

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN PROCESO DE
BIOREFINERÍA QUE UTILIZA LICUEFACCIÓN
HIDROTÉRMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCRUDO A
PARTIR DE RASTROJO DE PIÑA COMO UN POSIBLE
SUSTITUTO A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES SIGUIENDO
LOS LINEAMIENTOS DE LA NORMA ISO 14044

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN
DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO
FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA

Lucía Ariadna Rodríguez Delgado

TRIBUNAL EXAMINADOR

Análisis del ciclo de vida de un proceso de biorefinería que utiliza licuefacción hidrotérmica para la producción de biocrudo a partir de rastrojo de piña como posible sustituto a los combustibles fósiles siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 14044

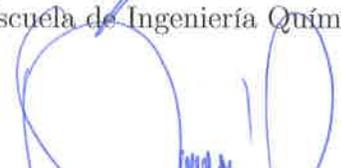
Sustentante: Lucía Ariadna Rodríguez Delgado

Aprobado por:



Mag. Adolfo Ulate Brenes
Escuela de Ingeniería Química

Presidente del Tribunal



Dr. Roberto Quirós Vargas
Profesor Escuela Ingeniería Industrial

Director del Proyecto



Dr. Esteban Durán Herrera
Profesor Escuela Ingeniería Química

Lector del Proyecto



Dra. María José Rodríguez Vásquez
Profesora Escuela Ingeniería de Biosistemas

Lectora del Proyecto



Dra. Cindy Torres Quirós
Profesora Escuela Ingeniería Química

Miembro Invitado

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco infinitamente a Dios por la fortaleza, voluntad y sabiduría para realizar y concluir este proyecto, culminando esta importante etapa de mi vida y recibir con emoción los retos venideros.

A mis padres por ser apoyo, consejo y acompañamiento incondicional, y por abrirme tantas oportunidades con su mayor legado: mis estudios. A mi hermano Carlos Andrés, por ser ejemplo de pasión, ambición y persistencia, además de incontables risas en mi vida.

Al equipo de trabajo de este proyecto, el Dr. Esteban Durán por confiar en mí para desarrollar este proyecto y brindarme siempre una respuesta certera ante mis dudas y consejo en los momentos más pesados de este proceso. Al Dr. Luis Kutz por su incontable apoyo, guía y acompañamiento para la realización de este proyecto. Al Dr. Roberto Quirós, por su entrenamiento y acompañamiento en conocimientos nuevos para mí y tener siempre esa palabra de aliento para continuar en el proceso.

A la Dra. María José Rodríguez, por tener siempre esa disposición de ayudar y acompañarme para concluir este proyecto.

A Daniel y Kimberly por tantos años de amistad incondicional, por escucharme, apoyarme, acompañarme y darme siempre ese empujón para seguir adelante. A Alonso, por su amistad, por su escucha, sus consejos y sus enseñanzas, además de ser guía desde el primer momento.

A María Paula, Susana y Hannia, mis compañeras y grandes amigas que me deja la Universidad, por hacer que mi paso por este centro de estudio y la realización de este proyecto fuera más ameno.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el ciclo de vida de un proceso de biorefinería que utiliza licuefacción hidrotérmica para la producción de biocrudo a partir de rastrojo de piña como posible sustituto a los combustibles fósiles siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 14044. Para ello, se dividió el proyecto en cuatro etapas principales. En primera instancia, se realizó el diseño conceptual del proceso de refinería; se seleccionó un reactor industrial a partir del cual se dimensionó el resto de la planta y, con los datos de cultivo de piña y rendimiento de la reacción de licuefacción hidrotérmica, se determinó la cantidad de biomasa que se debía utilizar. El proceso estudiado se había realizado experimentalmente a escala de laboratorio siguiendo una metodología batch, sin embargo, con el fin de aumentar la productividad del proceso, a escala industrial este se ajustó como un proceso continuo, al cuál también se le asignaron reciclos de corrientes para aprovechar los flujos másicos y energéticos de estos.

