota: Datos porcentuales promedios del raquis de banano costero.

Fuente: Paramasivam et al. (2022)

En el área de materiales, el contenido de fibra juega un papel importante en las propiedades mecánicas gracias a las características que se presentan como el contenido de humedad, las fracciones de fibra, la energía de impacto, la dureza, módulo de flexión, entre otras (Mudoj et al., 2021). Un estimado de estos valores se muestran en la tabla 1.4.

**Tabla 1.4**

*Caracterización mecánica del raquis de banano*

| <b>Compuesto</b>        | <b>Densidad lineal</b> | <b>Esfuerzo a la rotura</b> | <b>Elongación a la rotura</b> | <b>Resistencia a la Tracción</b> | <b>Módulo de Young</b> | <b>Tenacidad</b> |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------|
| <b>Raquis de Banano</b> | 25-35 Tex              | 714-976 F <sub>máx</sub>    | 4-6 %                         | 550 MPa                          | 20 GPa                 | 24-29 Cn/Tex     |

Nota: Datos porcentuales promedios del raquis de banano costero.

Fuente: Paramasivam et al. (2022)

#### **1.4.2 Análisis exergetico.**

La exergía, denominada también como energía disponible, es una propiedad que permite determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado (Cengel, 2015). El potencial de trabajo de la energía contenida en un determinado sistema no es más que el trabajo útil máximo que puede obtenerse del mismo. Un análisis exergetico es una herramienta útil que detecta las ineficiencias existentes dentro de un proceso (Sheng et al., 2023).

Al realizar el análisis conjunto basado en la primera y segunda ley de la termodinámica, se puede identificar la ubicación y magnitud de las destrucciones y pérdidas de exergía en el sistema. La eficiencia exergetica y la tasa de destrucción exergetica permiten evaluar el rendimiento de cada uno de los componentes o etapas en el proceso presentado.

#### **1.4.3 Análisis de ciclo de vida.**

El análisis del ciclo de vida se basa en una visión sistemática que permite comparar los impactos ambientales de distintos productos y

propuestas, como el caso de la gestión de desechos sólidos, el tratamiento de aguas residuales, gestión ambiental en sectores rurales, impacto del proceso productivo de plásticos, entre otros (Dong et al.,2022). Es un análisis completo de todo el diagrama de flujo del proceso, es decir, desde la obtención de la materia prima hasta el producto final. Considerando clasificaciones, caracterizaciones, economía, uso de recursos que relacionen la comparativa de un proceso teórico y su puesta en marcha de forma industrial. Evaluando así, si la alternativa propuesta es una solución asociada al cumplimiento de los objetivos sostenibles ambientales.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

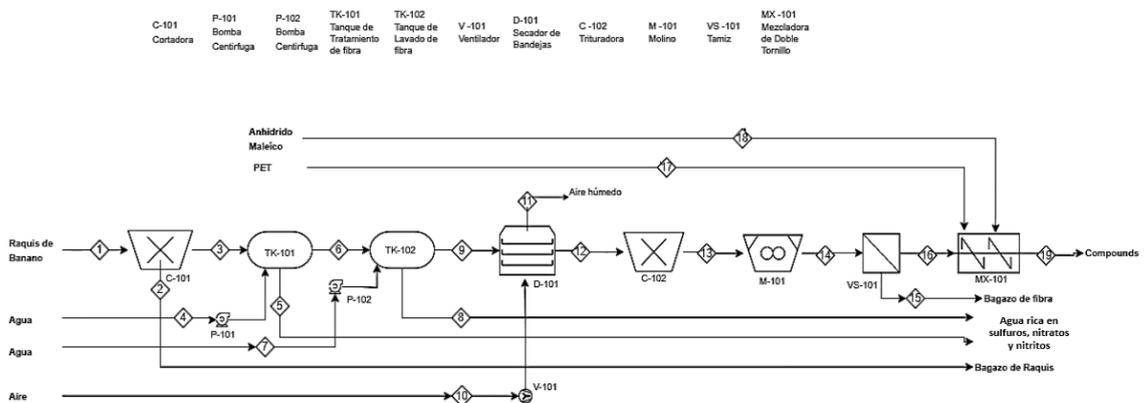
### 2.1 Descripción del Sistema

#### 2.1.1 Proceso propuesto.

El proceso propuesto plantea reemplazar la resina virgen LLDEP por un composite a partir de la fibra de banano extraída del raquis para la elaboración de distintos plásticos. El proceso se encuentra esquematizado en un diagrama de flujo mostrado en la figura 2.1.

**Figura 2.1**

*Diagrama de flujo del proceso propuesto*



Nota: Diagrama realizado usando el software Draw.io

Comienza con la obtención de la fibra neta de los raquis, para esto el raquis es sometido a un proceso de pelado. La fibra interna obtenida es cortada en pequeñas tiras que posteriormente serán almacenadas tanque de remojo herméticamente cerrado por un lapso de 15 días. Posterior al proceso de remojo, la fibra es transportada hacia una estación de lavado donde se realizan dos procedimientos de este tipo.

Una vez obtenida la fibra lavada, es enviada a un proceso de secado por aproximadamente 3 días a una temperatura de control de 60 °C. La fibra seca es enviada a una trituradora-cortadora donde se conseguirá que el material vegetal disminuya su tamaño y facilite el proceso de molienda. Una vez triturado, la materia vegetal pasa a un molino alimentario para pulverizar la fibra. El material pulverizado es introducido a un proceso de tamizado donde el tamaño de partícula final no exceda los 48 MESH.

A continuación, la fibra pulverizada es introducida a un mezclador de doble tornillo para combinarse con el LLDEP y anhídrido maleico en proporciones 2:93:5, respectivamente. La mezcla final procedente será el composite deseado que de acuerdo con el uso a dársele es cortado en pellets o almacenado en los silos.

## **2.2 Caracterización del proceso propuesto**

### **2.2.1 Obtención de la fibra.**

La fibra vegetal se obtuvo de raquis frescos procedentes de los residuos de fincas bananeras de la zona del litoral ecuatoriano. Se procedió a retirar la corteza con ayuda de un cuchillo de tal manera que los cortes sean lo más cuidadosos posibles para evitar pérdidas de fibra. Luego de obtener la fibra neta, se le realizaron cortes en forma de tiras con un grosor de aproximadamente 3-6 mm de espesor. Una vez obtenidas las tiras de fibra, esta fue sumergida en agua potable dentro de un recipiente herméticamente cerrado donde se dejaron reposar por aproximadamente 15 días.

## Figura 2.2

*Fibra extraída del raquis lista para el remojo*



### Relación de pérdidas de peso en la preparación del raquis

La materia prima se pesó en dos formas: raquis completos (corteza y fibra) y fibra neta. Se determinó el porcentaje de pérdida considerando los dos pesos obtenidos con anterioridad y se empleó la ecuación 2.1:

$$\%Perdida = \frac{P_{iR} - P_{pC}}{P_{iR}} * 100$$

$$P_{iR} = \text{Peso inicial del raquis} \quad (2.1)$$

$$P_{pC} = \text{Peso psoterior al corte}$$

### Relación del volumen de agua de lavado y masa de fibra

Posterior a la fase de remojo, se retiró la fibra del recipiente para colocarla en una funda plástica estéril y realizar el respectivo pesaje. Luego se ejecutaron dos lavados manuales con agua potable y un procedimiento manual para la eliminación del agua superficial sobrante. La ecuación 2.2 empleada para determinar el volumen de agua necesario en cada tanda de lavado fue obtenida experimentalmente y tiene como dato referencial que cada 5 kg de fibra pretratada se necesita 17 litros de agua potable.

$$V_{\text{agua lavado}} = M_{fp} * \frac{V_{AL-R}}{M_{fp-R}} \text{ (kg)} \quad (2.2)$$

$$M_{fp} = \text{Masa de fibra pretratada}$$

$$M_{fp-R} = \text{Valor referencial de la masa de fibra pretratada}$$

$$V_{AL-R} = \text{Valor referencial del volumen de agua}$$

Una vez acabado de efectuarse el último lavado, se procedió a realizar el pesaje final de la fibra para obtener el porcentaje de pérdida de masa por los lavados. Empleando la ecuación 2.3:

$$M_f = \frac{M_{pR} - M_{pL}}{M_{pR}} * 100 \text{ (kg)} \quad (2.3)$$

$M_{pR}$  = Masa de fibra posterior al remojo

$M_{pL}$  = Masa de fibra posterior al lavado

### Figura 2.3

*Fibra obtenida después del proceso de remojo*



### Rendimiento de fibra seca

Inmediatamente después de los lavados, las tiras de fibra fueron colocadas en un secador de bandejas marca Mapimpianti, a 60°C por 3 días para el retiro de la humedad. Transcurrido los 3 días, se procedió a retirar las muestras de fibra y pesarlas en la balanza analítica marca Kern. Con esta última información y haciendo uso de datos másicos recopilados anteriormente, se determina el porcentaje de humedad eliminada por medio de la ecuación 2.4:

$$\% \text{Humedad} = \frac{M_{pL} - M_s}{M_{pL}} * 100 \quad (2.4)$$

$M_{pL}$  = Masa de fibra posterior al lavado

$M_s$  = Masa de fibra seca

## Figura 2.4

*Fibra colocada en el secador*



## Figura 2.5

*Fibra seca*



## Composición química del agua de lavado

Los efluentes de agua usadas para los distintos procesos de previos (remojo y lavados) fueron caracterizadas en 4 parámetros de interés: sulfuros, potasio, nitritos y nitratos. Para esto se recogieron muestras de aproximadamente 4 L de agua de cada variante y se realizaron análisis por espectrofotometría.

## Energía consumida para secado

Se analizaron los gastos de energía consumida por el uso del secador de bandeja considerando la potencia eléctrica que otorga el equipo y las horas de uso total. La ecuación 2.5 son ayudó a determinar en unidades energéticas dicho valor.

$$\text{Energía Consumida} = \text{Potencia (kW)} * \text{Tiempo (h)} \quad (2.5)$$

### 2.2.2 Obtención del compound.

La fibra previamente secada se trituro manualmente con ayuda de unas dijeras estériles para disminuir el tamaño de partícula y posterior a la trituración, la muestra fue colocada en un molino SM4 marca Brabender donde se realizó la primera molienda por tandas. Una vez obtenida las primeras muestras molidas se procesó a separar las fases por medio de sistema de tamices de 18 MESH, 30 MESH y 48 MESH. La fase en polvo se guardó en una bolsa hermética mientras que los residuos sólidos fueron reprocesados en el molino.

**Figura 2.6**

*Fibra molida y en proceso de tamizado*



Una vez terminado los procesos de molienda y tamizado se pesó el residuo y utilizando la ecuación 2.6 se calculó la masa neta real que ingresara a la mezcladora.

$$M_{final\ a\ mezcladora} = M_s - M_r \text{ (kg)} \quad (2.6)$$

$M_s$  = Masa de fibra seca

$M_r$  = Masa del residuo

La fibra de raquis neta a usar fue mezclada en una proporción porcentual acorde. Según Corral Santos & Barcia Mero (2022), "las

proporciones adecuadas son 2% fibra de raquis, 5% anhídrido maleico y 93% polietileno de baja densidad (p. 54). Para la fabricación de este compuesto se empleó una mezcladora de doble tornillo marca Brabender que requirió 35 g de mezcla. La preparación del composite se la realizó a 107 °C por 15 min.

### **Energía consumida para mezclado y fusión**

Se analizaron los gastos de energía consumida por el uso del molino y el mezclador considerando la potencia eléctrica que otorga cada equipo (0.26 kW y 2.2 kW respectivamente) y las horas de uso total. La ecuación 2.5 son ayudó a determinar en unidades energéticas dicho valor.

$$Energía Consumida = Potencia (kW) * Tiempo (h) \quad (2.7)$$

### **2.3 Análisis exergético**

Para realizar el análisis exergético se tendrán en consideración dos casos: Caso A para el proceso convencional de obtención de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y Caso B para el proceso propuesto para la obtención de los compounds. En el caso A, se siguieron las ecuaciones estándar de exergía para el componente químico y componente físico, así como para las exergías por corriente y por equipo.

Las exergías por corriente (ecuación 2.8) son las sumatorias de una parte física y una parte química aportada por los componentes que interactúan en esa corriente. Las exergías químicas de elementos puros, químicas de una mezcla y físicas se obtuvieron por las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11 respectivamente.

$$E_{total} = E_{ph} + E_{ch} (kJ/kg) \quad (2.8)$$

Dónde

$$E_{CH,puro} = n_{sust} * e_{CH}^I \text{ (kJ/kg)} \quad (2.9)$$

$$E_{CH,mezcla} = \sum x_k * e_{CH_k} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \text{ (kJ/kg)} \quad (2.10)$$

$$E_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \text{ (kJ/kg)} \quad (2.11)$$

En el caso B, se considera la ecuación (2.12) por proporciones para el cálculo de la exergía química ligada a la materia prima sólida de origen vegetal: raquis, corteza y fibra. Esta ecuación relaciona matemáticamente las exergías estándar y las composiciones en peso de la materia orgánica. Las distintas composiciones para las materias primas se presentan en el anexo A.

$$e_{ma}^{CH} = 1812.5 + 295.606C + 587.354H + 17.506O + 17.735N + 95615S - 31.8A \text{ (kJ/kg)} \quad (2.12)$$

Dónde

*C* = composición másica del carbono

*H* = composición másica del hidrogeno

*O* = composición másica del oxígeno

*N* = composición másica del nitrogeno

*S* = composición másica del azufre

*A* = composición másica de la ceniza

Las exergías restantes son evaluadas con las ecuaciones estándares antes mencionadas.