Seguidamente, se simuló el proceso propuesto en el programa AspenPlus, introduciendo datos experimentales y teóricos de la composición de la biomasa a procesar y los cuatro principales productos de la reacción: el biocrudo, la fase acuosa, el hidrocarbón y la fase gaseosa. De igual manera, se agregaron especificaciones técnicas de los equipos industriales propuestos. Con la simulación se determinaron los flujos másicos y energéticos de corrientes de calentamiento y enfriamiento, así como el acomodo adecuado de intercambiadores de calor, calentadores y enfriadores dentro del proceso.

Como tercer etapa se realizó un análisis de ciclo de vida del proceso propuesto. Para esto, se generó el inventario del proceso, tomando en cuenta flujos másicos y energéticos de entrada y salida de cada unidad del proceso. Utilizando el software OpenLCA y la base de datos de Ecoinvent 3.6 se llevó a cabo la evaluación de impactos, estudiando cuatro categorías de impacto típicas para producción de biocombustibles: cambio climático, acidificación, eutrofización y toxicidad humana. De este análisis, se concluyó que, para producir 1 kg de biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica de rastrojo de piña, se generan 23,953 kg CO₂ – Eq; 0,12063 kg SO₂ – Eq; 0,00697 kg P₂ – Eq y 7,02068 kg 1,4 – DCB – Eq. Dentro de lo cual, la unidad con mayor impacto, con un 97,95 % de contribución, resultó ser la unidad de calentamiento antes del reactor, debido al requerimiento de la sal térmica de nitratos, cuya producción y almacenamiento acarrearán el mayor impacto. Así mismo, se identificó que el reciclaje de la fase acuosa y el aprovechamiento de calores de flujos en el intercambiador de calor contribuyen positivamente a disminuir los impactos del sistema, pues generan impactos evitados.

Por último, se comparó los resultados obtenidos en este estudio con aquellos reportados por otros autores. Debido a que las cantidades obtenidas en el presente estudio se encuentran en magnitudes similares a las reportadas en estudios de procesos similares, e inclusive en algunos casos con datos menores, se concluye que el proceso planteado es competitivo en términos de ciclo de vida con otros procesos

productivos de biocrudo de referencia.

Se recomienda evaluar el uso de pretratamientos o catalizadores para disminuir la cantidad de energía necesaria en la reacción de LHT, con el fin de disminuir o eliminar el requerimiento de un calentador antes del reactor, pues es la unidad con mayor impacto en el proceso. Así como ampliar el sistema estudiado tomando en cuenta un proceso de refinamiento del biocrudo, con el fin de obtener resultados para la producción completa de combustibles.