Para el cálculo de las exergías por equipos se consideraron las exergías totales que provienen de las sustancias evaluadas como fuel y las sustancias evaluadas como producto. De acuerdo con cada equipo propuesto, estas ecuaciones tienden a variar. Para el caso A, las ecuaciones de exergías para fuel y producto de cada equipo se las presentan en el anexo E, mientras que para el caso B, las ecuaciones de exergías para fuel y producto de cada equipo se las presentan en el anexo F.

Se analizó la eficiencia exergética por etapas y global de ambos procesos (ecuación 2.13), dónde se relaciona la exergía del producto respecto a la exergía del fuel para cada uno de los equipos involucrados, también se realizó el cálculo de las exergías destruidas de los mismos.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{prod}}{\dot{E}_{fuel}} \quad (2.13)$$

Dónde

$\dot{E}_{prod}$  = exergía total de los productos

$\dot{E}_{fuel}$  = exergía total del fuel

La exergía destruida (ecuación 2.14) relaciona la diferencia existente entre el valor obtenido de exergía de alimentación respecto a la exergía del producto.

$$\dot{E}_D = \dot{E}_{fuel} - \dot{E}_{prod} \text{ (kJ/h)} \quad (2.14)$$

## 2.4 Análisis de ciclo de vida

La metodología de este análisis de ciclo de vida se subdivide en:

Objetivo: Evaluar el impacto ambiental vinculado con la producción de polietileno lineal de baja densidad y composite de fibra vegetal para lograr una comparación entre los escenarios propuestos: proceso convencional y proceso propuesto.

Alcance: El alcance de la producción del composite abarca las etapas:

- Actividad agrícola (origen del raquis)
- Obtención de la fibra / Obtención del polietileno de baja densidad
- Obtención del compound/composite

Análisis de inventario: Para establecer una igualdad entre procesos, se define como unidad funcional del sistema de estudio a 1 kg de producto (composite o polietileno lineal de baja densidad). Los datos

primarios necesarios para dicho análisis fueron obtenidos de la caracterización del proceso propuesto y del estudio previo “Cradle to gate life cycle analysis of linear low-density polyethylene (LLDPE) resin” (Franklin Associates, 2022), para el proceso convencional. Consiguiente a esto, se realizó el balance de materia y energía para ambos procesos basados en la unidad funcional. Los datos informativos de la producción del raquis fueron extraídos de la base de datos Agribalyse instalada en el software OpenLCA v1.11. Los resultados obtenidos del inventario de ciclo de vida son:

- Demanda de energía acumulada (MJ)
- Consumo de agua (m<sup>3</sup>)

Evaluación de impacto: Los cálculos en esta fase se realizaron por medio de OpenLCA v1.11 siguiendo el método ReCiPe v1.16. Las categorías de impacto evaluadas fueron:

- Cambio Ambiental (kg CO<sub>2</sub> eq)
- Potencial de eutrofización (kg N eq)

## **2.5 Análisis económico**

El análisis económico realizado siguió la metodología de Turton et al. (2018), aprovechando el recurso Capcost versión 2017 con un CEPCI 542 para la determinación del flujo de caja del proceso convencional respecto al proceso propuestos, así como la obtención de los indicadores económicos TIR y VAN. Los datos primarios para este análisis se consideraron de los balances de materia y energía de cada uno de los procesos. Para el cálculo del costo de producto (pellets) mediante plantilla se calcula el PEC, TCI considerando diversas variables entre ellas, la materia prima, costo de mano de obra, cantidad de energía consumida y cantidad de recursos de servicios utilizados (agua y vapor).

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Caracterización del proceso propuesto

El proceso para la elaboración de compounds a partir de polietileno y fibra vegetal de banano se realizó bajo un esquema batch. Fue caracterizado y los resultados se presentan en la tabla 3.1

**Tabla 3.1**

*Caracterización del proceso propuesto*

| Estado | Descripción  | Masa (kg) | Temperatura (°C) |
|--------|--------------|-----------|------------------|
| 1      | Raquis       | 32,40     | 25               |
| 2      | Corteza      | 14,40     | 25               |
| 3      | Fibra        | 18,00     | 25               |
| 4      | Agua-R       | 108,60    | 25               |
| 5      | Agua-DR      | 114,70    | 25               |
| 6      | Fibra        | 18,30     | 25               |
| 7      | Agua-L       | 138,00    | 25               |
| 8      | Agua-DL      | 143,40    | 25               |
| 9      | Fibra        | 18,70     | 25               |
| 10     | Aire         | 10,72     | 60               |
| 11     | Aire Húmedo  | 28,66     | 53               |
| 12     | Fibra        | 0,76      | 60               |
| 13     | Fibra        | 0,76      | 25               |
| 14     | Fibra        | 0,74      | 25               |
| 15     | Bagazo       | 0,55      | 25               |
| 16     | Fibra        | 0,19      | 170              |
| 17     | PE           | 8,95      | 170              |
| 18     | Anh. Maleico | 0,48      | 170              |
| 19     | Pellets      | 9,62      | 25               |

Nota: Datos obtenidos del proceso experimental

Los resultados de peso relacionados al raquis, fibra y bagazo se obtuvieron por pesaje manual en cada etapa del proceso, mientras que el peso del agua para las secciones remojo y lavado se lo obtuvieron por la

ecuación 2.22. La masa de aire circundante necesario para el secado se basó en dato proporcional de 0.573 extraído de “Drying of Banana Pseudo-stem Fibers: Evaluation of Kinetic Models, Effective Diffusivity, Thermodynamic Properties, and Structural Characterization” (de Oliveira et al., 2022). Los resultados de masa del PE y anhídrido maleico fueron calculados siguiendo las proporciones de 5% de anhídrido maleico y 93% de PE (Corral Santos & Barcia Mero, 2022) con respecto al total de pellet.

### 3.2 *Análisis Exergético*

#### 3.2.1 *Análisis exergético Proceso Propuesto.*

El análisis exergético del proceso planteado fue determinado partiendo de los resultados de la caracterización a menor escala, los resultados se pueden visualizar en la tabla 3.2. Los valores energéticos de entalpía y entropía; y los valores exergético químicos y físicos se registraron en unidades específicas. Mientras que para las de exergías totales por corrientes y equipos, se consideró una capacidad de producción de compounds de 253.16 kg/h, obteniendo resultados en un determinado rango de operación.

**Tabla 3.2**

*Análisis exergético del proceso propuesto*

| Estado | Descripción | H<br>(kJ/kg) | S<br>(kJ/kg) | ech<br>(kJ/kg) | eph<br>(kJ/kg) | e (kJ/kg) | É (kJ/h) |
|--------|-------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------|----------|
| 1      | Raquis      | 9,140        | 1,179        | 1961,12        | 0              | 1961,12   | 1672115  |
| 2      | Corteza     | 4,022        | 0,440        | 1970,43        | 0              | 1970,43   | 746688   |
| 3      | Fibra       | 5,119        | 0,660        | 1960,87        | 0              | 1960,87   | 928832   |
| 4      | Agua-R      | 104,94       | 0,367        | 479,78         | 0              | 479,78    | 1371157  |
| 5      | Agua-DR     | 104,94       | 0,367        | 481,16         | 0              | 481,16    | 1452333  |
| 6      | Fibra       | 5,119        | 0,660        | 1970           | 0              | 1969,69   | 948560   |
| 7      | Agua-L      | 104,94       | 0,367        | 479,78         | 0              | 479,78    | 1742355  |
| 8      | Agua-DL     | 104,94       | 0,367        | 488            | 0              | 488,07    | 1841805  |

|           |              |        |         |          |        |          |          |
|-----------|--------------|--------|---------|----------|--------|----------|----------|
| <b>9</b>  | Fibra        | 5,119  | 0,660   | 1980     | 0      | 1980,22  | 974434   |
| <b>10</b> | Aire         | 335,09 | 7,002   | 1345,01  | 32,60  | 1377,60  | 389716   |
| <b>11</b> | Aire Húmedo  | 327,98 | 6,980   | 1245,69  | 26,02  | 1271,71  | 959163   |
| <b>12</b> | Fibra        | 20,163 | 1,526   | 1500     | 5,86   | 1506,30  | 30126    |
| <b>13</b> | Fibra        | 2,989  | 1,239   | 1500     | 0      | 1500,44  | 30009    |
| <b>14</b> | Fibra        | 2,989  | 1,239   | 1500     | 0      | 1500,44  | 29219    |
| <b>15</b> | Bagazo       | 2,989  | 1,239   | 1500     | 0      | 1500,44  | 21717    |
| <b>16</b> | Fibra        | 41,913 | 2,730   | 1500     | 43,4   | 1543,80  | 7719     |
| <b>17</b> | PE           | 105,2  | 325,924 | 48360    | 215,5  | 48575,51 | 11440808 |
| <b>18</b> | Anh. Maleico | 129,27 | 134,47  | 2678     | 89,1   | 2767,14  | 34954    |
| <b>19</b> | Pellets      | 105,14 | 309,89  | 45138,71 | 205,75 | 45344,46 | 11479309 |

Nota: Datos obtenidos del proceso experimental

En las tres primeras corrientes, se puede observar que la exergía química específicas de la materia orgánica presenta una variación significativa como consecuencia de las composiciones másicas que conforman cada elemento del pseudo tallo de banano, es decir, raquis completo, corteza y fibra. Los valores dependerán del contenido de C, H, O, S, N y cenizas.

En las corrientes 6, 9 y 12 relacionadas a la fibra de banano se muestra un cambio considerable en las exergías químicas específicas por la adición de agua gracias a las fases previas de remojo-lavado y la eliminación de agua superficial en la fase de secado. Además, en las fases de remojo y lavado, la fibra desprende cantidades mínimas de azufre, nitratos y nitritos (ver anexo G) que contribuyeron a la variación de estas exergías pertenecientes a las fibras y las exergías correspondientes a los efluentes de agua de los procesos.

A partir de la corriente 12, la fibra previa al mezclado mantiene constante su exergía química específica porque los procesos a los cuales es sometida son físicos y no alteran su composición elemental. Las

exergías físicas de cada una de las corrientes se calcularon considerando como estado muerto, a un estado que presenta una temperatura de 25°C y 1 atm de presión.

La eficiencia exergética nos ayuda a cuantificar la calidad de la energía disponible del medio, es decir, nos determina en que proporción se emplea el trabajo útil disponible. Dentro del sistema propuesto existen 8 procesos distintos, cada uno de ellos presentan respectivamente sus corrientes exergéticas totales de fuel y producto como se muestra en la tabla 3.3. Estas corrientes fueron calculadas modelando diversas ecuaciones acordes a cada uno de los equipos.

**Tabla 3.3**

*Eficiencia exergética y exergía destruida del proceso propuesto*

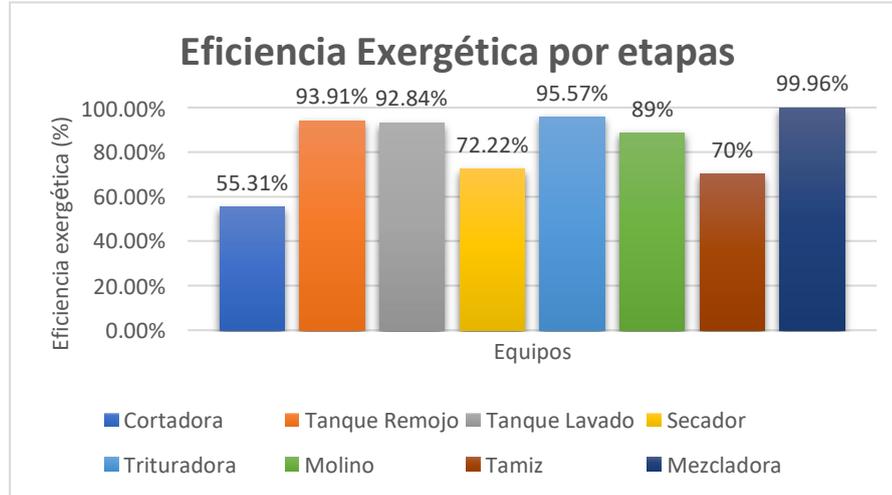
| <b>Equipos</b>        | <b><math>\dot{E}_{\text{fuel}}</math><br/>(kJ/h)</b> | <b><math>\dot{E}_{\text{producto}}</math><br/>(kJ/h)</b> | <b>Eficiencia<br/>(%)</b> | <b><math>\dot{E}_{\text{destruida}}</math><br/>(kJ/h)</b> |
|-----------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Cortadora</b>      | 1677861                                              | 927992                                                   | 55,31%                    | 749869                                                    |
| <b>Tanque Remojo</b>  | 1009168                                              | 947718                                                   | 93,91%                    | 61449                                                     |
| <b>Tanque Lavado</b>  | 1048668                                              | 973595                                                   | 92,84%                    | 75073                                                     |
| <b>Secador</b>        | 1369824                                              | 989255                                                   | 72,22%                    | 380569                                                    |
| <b>Trituradora</b>    | 31363                                                | 29974                                                    | 95,57%                    | 1388                                                      |
| <b>Molino</b>         | 30910                                                | 29186                                                    | 94%                       | 1725                                                      |
| <b>Tamiz</b>          | 30886                                                | 21692                                                    | 70%                       | 9194                                                      |
| <b>Mezcladora</b>     | 11483681                                             | 11479299                                                 | 99,96%                    | 4382                                                      |
| <b>Sistema Global</b> | 16682362                                             | 15398713                                                 | 92%                       | 1283648                                                   |

Nota: Datos obtenidos del proceso experimental

La figura 3.1 muestra de forma gráfica las diferentes etapas con sus eficiencias exergéticas. A lo largo del proceso propuesto, las etapas de cortado, secado y tamizado son aquellas que poseen un menor porcentaje en la eficiencia exergética.

**Figura 3.1**

*Eficiencia exergética por etapas del proceso propuesto*



En la etapa de cortado, la eficiencia exergética se situó en un 55.31%. Se evaluaron dos causas, las pérdidas provenientes del desecho sin tratamiento de la corteza del raquis y la potencia suministrada por equipo. Al ser un proceso físico, los cambios de exergía ligados a la biomasa por la pérdida y desecho de la corteza son ínfimos. Sin embargo, estos cambios existen y tienen su origen en la composición química del raquis, corteza y fibra. Otra etapa que también presentó una eficiencia exergética por debajo del 80% es el tamizado (70%), al ser de igual manera un proceso físico, la exergía de la fibra considerada bagazo contribuye mínimamente a la pérdida de eficiencia. Sin embargo, este proceso también considera una fuente exergética a la potencia suministrada.

Ambas etapas presentadas tienen como principales actores a equipos con fuente eléctrica que operan en movimiento. Estos equipos se alimentan de la energía eléctrica convirtiéndola en el trabajo que proporcionará la máquina. Sin embargo, como todo proceso termomecánico se tiene que evaluar las irreversibilidades que destruyen la exergía y minimizan su eficiencia exergética. Dentro de estas etapas, la

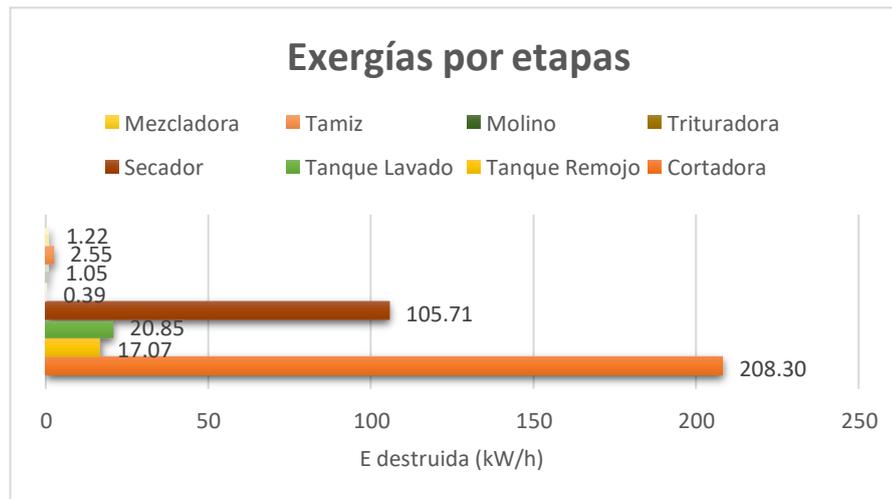
irreversibilidad que se presenta es la fricción. El movimiento de los cuerpos en direcciones opuestas genera que en el límite de ambos se produzca una fuerza que imposibilita el movimiento (fricción), por lo que parte de la energía suministrada al equipo se convierte en el trabajo para sobrepasar esa fuerza opuesta y posteriormente se transforma en calor que es transferido a los cuerpos en cuestión. De esta forma parte del trabajo requerido por la máquina para cumplir su función se desperdicia como calor generado destruyendo parte de la exergía y disminuyendo su eficiencia (Vide A,2005).

Por otro lado, la etapa del secado también presenta un porcentaje inferior al 80%. Esto se debe a dos motivos: la composición porcentual de las corrientes de entrada tuvo una variación a la salida y el proceso presentó irreversibilidades que destruyeron parte de la exergía del fuel. Al ser un proceso de secado, el aire adquiere agua en forma de vapor proveniente de la deshidratación de la muestra (fibra) por lo cual las composiciones elementales de cada una de las corrientes que ingreso varían mínimamente. Esta variación produce un cambio minúsculo en las exergías de las corrientes de salida por lo que la eficiencia exergética se verá ínfimamente afectada. En cambio, las irreversibilidades que presenta el proceso de secado modifican significativamente la eficiencia exergética. La potencia suministrada al equipo es conducida por dos vías, una parte es enviada para activar los ventiladores que generaran el flujo de aire necesario para el secado mientras que la otra parte de la potencia es enviada hacia una resistencia que transformara la energía eléctrica a energía térmica para luego calentar el aire. En la primera vía, cierta parte de la exergía se destruye por la fricción generada entre las aspas de los ventiladores y el aire mientras que en la segunda vía parte de la energía térmica transferida al aire se pierde en los alrededores.

En la figura 3.2, se muestra por etapa la cantidad de exergía destruida. Esta exergía destruida hace referencia al trabajo útil en el estado muerto que no se logró utilizar para obtener el producto deseado.

**Figura 3.2**

*Exergía destruida por etapas del proceso propuesto*



Las etapas con mayor exergía destruida son las de cortado y secado con 208.30 kW/h y 105.71 kW/h respectivamente. Las razones de esto fueron explicadas anteriormente. La etapa de tamizado presenta una destrucción exergética de 2.5 kW/h, aunque su eficiencia exergética es del 70% porque la diferencia de entre las exergías de fuel y producto es pequeña, pero en términos porcentuales la proporción que representa es significativa. La causa de esta destrucción también fue expuesta con anterioridad.

Las etapas de lavado y remojo presentan una destrucción exergética de 20.85 kW/h y 17.07 kW/h respectivamente. En la etapa de remojo solo se considera el cambio exergético químico ya que es un proceso estacionario mecánico en donde las composiciones porcentuales de nitratos, nitritos y sulfuros presentes en las fibras se ven mínimamente alterados los la disolución de estos iones en el agua. Mientras que, en el

tanque de lavado, adicional al cambio de exergía química por la disolución de ciertos iones también se presenta una pérdida de potencia por la fricción gracias a los rodillos.

### 3.2.2 Análisis exergético Proceso Convencional.

Mediante un balance de materia, se obtuvieron la información de flujos, además haciendo uso de las ecuaciones estándar se analizaron parámetros energéticos y exergético. Los resultados del análisis energético y exergético se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4**

*Análisis exergético del proceso convencional*

| No. Cte. | Descripción         | Flujo (kg/h) | T(°C) | H (kJ/kg) | S (kJ/kg K) | Ė ch (kJ/h) | Ė ph (kJ/h) | Ė (kJ/h)    |
|----------|---------------------|--------------|-------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1        | Etileno             | 70,46        | 30    | 6,154     | 0,0222      | 3416901,49  | 4,73        | 3416906,21  |
| 2        | Etileno             | 74,27        | 30    | 6,154     | 0,0222      | 3416901,49  | 4,98        | 3416906,47  |
| 3        | Ciclo<br>Hexano     | 203,83       | 35    | -92,16    | -0,2785     | 9467983,98  | 68,12       | 9468052,10  |
| 4        | Hidrógeno           | 1,00         | 270   | 7476      | 62,05       | 332262,00   | 3554,29     | 335816,29   |
| 5        | Mezcla              | 279,11       | 45    | -38,8044  | -0,19748    | 13386529,71 | 19577,84    | 13406107,55 |
| 6        | Etileno NR          | 3,52         | 270   | 478,2     | 1,146       | 170884,51   | 483,53      | 171368,04   |
| 7        | Mezcla              | 275,58       | 235   | -39,3857  | 0,02549     | 13201995,96 | 1035,00     | 13203030,96 |
| 8        | Ciclo<br>Hexano Ext | 22,42        | 235   | 778,2     | 1,932       | 1041478,24  | 4752,61     | 1046230,85  |
| 9        | LLDPE               | 253,16       | 30    | 6,6653856 | 0,22022568  | 12242817,60 | 50468,16    | 12293285,76 |

Nota: Datos proporcionales obtenidos del proceso convencional

Fuente: Bhagwat Bhardwaj (2013)

Los valores energéticos de entalpía y entropía; y los valores exergético químicos y físicos se registraron en unidades específicas. Mientras que para las de exergías totales por corrientes y equipos, se

consideró una capacidad de producción de pellets de LLDPE de 253.16 kg/h, obteniendo resultados para un determinado rango de operación.

En las dos primeras corrientes, la exergía química del etileno se mantiene constante porque el proceso por el que pasa es netamente físico y no altera su composición elemental. Las corrientes 3 y 4 son exergías químicas de elementos puros por los que sus datos fueron tomados de tablas específicas. Para la corriente 5, la exergía química a considerar es la de una mezcla por lo que se empleó su composición porcentual junto con la ecuación 2.10. Las corrientes posteriores 6, 7, 8 correspondientes al etileno sobrante, mezcla y el ciclo hexano presentan una variación significativa porque son efluentes de procesos químicos que cambiaron significativamente su composición química. Las exergías físicas de cada una de las corrientes se calcularon considerando como estado muerto, a un estado que presenta una temperatura de 25°C y 1 atm de presión.

El proceso convencional se ejecuta en 3 etapas distintas, en la tabla 3.5 se presentan las exergías totales para fuel y producto de cada una de ellas. Gracias a la figura 3.3, donde se muestran la eficiencia exergética dada por la relación de los datos de fuel y producto, se puede determinar las etapas con mayor o menor pérdida exergética. Mientras que la figura 3.4 expone la exergía destruida totales por equipos.

**Tabla 3.5**

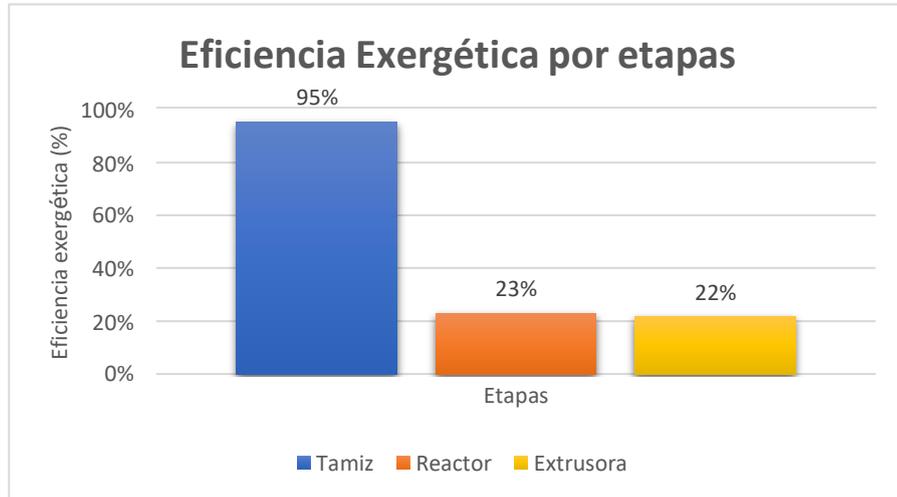
*Eficiencia exergética y exergía destruida del proceso convencional*

| <b>Equipos</b>        | <b><math>\dot{E}</math> fuel (kJ/h)</b> | <b><math>\dot{E}</math> producto (kJ/h)</b> | <b>Eficiencia (%)</b> | <b><math>\dot{E}</math> destruida (kg/h)</b> |
|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|
| <b>Tamiz</b>          | 3588274                                 | 3416906                                     | 95%                   | 171367                                       |
| <b>Reactor</b>        | 997344                                  | 123332                                      | 23%                   | 874012                                       |
| <b>Extrusora</b>      | 377471                                  | 136485                                      | 22%                   | 240985                                       |
| <b>Sistema Global</b> | 4963090                                 | 3676724                                     | 74%                   | 1286365                                      |

Nota: Datos obtenidos a partir del balance del proceso convencional

**Figura 3.3**

*Eficiencia exergética por etapas del proceso convencional*



**Figura 3.4**

*Exergía destruida por etapas del proceso convencional*



Las etapas con más pérdidas exergéticas son la etapa del reactor y la extrusora que poseen una eficiencia exergética de 22% y 23% respectivamente. En la etapa del reactor es evidente que se encontraran un sinnúmero de pérdidas de trabajo útil debido a que las materias primas que ingresan son transformadas en un porcentaje significativo al producto deseado, mientras que su restante es desechado como efluente o reciclado en un proceso anterior. Otra de las irreversibilidades a

considerar dentro del reactor es el cambio y constancia de temperatura ideal para la polimerización del etileno, la chaqueta que recubre al reactor mantiene el flujo constante de agua fría permitiendo que la transferencia del exceso de calor hacia el agua de servicio sea una diferencia finita.