Índice

| | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| TRIBUNAL EXAMINADOR | I |
| AGRADECIMIENTOS | III |
| RESUMEN | V |
| 1 Introducción | 1 |
| 2 Marco teórico | 5 |
| 2.1 Situación actual del petróleo | 5 |
| 2.2 Conversión térmica de la materia | 6 |
| 2.3 Licuefacción hidrotérmica | 7 |
| 2.4 Factores que afectan la licuefacción hidrotérmica | 8 |
| 2.4.1 Tipo de biomasa | 8 |
| 2.4.2 Catalizadores | 8 |
| 2.4.3 Solvente | 9 |
| 2.4.4 Carga de sólidos | 9 |
| 2.4.5 Condiciones de reacción (temperatura, presión y tiempo) . . . | 10 |
| 2.4.6 Efecto del pH | 11 |
| 2.5 Composición de la biomasa (biomasa lignocelulósica) | 11 |
| 2.5.1 Lignina | 11 |
| 2.5.2 Celulosa | 12 |
| 2.5.3 Hemicelulosa | 13 |
| 2.5.4 Composición porcentual de diferentes tipos de biomasa | 14 |
| 2.6 Rastrojo de piña como biomasa para la licuefacción hidrotérmica en Costa Rica | 14 |
| 2.7 Licuefacción hidrotérmica de biomasa | 17 |
| 2.7.1 Fase orgánica - biocrudo: | 20 |
| 2.7.2 Fase acuosa: | 20 |
| 2.7.3 Fase sólida: | 20 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.7.4 | Fase gaseosa: | 21 |
| 2.8 | Licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña en Costa Rica | 21 |
| 2.9 | Posibles usos y comercialización de biocrudo en Costa Rica | 24 |
| 2.10 | Análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto | 25 |
| 2.11 | Etapas del análisis del ciclo de vida de un producto | 26 |
| 2.11.1 | Definición de objetivos y alcance | 27 |
| 2.11.2 | Inventario del ciclo de vida | 28 |
| 2.12 | Evaluación del impacto del Ciclo de Vida | 30 |
| 2.12.1 | Interpretación de resultados | 33 |
| 2.13 | Softwares utilizados para la evaluación del impacto del ciclo de vida | 34 |
| 2.14 | Métodos de evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida | 36 |
| 2.15 | Análisis del ciclo de vida de biocrudos | 40 |
| 2.16 | Economía circular del rastrojo de piña en Costa Rica | 43 |
| 3 | Simulación y diseño conceptual de la biorefinería para producir biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica | 45 |
| 3.1 | Estudio de mercado de la producción de piña en Costa Rica | 45 |
| 3.2 | Ubicación de la planta según disponibilidad de materia prima | 46 |
| 3.3 | Generalidades de la simulación del proceso | 48 |
| 3.4 | Introducción de compuestos y propiedades al programa | 48 |
| 3.5 | Planteamiento del proceso de producción del biocrudo mediante la simulación | 53 |
| 3.5.1 | Recolección del rastrojo de piña | 55 |
| 3.5.2 | Pretratamiento de la biomasa (Lavado y disminución de tamaño del rastrojo de piña) | 56 |
| 3.5.3 | Conservación y almacenamiento de la biomasa | 56 |
| 3.5.4 | Transporte de la biomasa de la estación de almacenamiento hacia el extrusor | 56 |
| 3.5.5 | Mezclado y extrusión de los reactivos (biomasa y agua) | 57 |
| 3.5.6 | Presurización de los reactivos (biomasa y agua) | 57 |
| 3.5.7 | Pre calentamiento del lodo biomásico (biomasa y agua) | 57 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5.8 | Calentamiento de los reactivos (biomasa y agua) | 60 |
| 3.5.9 | Sistema de reacción LHT | 61 |
| 3.5.10 | Enfriamiento del producto de reacción | 63 |
| 3.5.11 | Separación de la fase sólida | 63 |
| 3.5.12 | Despresurización del producto de reacción | 63 |
| 3.5.13 | Separación trifásica de la fase líquida (acuosa y orgánica) y gaseosa del producto de reacción | 64 |
| 3.5.14 | Recirculación de la fase acuosa | 64 |
| 3.5.15 | Posible mejoramiento del biocrudo | 64 |
| 4 | Dimensionamiento de los equipos de la biorefinería para producir biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica | 67 |
| 4.1 | Determinación de la cantidad de biomasa a procesar | 67 |
| 4.1.1 | Sistema de reacción LHT y factor de capacidad de la planta | 67 |
| 4.1.2 | Cultivo de piña | 69 |
| 4.2 | Dimensionamiento y especificaciones de equipos de la planta de pro- ducción | 70 |
| 4.2.1 | Pretratamiento de la biomasa (Lavado y disminución de ta- maño del rastrojo de piña) | 70 |
| 4.2.2 | Transporte de la biomasa de la estación de almacenamiento hacia el extrusor | 73 |
| 4.2.3 | Mezclado y extrusión de los reactivos (biomasa y agua) | 74 |
| 4.2.4 | Presurización de los reactivos (biomasa y agua) | 75 |
| 4.2.5 | Precalentamiento de los reactivos (biomasa y agua) | 76 |
| 4.2.6 | Calentamiento de los reactivos (biomasa y agua) | 77 |
| 4.2.7 | Enfriamiento del producto de reacción | 78 |
| 4.2.8 | Separación de la fase sólida | 78 |
| 4.2.9 | Despresurización del producto de reacción | 79 |
| 4.2.10 | Separación trifásica de la fase líquida (acuosa y orgánica) y gaseosa del producto de reacción | 80 |

| | |
|--|------------|
| 5 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOCRUDO | 83 |
| 5.1 Definición del objetivo y alcance del estudio | 83 |
| 5.2 Análisis de inventario del estudio | 84 |
| 5.3 Evaluación de impactos | 94 |
| 5.4 Fase de interpretación | 95 |
| 5.5 Comparación en términos del ciclo de vida de proceso de producción de biocrudo | 99 |
| 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 103 |
| 6.1 Conclusiones | 103 |
| 6.2 Recomendaciones | 104 |
| NOMENCLATURA | 105 |
| BIBLIOGRAFÍA | 107 |
| APÉNDICES | 123 |
| A DATOS EXPERIMENTALES | 123 |
| B RESULTADOS INTERMEDIOS | 127 |
| C MUESTRA DE CÁLCULO | 131 |
| ANEXOS | 137 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 2.1 Catalizadores utilizados en la licuefacción hidrotérmica y sus condiciones de reacción (Castro Vega, 2011). | 9 |
| Cuadro 2.2 Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa para distintos tipos de biomasa (Hassan <i>et al.</i> , 2018); (Pandey <i>et al.</i> , 2015a); (Herrera <i>et al.</i> , 2009). | 14 |
| Cuadro 2.4 Resumen de algunos softwares utilizados para la evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida de un producto. | 34 |
| Cuadro 2.5 Resumen de estudios de análisis de ciclos de vida para biocrudos y sus resultados. | 41 |
| Cuadro 3.1 Datos relacionados a la biomasa de rastrojo de piña introducidos en el simulador Aspen Plus (Ulate Sancho, 2020), (Mansor <i>et al.</i> , 2018), (Vargas <i>et al.</i> , 2019), (Quesada Solís <i>et al.</i> , 2005), (Mata Monge, 2019). | 49 |
| Cuadro 3.2 Datos relacionados al sólido “ <i>hydrochar</i> ” obtenido de la LHT de rastrojo de piña introducidos en el simulador Aspen Plus (Ulate Sancho, 2020), (Mathanker <i>et al.</i> , 2020). | 50 |
| Cuadro 3.3 Moléculas con mayor presencia en el biocrudo de LHT de rastrojo de piña Ulate Sancho (2020). | 51 |
| Cuadro 3.4 Compuestos presentes en la fase acuosa resultante del proceso LHT y su composición (Watson <i>et al.</i> , 2020), (Madsen <i>et al.</i> , 2016), (Madsen <i>et al.</i> , 2017), (Villadsen <i>et al.</i> , 2012) | 52 |
| Cuadro 3.5 Compuestos presentes en la fase gaseosa resultante del proceso LHT y su porcentaje de composición (Cao <i>et al.</i> , 2017). | 52 |
| Cuadro 3.6 Resumen de las condiciones de la reacción LHT a escala de laboratorio basada en (Ulate Sancho, 2020). | 53 |
| Cuadro 3.7 Valores de flujos, temperaturas, calores específicos y capacidades caloríficas de las corrientes frías y calientes tomadas en consideración para el análisis del pellizco. | 58 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Cuadro 3.8 | Valores de temperaturas, temperaturas ajustadas y capacidades caloríficas de las corrientes frías y calientes para el análisis del pellizco, para un ΔT_{min} de 10 °C. | 58 |
| Cuadro 3.9 | Valores de temperaturas y capacidades caloríficas de las corrientes frías y calientes analizadas abajo del pellizco para el cálculo de las demandas de calor de estas, para un ΔT_{min} de 20 °C. | 60 |
| Cuadro 3.10 | Datos relacionados a la utilidad de sal térmica de nitrato introducidos en el simulador Aspen Plus (Bonk y Bauer, 2021), (Bauer <i>et al.</i> , 2013). | 61 |
| Cuadro 3.11 | Valores de rendimientos del reactor introducidos en el simulador Aspen Plus, según la ecuación de rendimiento. | 62 |
| Cuadro 3.12 | Valores de rendimientos de cada compuesto obtenido en la reacción introducidos en el simulador Aspen Plus, en base másica. | 62 |
| Cuadro 3.12 | Continuación. Valores de rendimientos de cada compuesto obtenido en la reacción introducidos en el simulador Aspen Plus, en base másica. | 63 |
| Cuadro 3.13 | Porcentaje de rendimiento másico de gasolina y diésel obtenidos por una simulación de destilación para distintos tipos de biocrudo hidrotratados (Castello <i>et al.</i> , 2019). | 65 |