En la etapa de extracción, la pérdida exergética se basa principalmente en la mezcla de fluidos independientes lo que provoca que parte de las exergías independientes se alteren por la formación de un nuevo compuesto. Además, la extrusora descarga un efluente de sobrantes que serán evacuados sin tratamiento de recuperación.

### **3.3 Análisis económico**

Para el presente análisis se tomará en consideración la composición del composite final, es decir, 2% de fibra de raquis de banano y 5% de anhídrido maleico (Corral Santos & Barcia Mero, 2022a). Además, la cantidad de producción diaria que es un aproximado a 120 kg fibra seca /día a partir del procesamiento de 20463 kg/d de la materia prima que es el raquis de banano.

Como primer punto es importante obtener el precio/costo del producto realizando las consideraciones necesarias respecto a los valores fijos, costos de inversión, etc. Se comienza con una descripción del flujo del proceso considerando los equipos a utilizar y el costo de cada uno de ellos para la obtención del PEC total cuyo valor es \$76 000 para el posterior cálculo del TCI (Total Capital Investment). Los valores considerados para obtener el PEC se presentan en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6***PEC total para el proceso propuesto*

| Etapas                      | PEC     |                 |
|-----------------------------|---------|-----------------|
|                             | Equipos | Dólares         |
| Extracción                  | C-101   | 8000,00         |
| Remojo                      | TK-101  | 6000,00         |
| Lavado                      | TK-102  | 5000,00         |
| Secado de fibra             | D-101   | 36000,00        |
| Molienda y<br>Tamizado      | C-102   | 8000,00         |
|                             | VS-101  | 3000,00         |
| Preparación de<br>Composite | MX-101  | 10000,00        |
| <b>PEC TOTAL</b>            |         | <b>76000,00</b> |

Nota: Los precios de los equipos se consideraron tomando en cuenta la capacidad de procesamiento y producción de la planta

Considerando una proyección para los primeros 10 años de operación con un total de 18 personas laborando, la suma del valor Z (\$/h) es de 18.43 (Tabla 3.7), tomando una relación proporcional a la capacidad diaria de producción se obtiene un valor de \$6.51 por kg de fibra seca procesada.

**Tabla 3.7***Valores Z*

| <b>COMPONENTS</b> | <b>Z<sub>ci</sub><br/>(\$/h)</b> | <b>Z<sub>om</sub><br/>(\$/h)</b> | <b>Z<br/>(\$/h)</b> | <b>Z<br/>(\$/s)</b> |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>C-101</b>      | 1.09                             | 0.85                             | 1.94                | 0.00054             |
| <b>TK-101</b>     | 0.82                             | 0.63                             | 1.46                | 0.00040             |
| <b>TK-102</b>     | 0.68                             | 0.53                             | 1.21                | 0.00034             |
| <b>D-101</b>      | 4.92                             | 3.81                             | 8.73                | 0.00243             |
| <b>C-102</b>      | 1.09                             | 0.85                             | 1.94                | 0.00054             |
| <b>VS-101</b>     | 0.41                             | 0.32                             | 0.73                | 0.00020             |
| <b>MX-101</b>     | 1.37                             | 1.06                             | 2.43                | 0.00067             |
|                   |                                  | Sum                              | 18.43               | 0.00512             |

Nota: Datos obtenidos a partir de la plantilla de análisis económico.

Con el valor obtenido para la fibra seca y haciendo uso de las composiciones de cada componente se calcula el precio del producto que sería finalmente el compound cuyo valor será de \$1.36. Para dicho valor debe considerarse un incremental con el objetivo de hacer rentable el precio para la inversión generada. Y obtener finalmente los indicadores correspondientes al valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de inversión. Estos indicadores se muestran en la tabla 3.8.

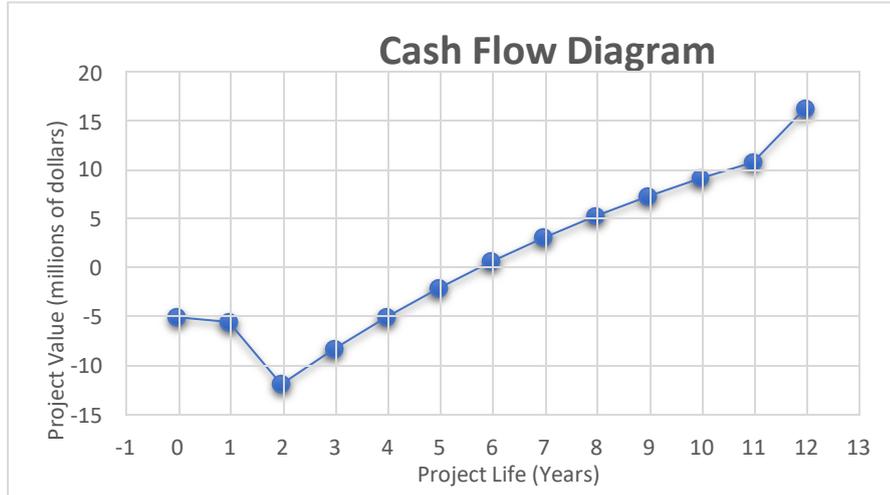
**Tabla 3.8***Indicadores económicos del proceso propuesto*

| <b>Proceso Propuesto</b>             |              |
|--------------------------------------|--------------|
| <b>INDICADOR</b>                     | <b>VALOR</b> |
| <b>VAN (Millones)</b>                | 16,27        |
| <b>TIR</b>                           | 28,09%       |
| <b>Tiempo de recuperación (años)</b> | 6            |

Nota: Datos obtenidos a partir de CapCost.

**Figura 3.5**

*Diagrama de flujo de caja del sistema propuesto*



Fuente: CapCost.

Se define en el software los equipos, potencias y/o áreas según se solicite. Posteriormente, se ingresan los flujos de entrada, producto y residuo en el proceso (ver anexo H) colocándose los precios unitarios de cada material y se obtienen los costos anuales por cada uno de ellos. Se obtiene que el material que genera un mayor costo es el producto “Pellet”. Se debe considerar que para su costo unitario se aplicó un incremento del 50% referente al costo inicial obtenido. Es importante considerar que el costo del producto es el dato principal que causa una variación al momento de generar la tasa interna de retorno debido a que mientras mayor sea dicho porcentaje, mayor será la rentabilidad del proyecto.

**Tabla 3.9**

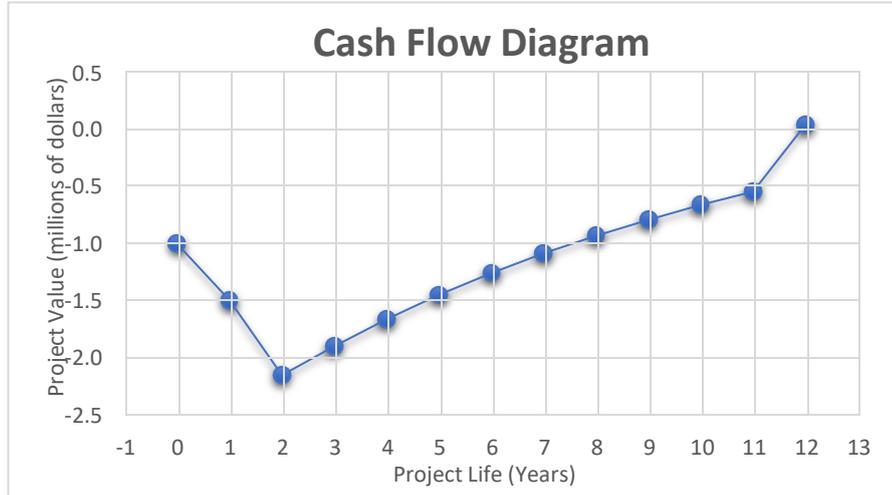
*Indicadores económicos del proceso convencional*

| Proceso Convencional          |        |
|-------------------------------|--------|
| INDICADOR                     | VALOR  |
| VAN (Millones)                | 0,04   |
| TIR                           | 10,29% |
| Tiempo de recuperación (años) | 12     |

Nota: Datos obtenidos en CAPCOST

**Figura 3.6**

*Diagrama de flujo de caja del sistema convencional*



Fuente: CapCost.

Para el proceso convencional de producción de polietileno se consideran las variables de equipos a utilizar durante el proceso, las materias primas y residuos obteniéndose finalmente un TIR del 10,29%. Mediante la comparación de la Tabla 3.8 y 3.9, acerca de los indicadores económicos tanto del proceso convencional como del proceso propuesto se puede evidenciar que en relación con el VAN el proceso propuesto tiene un mejor indicador que el convencional reflejando un valor neto actual de 16,27 millones de dólares, es decir 16,23M más que el proceso convencional.

Adicional, el mismo tiene una tasa de retorno menor al proceso propuesto, es importante considerar que los compounds a partir de fibra se desarrollan de lo que se considera un residuo para la industria y el costo considerado para la simulación es de aproximadamente \$0,05 por costos de transporte, pero este valor podría disminuir logrando que aumente el VAN a favor del proceso propuesto. El proceso del LLPDE considera residuos como los componentes que no reaccionan y el residuo generado por la extrusora.

Se realizó una proyección para 12 años, dónde puede observarse que, a partir del segundo año, la empresa empezaría a recuperar su inversión. Luego de aproximadamente 6 años, la empresa habrá recuperado su inversión inicial y empezará ya a generar su propia ganancia.

### 3.4 **Análisis de Ciclo de Vida**

#### 3.4.1 **ACV del proceso propuesto.**

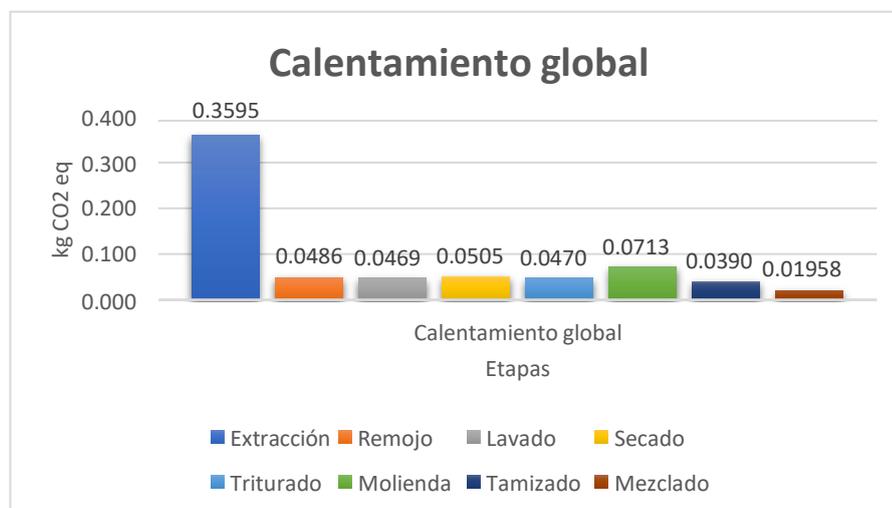
El análisis de ciclo de vida fue realizado para el proceso propuesto teniendo como unidad funcional másica 1 kg de composite. Las categorías analizadas fueron calentamiento global, demanda acumulada de energía, consumo hídrico y potencial de eutrofización.

##### 3.4.1.1 **Calentamiento global del proceso propuesto.**

La categoría de calentamiento global reúne información sobre las emisiones y/o contaminantes que colaboran a incrementar la cantidad de gases de efecto invernadero en el ambiente. La figura 3.7 presenta por etapas las contribuciones de este parámetro en unidades de kg CO<sub>2</sub> eq.

**Figura 3.7**

*Calentamiento global por etapas del proceso propuesto*



Fuente: Software Open LCA

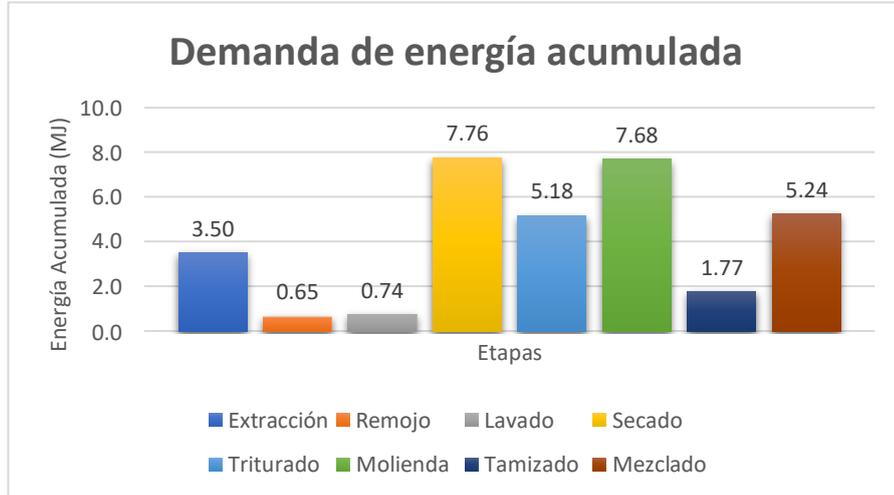
En el proceso de producción y extracción del raquis se puede evidenciar que el valor de dicho parámetro rodea los 0.3595 kg CO<sub>2</sub> eq, este resultado esta principalmente vinculado a la producción y tratamiento de las plantaciones de banano (irrigaciones, fertilizantes, desforestación, etc.), además del impacto que ocasiona el transporte de los raquis a la planta procesadora. Las etapas siguientes presentan contribuciones por debajo del 0.1 kg CO<sub>2</sub> eq y se relacionan mayoritariamente con las emisiones de gases por tratamientos posteriores efectuados sobre el residuo o bagazo de fibra.

#### **3.4.1.2 Demanda de energía acumulada del proceso propuesto.**

La demanda de energía acumulada resume todas las fuentes de energía del proceso sean estas renovables y no renovables. Se suele subdividir en dos categorías, la energía de los recursos y la energía de los procesos netos. En la energía de los recursos se cuantifica la cantidad de energía para la producción de raquis y su posterior procesamiento a pulpa de fibra, mientras que la energía de los procesos hace referencia a la cantidad de energía para el procesamiento de la pulpa y su transformación hasta composite. La figura 3.8 nos muestra un desglose por etapas del proceso implementado, en donde se puede visualizar la cantidad de energía empleada por etapa.

**Figura 3.8**

*Demanda de energía acumulada por etapas del proceso propuesto*



Fuente: Software Open LCA

Las etapas de remojo, lavado y tamizado son aquellas que presentan una menor cantidad de energía acumulada (0.65, 0.74 y 1.77 MJ respectivamente), esto es válido debido a que en las etapas de remojo y lavado no se suele emplear energía adicional a la de bombeo para el llenado de los tanques. Mientras que, en la etapa de tamizado, la energía empleada es mínima con el fin de activar el tamiz vibratorio.

En las etapas de secado, triturado, molienda y mezclado, la cantidad de energía acumulada es significativamente mayor por los procesos que conlleva. El secado requiere una cantidad de energía considerable para impulsar el aire seco con ayuda del ventilador y calentarlo por resistencia hasta la temperatura escogida para producir el fenómeno de secado. La energía acumulada en el proceso propuesto para esta etapa fue de 7.76 MJ, esta cantidad considera la energía eléctrica usada y cualquier otra fuente de energía para generar la electricidad. El proceso de triturado presenta una cantidad de energía de 5.18 MJ, porque su mayor requerimiento está en la electricidad necesaria para encender el motor interno que accione las cuchillas. En el proceso de molienda, la energía acumulada llegó a 7.68 MJ, esto es consecuencia de la energía

eléctrica necesaria para accionar el motor rotatorio y el tiempo de uso del equipo. La etapa de mezclado presentó un 5.24 MJ de energía acumulada, en esta etapa se consideró la energía eléctrica para encender el motor, la energía para transportar las materias primas adicional y el tiempo de mezclado.

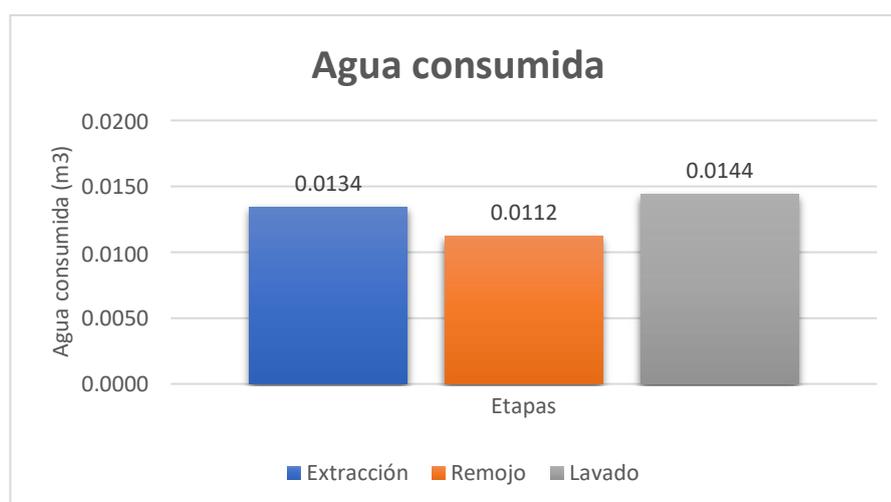
Por último, la etapa de extracción de fibra involucra la recopilación de las energías vinculadas al proceso de producción y extracción de la materia prima principal (raquis de banano), además del tratamiento posterior para la obtención de la pulpa de fibra. La cantidad de energía acumulada en este proceso fue de 3.50 MJ.

### 3.4.1.3 Agua consumida del proceso propuesto.

La categoría de agua consumida presenta de forma cuantitativa los metros cúbicos de agua que se usaron de forma directa en el proceso productivo. En la figura 3.9 se presentan las etapas que poseen un consumo de agua dulce.

**Figura 3.9**

*Agua consumida por etapas del proceso propuesto*



Fuente: Software Open LCA

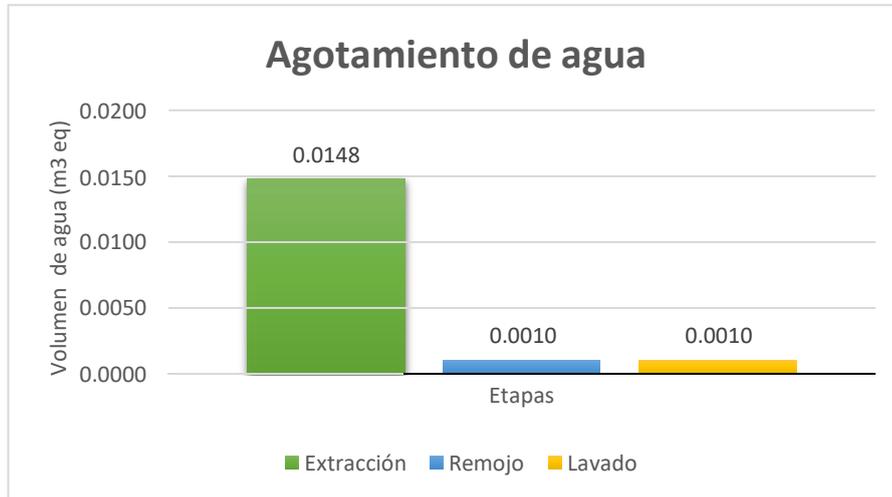
En la etapa de producción y extracción del raquis, el consumo de agua está fuertemente ligado a la fase de plantación e irrigación de los sembríos de banano de donde provienen los residuos de raquis. El volumen de agua usado en esta etapa es de  $0.0134 \text{ m}^3$ . En la etapa de remojo, el volumen de agua necesario fue establecido empíricamente en base a la necesidad de cada ronda, es decir, el volumen de agua requerido era el necesario para que la fibra este completamente sumergida en el agua. El valor empírico obtenido por experimentación fue de  $0.0112 \text{ m}^3$ . En la etapa de lavado, se requirió dos fases simultaneas, el volumen de agua usada en estas fases fue determinado con ayuda de la ecuación 2.2. El resultado para esta etapa fue de  $0.0144 \text{ m}^3$ . Las etapas posteriores no requieren del uso de agua en proporciones significantes, razón por lo cual no se registra en el gráfico.

#### ***3.4.1.4 Agotamiento de agua del proceso propuesto.***

El agotamiento o escasez de agua hace referencia a la forma de reducción desmedida que presencia el recurso en referencia a su cantidad total por causas antropogénicas o de cambio climático. La figura 3.10 presenta los valores aproximados por las tres etapas de uso directo del agua.

**Figura 3.10**

*Agotamiento de agua por etapas del proceso propuesto*



Fuente: Software Open LCA

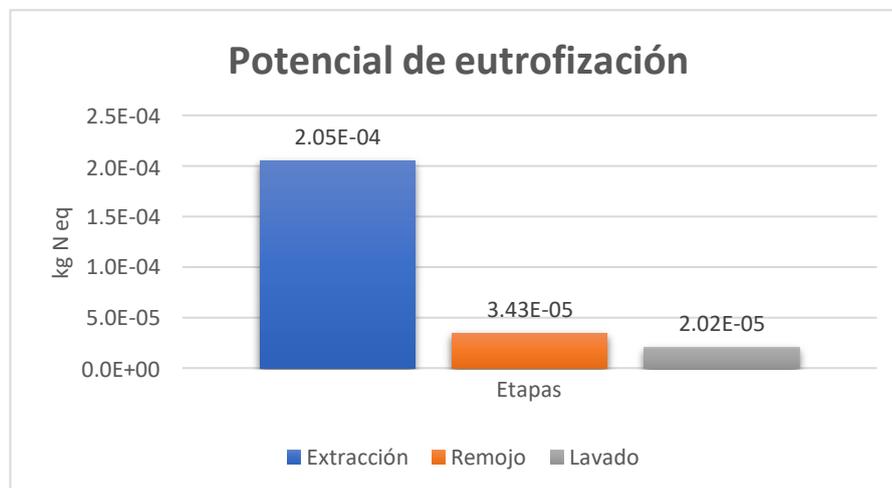
En la etapa de producción y extracción de fibra de raquis el volumen de agua agotada es de 0.0148 m<sup>3</sup> eq, el agotamiento de agua se relaciona a la producción agrícola del banano. Al requerir una cantidad considerable de agua para mantener una plantación se busca que la fuente del recurso sea de fácil extracción y menor costo. La forma clásica de obtención de agua que cumple esas dos características es el bombeo de fuentes subterráneas. Al extraer agua constantemente de estas fuentes de reserva natural se produce un desbalance entre la capacidad del acuífero y el volumen contenido provocando que una reducción del recurso almacenado. Por otra parte, las etapas de remojo y lavado presentan una contribución menor al agotamiento de agua (ambas aproximadamente 0.0010 m<sup>3</sup>) porque su principal causa es la contaminación por residuos sólidos (hilos de fibra) y aumento de concentraciones químicas (nitrato, nitritos, sulfuros, potasio, etc.). El agua utilizada en estas etapas es tratada para la remoción significativa de sus contaminantes por lo cual, una vez depurada, es devuelta a la fuente primaria para su reutilización.

### 3.4.1.5 Potencial de eutrofización del proceso propuesto.

La categoría de potencial de eutrofización abarca el aporte en exceso de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo otorgadas por actividades antropogénicas. En la figura 3.11 se presentan los diferentes potenciales de eutrofización por etapas.

**Figura 3.11**

*Potencial de eutrofización por etapas del proceso propuesto*



Fuente: Software Open LCA

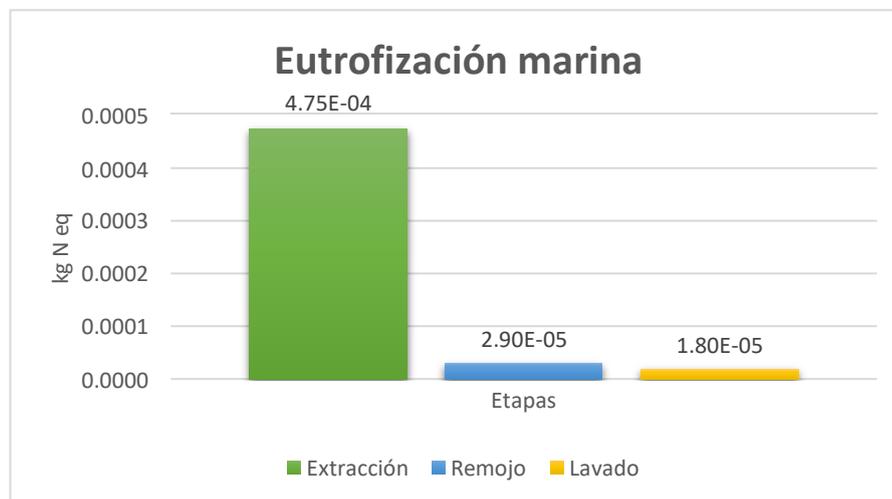
En el proceso planteado las contribuciones provienen principalmente de nitratos y nitritos, teniendo un mayor pico en la fase de extracción ya que esta conglomera la plantación de banano (uso de fertilizantes), irrigación del sembrío (plaguicidas) y producción de residuos orgánicos. En las dos etapas posteriores, el agua de remojo y lavado capturan una cantidad mínima de nitratos y nitritos provenientes de la fibra vegetal ya que estos nutrientes son muy solubles en agua.