| Cuadro 3.14 | Resumen de la oferta de gasolina o diesel que se podría obtener de la planta respecto a la oferta interna nacional de estos (SEPSE, 2019). | 66 |
| Cuadro 4.1 | Datos relacionados al reactor PFR para la LHT escogido (R-101) (AmAr Equipment, 2021), (SUNKAIER, sf). | 68 |
| Cuadro 4.2 | Resumen de las cantidades de biomasa procesada contra la cantidad de biocrudo producido en la planta propuesta. | 68 |
| Cuadro 4.3 | Índice estacional de la oferta, reportada en toneladas métricas, de piña mediana en Costa Rica (CENADA, 2021). | 69 |
| Cuadro 4.4 | Datos relacionados a la lavadora (O-101) de biomasa escogida (Maurer Gep Kft, 2021). | 70 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Cuadro 4.5 | Datos relacionados a la picadora de biomasa escogida (Q-101) (Penagos, 2021). | 72 |
| Cuadro 4.6 | Datos relacionados a la banda transportadora de biomasa escogida (M-101) (FORECH India Private Limited, sf). | 74 |
| Cuadro 4.7 | Datos relacionados al extrusor de reactivos escogido (W-101) (Coperion, 2021). | 75 |
| Cuadro 4.8 | Datos relacionados a la bomba para presurizar la corriente de reactivos escogida (P-101) (PCM, 2021b), (PCM, 2021a). | 76 |
| Cuadro 4.9 | Datos relacionados al intercambiador de calor para precalentar la corriente de reactivos y enfriar la corriente de productos escogido (I-101) (Sigma Thermal, 2021). | 77 |
| Cuadro 4.10 | Datos relacionados al calentador para calentar la corriente de reactivos escogido (H-101) (Sigma Thermal, 2021). | 78 |
| Cuadro 4.11 | Datos relacionados al enfriador para enfriar la corriente de productos escogido (E-101) (Sigma Thermal, 2021). | 78 |
| Cuadro 4.12 | Datos relacionados al filtro de sólidos para separar el hydrochar del producto de reacción (F-101) (Forsta Filters Incorporation, 2021). | 79 |
| Cuadro 4.13 | Datos relacionados al separador trifásico escogido (Luoyang Runcheng Petrochemical Equipment, 2021). | 80 |
| Cuadro 5.1 | Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo. | 85 |
| Cuadro 5.2 | Composiciones de las corrientes mixtas incluidas en el inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la sección del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo. | 89 |
| Cuadro 5.3 | Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la producción base de 1 kg de biocrudo. | 93 |
| Cuadro 5.4 | Resultados del análisis del inventario del proceso de licuefacción hidrotérmica, según OpenLCA. | 96 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Cuadro 5.5 | Composición principal de los impactos provenientes de la sal térmica de nitratos, según OpenLCA y Ecoinvent 3.6. | 97 |
| Cuadro 5.6 | Resultados de otros estudios de análisis de ciclo de vida para la comparación del presente estudio. | 100 |
| Cuadro A.1 | Datos de humedad, cantidad de rastrojo de piña y rendi- miento del proceso de LHT para el cálculo de la cantidad de biocrudo a producir en la planta. | 123 |
| Cuadro A.2 | Datos masas de reactivos y productos de la reacción de li- quefacción hidrotérmica experimental para el cálculo del rendimiento del reactor introducido al simulador Aspen Plus. | 123 |
| Cuadro A.3 | Datos de calor de combustión y oferta interna nacional en TJ/año de gasolina y diesel para el cálculo de la oferta interna en ton/año (RECOPE, sf), (SEPSE, 2019). | 123 |
| Cuadro A.4 | Datos de las corrientes auxiliares utilizadas por el calentador y los enfriadores. | 124 |
| Cuadro A.5 | Flujos másicos y condiciones físicas de los compuestos intro- ducidos en la simulación de Aspen Plus. | 124 |
| Cuadro B.1 | Flujos másicos y energéticos de las corrientes de entrada y salida de cada unidad funcional del proceso. | 127 |