### 3.4.1.6 Eutrofización marina del proceso propuesto.

La eutrofización marina hace referencia a la manera que tiene el medio marino para responder frente a una sobrecarga de nutrientes poniendo principal cuidado al nitrógeno. La figura 3.12 muestra las contribuciones por etapa de kg N eq.

**Figura 3.12**

*Eutrofización de marina del proceso propuesto*



Fuente: Software Open LCA

Este parámetro tiene relación con el potencial de eutrofización porque sus causas son similares. En la etapa de extracción se visualiza una contribución mayor que en las etapas de remojo y lavado, esto se da porque las rutas por las cuales se obtiene el nitrógeno en la primera etapa son la aplicación de fertilizante rico en nitrógeno y plaguicidas que se impregnan en el suelo infiltrándose hasta llegar a los acuíferos subterráneos naturales donde se solubilizan y estas corrientes se conectan al mar. En la segunda etapa, las contribuciones son menores porque la cantidad de nitrógeno que se descarga provienen solo de los nitratos y nitritos que presenta la biomasa.

### 3.4.2 ACV del proceso convencional.

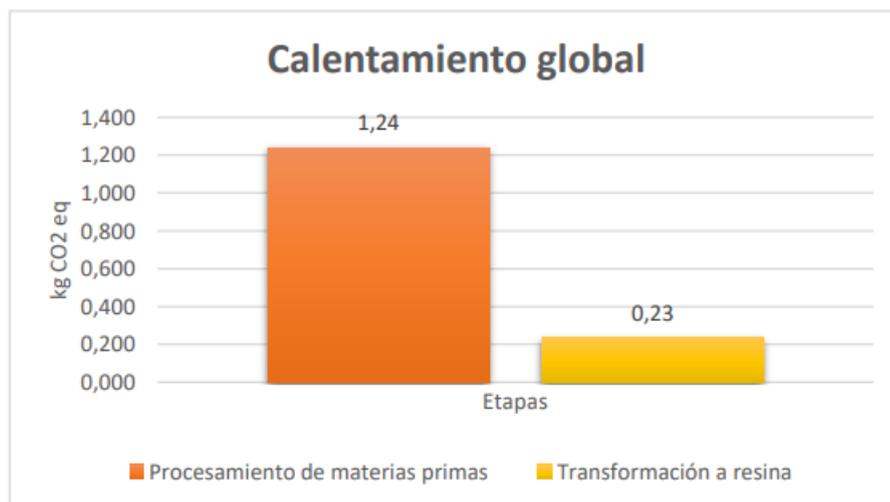
El análisis de ciclo de vida fue realizado para el proceso convencional teniendo como unidad funcional básica 1 kg de resina virgen de polietileno. Las categorías analizadas fueron calentamiento global, demanda acumulada de energía, consumo hídrico y potencial de eutrofización.

#### 3.4.2.1 Calentamiento global del proceso convencional.

Dentro del porcentaje de emisiones atmosféricas, el 99% equivale a CO<sub>2</sub> derivado mientras que el 1% restante son las contribuciones de HCFC y CFC. En la figura 3.13 las contribuciones por etapa al calentamiento global.

**Figura 3.13**

*Calentamiento global por etapas del proceso convencional*



Nota: Datos proporcionales para 1kg de resina virgen

Fuente: Franklin Associates (2022)

En la extracción y procesamiento de la materia prima, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero es aproximadamente 1.24 kg CO<sub>2</sub> eq, este valor está altamente vinculado a los procesos de craqueo

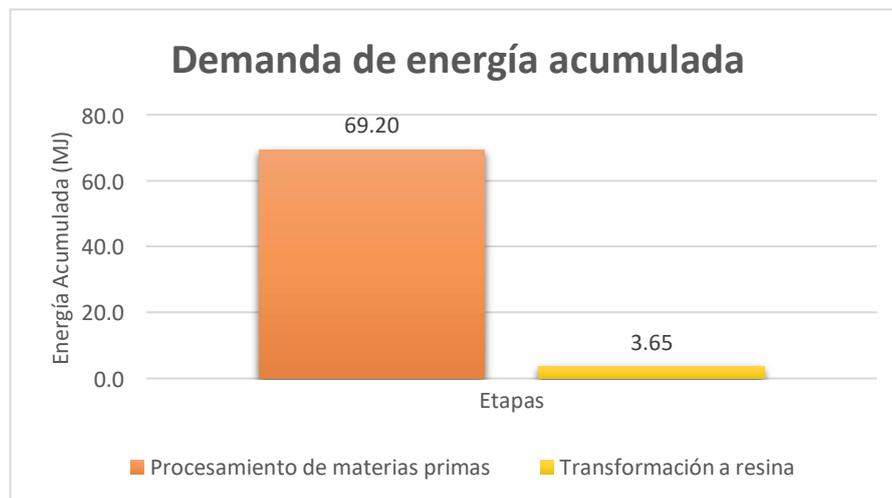
de hidrocarburos y polimerización del etileno, además del impacto que ocasiona el transporte del polietileno a las reservas o plantas productoras. La etapa siguiente presenta una contribución que rodea los 0.23 kg CO<sub>2</sub> eq y se relaciona con los gases que se pueden eliminar en la transformación del polietileno fundido a resina compacta.

### 3.4.2.2 Demanda de energía acumulada del proceso convencional.

En la figura 3.14 se muestra por etapas la demanda de energía acumulada en MJ. En el proceso convencional se debe considerar que en la etapa 1, la energía cuantifica se relaciona a la extracción de petróleo, craqueo de petróleo y transformación de etileno; mientras que la etapa 2 solo es la extrusión y corte del polietileno fundido.

**Figura 3.14**

*Demanda de energía acumulada por etapas del proceso convencional*



Nota: Datos proporcionales para 1kg de resina virgen

Fuente: Franklin Associates (2022)

La primera etapa se conforma de la sumatoria de tres procedimientos interconectados. La extracción de petróleo presenta una demanda energética proviene de las tomas de bombeo y transporte del crudo hacia las refinerías para si posterior tratamiento que nos permitirá

obtener los derivados deseados. El craqueo del hidrocarburo recientemente extraído requiere una alta cantidad de energía calorífica debido que es un proceso sumamente endotérmico. La energía recibida se distribuye en el ablandamiento del crudo, la de reacción química y quema de productos secundarios para recuperación de energía. Dentro del proceso de polimerización, se tiene una descarga considerable de energía gracias a que la reacción es exotérmica. Además de la energía calorífica, el transporte, bombeo y distribución del crudo presentan una exigencia energética de tipo eléctrica (Franklin Associates, 2022). La sumatoria de todos estas estas variables dan como resultado una demanda energética total de 69.20 MJ.

En la segunda etapa, la necesidad energética es principalmente eléctrica para poner en funcionamiento la extrusora y cortadora. Lamínima energía calorífica que se aporta proviene netamente de los servicios de enfriamiento para condensar el polietileno fundido. En esta etapa, el valor energético total es de 3.65 MJ.

#### **3.4.2.3 Agua consumida del proceso convencional.**

El consumo de agua se vincula a los servicios hídricos que aportan directamente al proceso. En la figura 3.15 se visualiza los requerimientos hídricos por etapa.

**Figura 3.15**

*Agua consumida por etapas del proceso convencional*



Nota: Datos proporcionales para 1kg de resina virgen

Fuente: Franklin Associates (2022)

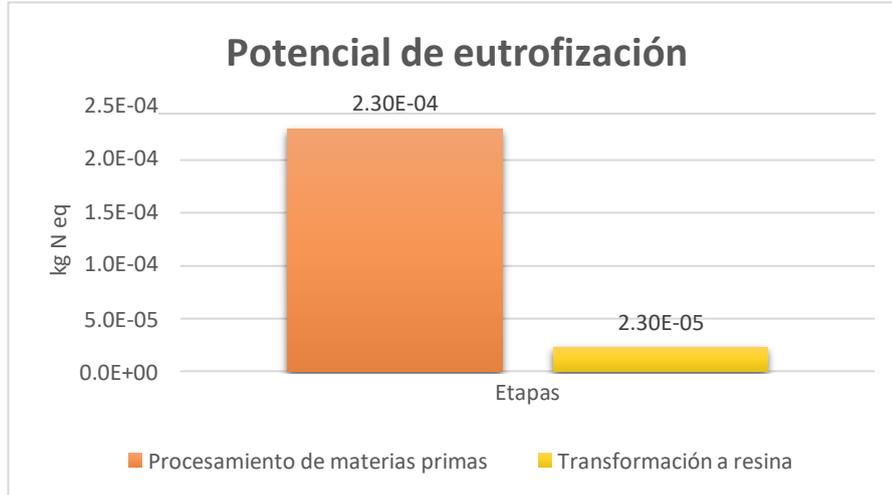
En el procesamiento de materias primas, el consumo de agua presenta un valor de 0.053 m<sup>3</sup> por cada kg de resina. Si bien es cierto dentro de las reacciones que tienen las materias primas para producir el polietileno, no se encuentra como principal factor el agua; esta es utilizada en forma líquida o de vapor por los servicios que mantienen las condiciones térmicas del proceso. De igual manera ocurre en la etapa de transformación de resina donde el consumo de agua es de 0.00021 m<sup>3</sup>

#### **3.4.2.4 Potencial de eutrofización del proceso convencional.**

El exceso de sustancias tóxicas liberadas (nitritos, nitratos y fosfatos) que posteriormente se condensan y caen en el agua puede producir efectos en la proliferación de plantas acuáticas. La figura 3.16 describe la cantidad potencial de eutrofización que se da por etapas.

**Figura 3.16**

*Potencial de eutrofización por etapas del proceso convencional*



Nota: Datos proporcionales para 1kg de resina virgen

Fuente: Franklin Associates (2022)

En el proceso habitual, la mayor contribución al potencial de eutrofización lo tiene el procesamiento de las materias primas. La extracción del crudo proporciona un porcentaje del 75% en las expulsiones de nitratos, nitritos y fosfatos. Mientras que la producción de etileno otorga un 13%. La sumatoria de estas dos subetapas tiene como valor de contribución 0.00023 kg N eq. Por otro lado, la transformación del polietileno a resina se le atribuye un 9% y el 3% restante es de origen indirecto por producción de electricidad. El total por esta etapa y servicio es de 0.000023 kg N eq.

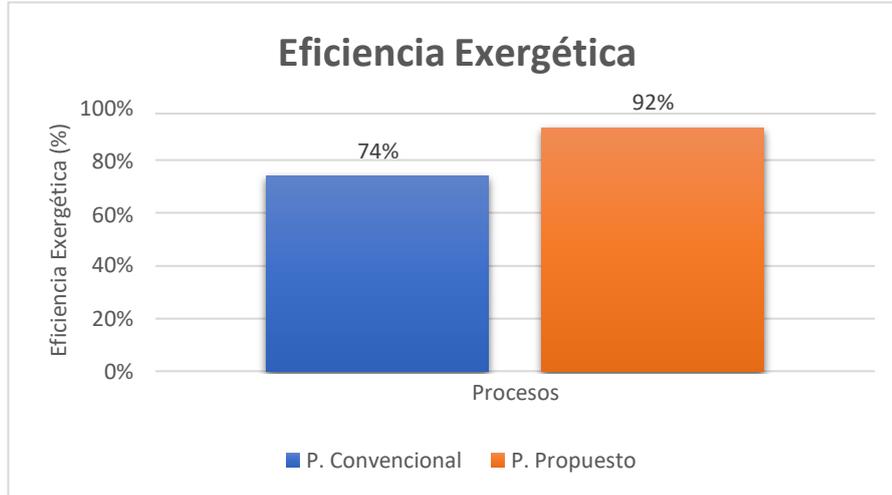
### **3.5 Comparativa entre procesos**

#### **3.5.1 Eficiencia Exergética.**

Las eficiencias exergéticas globales evaluadas en cada uno de los procesos (convencional y propuesto) se presentan de forma visual en la figura 3.17.

**Figura 3.17**

*Eficiencia exergética por proceso*



El sistema convencional presenta tres etapas de las cuales dos poseen una eficiencia exergética menor al 25% y la restante presentan una eficiencia exergética del 95%. Mientras que, en el proceso propuesto las etapas de producción son ocho, de las cuales cuatro presentan una eficiencia exergética mayor al 90%, una etapa posee una eficiencia de 89% y las tres restantes tiene una eficiencia por debajo del 80%.

En términos globales, la eficiencia exergética del procesopropuesto es superior por un 18% a la eficiencia exergética del proceso convencional. Este porcentaje nos permite inferir que en términos de eficiencia exergética, el proceso de fabricación de compounds presenta una ventaja atractiva. Además, si se analiza superficialmente las mejoras que se pueden realizar a ambos métodos se puede determinar empíricamente cual sería más fácil intervenir.

En el proceso implementado, las fases de remojo, lavado y tamizado pueden presentar una alternativa de reciclaje o aprovechamiento de recursos que usen en mayor medida el trabajo útil de las fuentes de energía. Mientras que, en el proceso convencional, las mejoras a

implementarse deben dirigirse al reactor y la extrusora. Sin embargo, se debe considerar que la mayor pérdida de exergía en ambos equipos es por medio de su calor perdido, un parámetro difícil de controlar en un ambiente dinámico que imposibilita hasta cierta medida la ejecución de una mejora para ese aspecto.

### 3.5.2 Exergía Destruida.

Las exergías destruidas globales evaluadas en cada uno de los procesos (convencional y propuesto) se presentan de forma visual en la figura 3.18.

**Figura 3.18**

*Exergía destruida por proceso*



El sistema convencional presenta un valor 1286365.90 kJ/h. Mientras que, en el proceso propuesto la exergía destruida es de 1285712.90 kJ/h. Estos valores representan el trabajo útil desperdiciado a lo largo de los procesos. En contraste, la diferencia exergética entre ambos procesos es de 653 kJ/h, una cantidad significativa que indica la necesidad de un análisis de fuentes de desperdicio energético que

pueden ser minimizadas por medio de mejoras. Además, en términos generales es un valor determinante para descartar la implementación de alguno de los procesos.

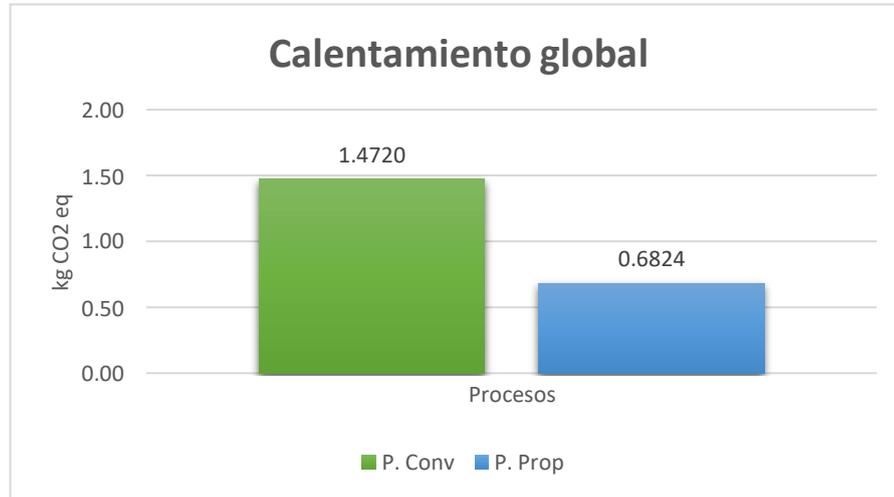
### **3.5.3 Calentamiento Global.**

El calentamiento global es el efecto del incremento de la temperatura del suelo terrestre por acción de la acumulación de gases de efecto invernadero. Estos gases absorben la radiación térmica de la capa terrestre produciendo que la atmosfera se caliente y el calor se retenga en ella. Los procesos industriales de cualquier índole contribuyen a un aumento de la concentración de los gases invernadero tales como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub>. En los procesos de fabricación de resinas plásticas, la materia prima proviene del craqueo de hidrocarburos por lo que las emisiones de los gases descritos son elevadas.

Adicionalmente, los aditivos y solventes utilizados en el proceso de transformación del hidrocarburo a polímero también contribuyen a la formación de estos gases. La figura 3.19 presenta las contribuciones globales de los procesos estudiados siendo 1.4720 kg CO<sub>2</sub> eq para el proceso convencional y 0.6824 kg CO<sub>2</sub> eq para el proceso propuesto.

**Figura 3.19**

*Calentamiento global por proceso*



Nota: Datos obtenidos de Software Open LCA

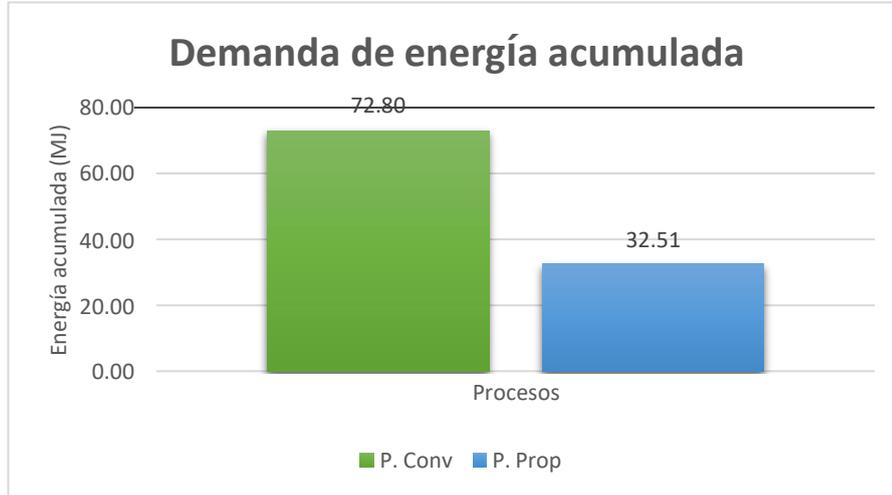
Dentro del proceso convencional se debe considerar que el resultado obtenido proviene de las emisiones de gases para la obtención del etileno proveniente del craqueo, las emisiones por los compuestos orgánicos volátiles (COV) obtenidos en la polimerización y los efluentes contaminantes de residuos (aditivos, disolventes, etc.) Por consiguiente, el desarrollo descrito presenta emisiones significativas en la fase de plantación del banano y mínimamente considerables en los efluentes de residuos orgánicos.

### **3.5.4 Demanda de energía acumulada.**

La demanda de energía acumulada para cada proceso depende de las fuentes en que se obtenga dicha energía y las etapas que se vayan a producir para transformar una materia prima en el producto deseable. Los datos de energía acumulada para ambos procesos se muestran en la figura 3.20, donde también es posible verificar que el proceso propuesto requiere una menor demanda energética.

**Figura 3.20**

*Demanda de la energía acumulada por proceso*



Nota: Datos obtenidos de Software Open LCA

El proceso convencional consta de cuatro etapas que demandan una cantidad significativa de energía por tratarse de la polimerización directa de un hidrocarburo y la implementación de aditivos y solventes. Además, se presenta una demanda energética extra para mantener los sistemas de servicios y reciclado dentro de la planta. Un último aspecto por considerar es la demanda energética de la extrusora que permitirá obtener la resina en forma de pellets para su almacenamiento adecuado.

Por otra parte, el proceso propuesto consta de ocho etapas que requieren una menor demanda energética al involucrar el tratamiento de fibra vegetal. La etapa de la extracción de fibra cuenta con demandas de energía indirectas que proceden de los procesos anteriores, mientras que las etapas de secado, triturado molienda y mezclado tienen su necesidad de energía en la utilización de procesos mecánicos que son menos demandantes en comparación con la generación de polietileno.

### 3.5.5 Agua Usada.

El agua es un recurso clave para cualquier proceso, debido a que es usado como materia prima o corriente de servicio de acuerdo con el procedimiento establecido. En la figura 3.21, se describe la cantidad de agua total consumida por proceso.

**Figura 3.21**

*Agua consumida por proceso*



Nota: Datos obtenidos de Software Open LCA

El proceso convencional de fabricación de resina de polietileno utiliza el agua potable como fuente de servicio para el control de temperatura a lo largo del proceso. Especialmente en el reactor donde se genera una reacción exotérmica y en la extrusora donde es la fuente de enfriamiento del material fundido. El proceso propuesto al utilizar como materia prima un desecho de las plantaciones de banano emplea en la fase de producción de la planta una cantidad significativa de agua, mientras que dentro del proceso la cantidad restante es usada en las fases previas al secado.

### 3.5.6 Potencial de eutrofización.

Las descargas de efluentes con contenido de nitrato o nitritos incrementan el potencial de eutrofización de un reservorio o depósito de agua. En la figura 3.22, se puede visualizar gráficamente el aporte total de cada proceso a este parámetro.

**Figura 3.22**

*Potencial de eutrofización por proceso*



Nota: Datos obtenidos de Software Open LCA

En el proceso convencional, el resultado de dicho potencial rodea los 0.0025 kg N eq, esta cantidad es atribuida a los procesos de extracción y transformación de hidrocarburos, así como el transporte de materia prima. Por otro lado, el proceso propuesto tiene un resultado de 0.002596 kg N eq, los principales contribuyentes a este valor son los fertilizantes y pesticidas en los sembríos de banano, así como los efluentes de agua posterior a las fases remojo y lavado. No obstante, la diferencia de este parámetro entre los procesos expuestos es minúscula por lo que es mínimamente relativo en la elección del proceso.

### 3.5.7 Indicadores económicos.

La tabla 3.10 presenta los indicadores económicos de ambos procesos estudiados.

**Tabla 3.10**

*Indicadores económicos por procesos*

| <b>Proceso</b>      | <b>Precio de producto final</b> | <b>Tiempo de retorno (años)</b> | <b>TIR (%)</b> | <b>VAN (Millones)</b> |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------------|
| <b>Convencional</b> | \$3.00                          | 12                              | 10.29          | 0.04                  |
| <b>Propuesto</b>    | \$2.09                          | 6                               | 28.09          | 16.27                 |

Nota: Datos obtenidos de CapCost

Mediante la comparación de los indicadores económicos tanto del proceso convencional como del proceso propuesto se puede evidenciar que, en relación con el VAN, el proceso propuesto tiene un mejor indicador que el convencional reflejando un valor neto actual de 16,27 millones de dólares, es decir 16,23 más que el proceso condicional. Por otra parte, podemos evidenciar que la TIR es mayor en el proceso propuesto con un 28,09% por lo que se puede concluir que este proceso tiene que 17,8% más que el proceso habitual. Asimismo, el tiempo de recuperación en el proceso ofrecido se reduce a la mitad del tiempo en relación con el proceso habitual.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Se logró caracterizar el proceso propuesto a escala laboratorio partiendo de un contenido de 32.40 kg de raquis para la obtención final de 9.62 kg de compounds siguiendo las proporciones especificadas en literatura para mejorar las propiedades mecánicas.

Para una correcta y profunda comparación entre los indicadores significativos de los procesos estudiados, se realizaron análisis exergéticos y económicos a ambos procesos. Asimismo, se realizó un análisis de ciclo de vida para el proceso propuesto y para el convencional. Mediante el análisis exergético, se encontró que el proceso planteado como alternativa es altamente eficiente exergéticamente con un 92%. Además, en un análisis por etapas se evidenció que para el proceso convencional las fases más deficientes son la polimerización del etileno y la extrusión del polietileno fundido teniendo porcentajes de 23% y 22% respectivamente. Para el proceso propuesto, se observó que las etapas con menor eficiencia exergética son las de cortado, secado y tamizado teniendo porcentajes de 55.13%, 72.22% y 70% respectivamente. Con respecto a los resultados de exergía destruida, las etapas con mayor destrucción exergética son el cortado y secado con 208.30 kW/h y 105.71 kW/h respectivamente. Esto como consecuencia de las diferentes pérdidas presentes en las etapas tales como, desechar la corteza del raquis sin aprovecharla, la expulsión de aire húmedo que aún se encuentra a alta temperatura y la pérdida de potencia por irreversibilidades internas del proceso.

Mediante el análisis económico realizado en el software Capcost se estudia la factibilidad en un lapso de 12 años tanto del proceso

convencional como del proceso propuesto obteniéndose un valor de TIR de 10.29% y 28.09% respectivamente. Estos valores permiten interpretar la información en ambos casos, sin embargo, de forma evidente el proceso propuesto tiene una mayor rentabilidad que se asocia a los costos de equipos, materia prima, costos de manufactura, entre otros.

El precio de los composites es de \$2.04 considerando un incremento del 50% del precio base de los mismos. A diferencia del LLPDE a partir de resina virgen, cuyo costo sería de \$3. Por los indicadores presentados se determina que el proceso propuesto es rentable y capaz de generar un VAN de 16.27 millones de dólares, sin considerar que el mismo tiene salida de producto limpio cómo lo es el bagazo del raquis que podría ser vendido a otras empresas para el desarrollo de nuevos subproductos o cómo una biomasa.

Mediante el análisis de ciclo de vida del proceso propuesto y su comparación con la información literaria del análisis de ciclo de vida del LLDPE se logró obtener los distintos parámetros de interés para el impacto ambiental. El ACV del proceso propuesto permitió mostrar los resultados globales en las categorías de calentamiento global, demanda acumulada de energía, consumo de agua y potencial de eutrofización, siendo estos los valores de 0,6824 kg CO<sub>2</sub> eq, 32,5111 MJ, 0,0389 m<sup>3</sup> y 0,00025962 kg N eq respectivamente. Cabe considerar que este estudio fue realizado para una unidad funcional 1 kg de compounds. Para los resultados del sistema convencional se realizó un cálculo proporcional donde se obtuvieron los valores referenciales para la unidad funcional de 1 kg de resina de LLDPE siendo estos 1,4720 kg CO<sub>2</sub> eq para el calentamiento global, 72,8000 MJ para la demanda acumulada de energía, 0,0078 m<sup>3</sup> para el consumo de agua y 0,00025 kg N eq para el potencial de eutrofización.

Luego de realizar los análisis se puede concluir que el proceso propuesto tiene un impacto positivo a nivel económico por los indicadores obtenidos que son a favor de la rentabilidad del proyecto. Destacan características importantes como menor costo de materia prima, reduce el tiempo de recuperación y aumenta la tasa de retorno. Y un impacto ambiental controlado porque posee bajos índices de contaminación global, eutrofización, etc. Además, brinda oportunidad de considerar constantes mejoras dentro proceso

## **4.2 Recomendaciones**

Para el desarrollo a escala laboratorio, se recomienda el uso de un molino de harina o un molino de polvo en la fase de molienda, con el fin de aprovechar la mayor cantidad posible de fibra procesada.

Se debería analizar los parámetros de fósforo, potasio, sulfuro, nitratos y nitritos en las aguas de ingreso y efluentes de los procesos de remojo y lavado buscando de esta manera cuantificar la remoción de estas sustancias en estas etapas.

A futuro, se propone realizar un estudio sobre tratamiento de desechos orgánicos (bagazo) que permita determinar el mejor escenario donde se puede aprovechar el residuo de la corteza y la fibra no molida de forma responsable y amigable con el medio.

Para estudios posteriores, se recomienda un análisis sobre la reutilización del aire con el fin de buscar una forma óptima para aprovechar el aire húmedo que proviene del secador.

Para el análisis económico, se recomienda considerar todas las variables posibles que permitan acercar el indicador a su valor real entre ellas, los costos del polietileno, costos logísticos, mano de obra, entre otros.

# BIBLIOGRAFÍA

- Ali, S., Bokhari, I., Latif, F., & Rajoka, M. I. (2008). Kinetics of high-level of  $\beta$ -glucosidase production by a 2-deoxyglucose resistant mutant of *humicola laniginosa* in submerged fermentation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 39, 724-733.
- Alsabri, A., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. *Materials Today: Proceedings*, 2245-2251. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574>
- Assis, F. S., Margem, F. M., Cordeiro, T. C., Figueiredo, A. B. H., Braga, F. O., & Monteiro, S. N. (2015). Photoacoustic thermal characterization of banana fibers. *Materials Research*, 18, 240-245. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.368914>
- Azad, T., Torres, H. F., Auad, M. L., Elder, T., & Adamczyk, A. J. (2021). Isolating key reaction energetics and thermodynamic properties during hardwood model lignin pyrolysis. En *Physical Chemistry Chemical Physics*.
- Bhagwat Bhardwaj. (2013). *Manufacturing of Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE)*.
- Blokhin, A. v., Voitkevich, O. v., Kabo, G. J., Paulechka, Y. U., Shishonok, M. v., Kabo, A. G., & Simirsky, V. v. (2011). Thermodynamic properties of plant biomass components. Heat capacity, combustion energy, and gasification equilibria of cellulose. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 56(9), 3523-3531. <https://doi.org/10.1021/je200270t>
- Bonilla Palacios, M. (2016). *Estudio comparativo de aditivos para compuestos poliméricos reforzados con fibra vegetal*. Universidad de Los Andes.
- Carvajal Romero, H. R., Cervantes Alava, A. R., Cuzco Jiménez, V. del C., & Luna Romero, A. E. (2020). *Análisis de tendencia de la exportación de banano (Musa AAA) en el Ecuador, periodo 1995-2020*.
- Corral Santos, S. E., & Barcia Mero, R. A. (2022). *Caracterización de un compuesto de polietileno de baja densidad reforzado con fibra de banano*

*para su uso en extrusión de película soplada.* Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- de Oliveira, G. Q., do Nascimento, R. A., Costa, J. F., Santana, E. B., Costa, C. M. L., & Ribeiro, N. F. da P. (2022). Drying of Banana Pseudo-stem Fibers: Evaluation of Kinetic Models, Effective Diffusivity, Thermodynamic Properties, and Structural Characterization. *Journal of Natural Fibers*, 19(10), 3654-3667. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848717>
- Egbo, M. K. (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. En *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* (Vol. 33, Issue 8, pp. 557-568). King Saud University. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>
- Franklin Associates, A. D. of E. (2022). *Cradcle to gate life cycle analysis of linear low-density polyethylene (LLDPE) resin.*
- García-Ramón, J. A., Carmona-García, R., Valera-Zaragoza, M., Aparicio-Saguilán, A., Bello-Pérez, L. A., Aguirre-Cruz, A., & Alvarez-Ramirez, J. (2021). Morphological, barrier, and mechanical properties of banana starch films reinforced with cellulose nanoparticles from plantain rachis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>
- Gorensek, M. B., Shukre, R., & Chen, C. C. (2019). Development of a Thermophysical Properties Model for Flowsheet Simulation of Biomass Pyrolysis Processes. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(9), 9017-9027. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01278>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. En *Composite Structures* (Vol. 262). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Kabenge, I., Omulo, G., Banadda, N., Seay, J., Zziwa, A., & Kiggundu, N. (2018). Characterization of Banana Peels Wastes as Potential Slow Pyrolysis Feedstock. *Journal of Sustainable Development*, 11(2), 14. <https://doi.org/10.5539/jsd.v11n2p14>

- Kindsvater, R., Munarriz, E., & Sbarbati Nudelman, N. (2019). *Desafíos que presentan algunos aditivos químicos para el reciclado de residuos plásticos*.
- Lerma Montejano, M. (2021). *Caracterización mecánica de Polipropileno reforzado con fibras vegetales, bajo condiciones de servicio a tracción*. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/178627>
- Mary Jasmin, N., Sathish, S., Senthil, T. S., Appala Naidu, B., Daniel Das, A., Arun, K. K., Subbiah, R., & Srinivasan, K. (2022). Investigation on natural fiber reinforced polymer matrix composite. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.094>
- Motaleb, K. Z. M. A., Ahad, A., Laureckiene, G., & Milasius, R. (2021). Innovative banana fiber nonwoven reinforced polymer composites: pre- and post-treatment effects on physical and mechanical properties. *Polymers*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/polym13213744>
- Mudoi, M. P., Sinha, S., & Parthasarthy, V. (2021). Polymer composite material with nettle fiber reinforcement: A review. En *Bioresource Technology Reports* (Vol. 16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100860>
- Paramasivam, S. K., Panneerselvam, D., Sundaram, D., Shiva, K. N., & Subbaraya, U. (2022). Extraction, Characterization and Enzymatic Degumming of Banana Fiber. *Journal of Natural Fibers*, 19(4), 1333-1342. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764456>
- Sarria-Villa, R. A., & Gallo-Corredor, J. A. (2016). La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 8, 21-27.
- Sheng, J., Voldsund, M., & Ertesvåg, I. S. (2023). Advanced exergy analysis of the oil and gas processing plant on an offshore platform: A thermodynamic cycle approach. *Energy Reports*, 9, 820-832. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.021>
- Victory, M., & Tudball, M. (2020, marzo 23). *European Markets for Recycled Materials React in the Face of Coronavirus*.

Vide A. Bejan Advanced Engineering Thermodynamics 2005, pp. 5, 30 - 38

## ANEXOS

### A. Composición elemental de la materia orgánica

| %             | Raquis | Corteza | Fibra  | Fibra<br>remojada* | Fibra<br>lavada* |
|---------------|--------|---------|--------|--------------------|------------------|
| <b>C</b>      | 0,3346 | 0,3565  | 0,3171 | 0,3119             | 0,3052           |
| <b>H</b>      | 0,0644 | 0,0619  | 0,0664 | 0,07               | 0,07             |
| <b>O</b>      | 0,4994 | 0,4594  | 0,5314 | 0,5373             | 0,5448           |
| <b>N</b>      | 0,0080 | 0,0194  | 0,0011 | 1,1E-03            | 1,1E-03          |
| <b>S</b>      | 0,0004 | 0,071   | 0,0567 | 5,5E-02            | 5,4E-02          |
| <b>Ceniza</b> | 0,0932 | 0,0318  | 0,0279 | 0,0275             | 0,0268           |

Nota: \*Los valores fueron calculados considerando la masa de agua ganada en cada etapa.

Fuente: Kabenge et al. (2018)

### B. Composición polimérica de la fibra de banano

| %                   | Fibra  |
|---------------------|--------|
| <b>Celulosa</b>     | 0,7108 |
| <b>Hemicelulosa</b> | 0,1261 |
| <b>Lignina</b>      | 0,0767 |
| <b>Humedad</b>      | 0,0735 |
| <b>Ceniza</b>       | 0,013  |

Fuente: Motaleb et al. (2021)

### C. Datos principales de la fibra de banano

| Datos                                | Valor   |
|--------------------------------------|---------|
| <b>Peso molecular aprox (kg/mol)</b> | 0,1492* |
| <b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>   | 1500    |
| <b>Cp (kJ/kg K)</b>                  | 0,4467  |

Nota: \*El valor fue calculado considerando las composiciones poliméricas y el peso molecular estándar de los compuestos

Fuente: Assis et al. (2015)

**D. Datos energéticos de los componentes poliméricos de la fibra.**

| Polímeros                 | Cp. (J/mol K) *      | Entalpía (J/mol) *  | Entropía (J/mol K) * |
|---------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Celulosa <sup>1</sup>     | -                    | 98,89               | 181                  |
| Hemicelulosa <sup>2</sup> | 1,2489 <sup>2a</sup> | 759,2 <sup>2a</sup> | 250,2 <sup>2b</sup>  |
| Lignina <sup>3</sup>      | 13,22 <sup>3a</sup>  | 729,3 <sup>3a</sup> | 325,4 <sup>3b</sup>  |

Nota: \*Los valores fueron calculados a 25°C

Fuente: Blokhin et al. (2011)<sup>1</sup>, Gorenssek et al. (2019)<sup>2a 3a</sup>, Ali et al. (2008)<sup>2b</sup>, Azad et al. (2021)<sup>3b</sup>

**E. Exergías de fuel y producto por equipos del caso A**

| Equipos   | Exergía fuel                                               | Exergía Producto          |
|-----------|------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Tamiz     | $E_1 + E_6$                                                | $E_2$                     |
| Reactor   | $\left(1 - \left(\frac{T_0}{T_r}\right)\right) (Q_{loss})$ | $E_5 - (E_2 + E_3 + E_4)$ |
| Separador | $E_5$                                                      | $E_6 + E_7$               |
| Extrusora | $Q_p$                                                      | $E_8 + E_9 - E_5$         |

Nota: Las ecuaciones fueron basadas en el proceso utilizado

**F. Exergías de fuel y producto por equipos del caso B**

| Equipos       | Exergía fuel          | Exergía Producto  |
|---------------|-----------------------|-------------------|
| Cortadora     | $W + E_1$             | $E_3$             |
| Tanque Remojo | $E_5 + E_3$           | $E_6$             |
| Tanque Lavado | $W + E_6 + E_8 - E_7$ | $E_9$             |
| Secador       | $W + E_9 + E_{10}$    | $E_{12} + E_{11}$ |
| Trituradora   | $W + E_{12}$          | $E_{13}$          |
| Molino        | $W + E_{13}$          | $E_{14}$          |
| Tamiz         | $W + E_{14}$          | $E_{16}$          |
| Mezcladora    | $W + E_{17} + E_{18}$ | $E_{19}$          |

Nota: Las ecuaciones fueron basadas en el proceso utilizado

**G. Análisis químicos del efluente de agua de remojo y agua de lavado**

| <b>Muestras</b>       | <b>Sulfuros<br/>(mg/L S<sup>-2</sup>)</b> | <b>Potasio<br/>(mg/ L K) *</b> | <b>Nitritos<br/>(mg/L NO<sub>2</sub>)</b> | <b>Nitratos<br/>(mg/L NO<sub>2</sub>)</b> |
|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Agua de remojo</b> | 0.7                                       | -                              | BDL                                       | 20.24                                     |
| <b>Agua de lavado</b> | BDL                                       | -                              | 14.04                                     | 20.24                                     |

Nota: \*La muestra presento interferencias BDL significa bajo el límite detectable

Fuente: Centro de aguas y desarrollo sostenible.

**H. Datos principales del análisis económico**

| <b>Material Name</b>     | <b>Classification</b> | <b>Price (\$/kg)</b> | <b>Flowrate (kg/h)</b> | <b>Annual Cost</b> |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|--------------------|
| <b>Raquis</b>            | Raw Material          | \$ 0,05              | 20041,00               | \$ 8,339,060       |
| <b>Anhídrido maleico</b> | Raw Material          | \$ 0,38              | 296,00                 | \$ 936,059         |
| <b>PE</b>                | Raw Material          | \$ 1,30              | 5536,00                | \$ 59,891,770      |
| <b>Pellet</b>            | Product               | \$ (2,03)            | 5950,00                | \$ (100,517,277)   |
| <b>Bagazo fibra seca</b> | Waste                 | \$ 0,36              | 340,00                 | \$ 1,018,613       |
| <b>Agua</b>              | Raw Material          | \$ 0,00438           | 66804,00               | \$ 2,435,030       |

Fuente: CapCost.