Índice de figuras

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 2.1 | Proyección de la producción de petróleo de esquisto en Estados Unidos en millones de barriles por día a través de los años (EIA, 2019). | 6 |
| Figura 2.2 | Consumo de energía por sector (a) y por fuente (b) en BTU a través de los años (EIA, 2019). | 6 |
| Figura 2.3 | Estructura de alcohol coniferílico (izquierda), sinapílico (centro) y p-cumarílico (derecha) (Elumalai y Pan, 2011). | 12 |
| Figura 2.4 | Estructura parcial de la celulosa (Elumalai y Pan, 2011). . . | 13 |
| Figura 2.5 | Estructura parcial de la hemicelulosa (Elumalai y Pan, 2011). . . | 13 |
| Figura 2.6 | Distribución de la extensión sembrada en hectáreas de piña en las principales regiones productoras en Costa Rica para el año 2018 a partir de los datos de (Christian <i>et al.</i> , 2020). | 16 |
| Figura 2.7 | Esquema de reacciones que puede sufrir la lignina en un proceso de licuefacción hidrotérmica (Castro Vega, 2011). | 18 |
| Figura 2.8 | Esquema de reacciones que puede sufrir la celulosa en un proceso de licuefacción hidrotérmica (Castro Vega, 2011). | 19 |
| Figura 2.9 | Proceso de separación experimental del biocrudo elaborado en la Universidad de Costa Rica (Ulate Sancho, 2020). | 23 |
| Figura 2.10 | Balance Energético de Costa Rica durante el 2019 (valores en TJ) (SEPSE, 2019). | 25 |
| Figura 2.11 | Relación entre las etapas de estudio del Análisis de Ciclo de Vida (Rodríguez, 2003). | 26 |
| Figura 2.12 | Diversos alcances del análisis del ciclo de vida de un producto según los límites del sistema en estudio, según lo indicado en la Norma ISO 14040:2006. | 28 |
| Figura 2.13 | Metodología de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, con relaciones entre ejemplos de impactos de efectos intermedios “mid-points” y efectos últimos “endpoints” (Antón Vallejo, 2004). | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.14 Diagrama del modelo de sistemas productivos utilizando como base la economía circular (Balboa y Somonte, 2014). | 44 |
| Figura 3.15 Distribución cantonal de plantaciones de piña en la Región Huetar Norte de Costa Rica para el año 2018 (Christian <i>et al.</i> , 2020). 46 | 46 |
| Figura 3.16 Hectáreas cultivadas en los principales distritos productores de piña en la Región Huetar Norte de Costa Rica para el año 2018 (Christian <i>et al.</i> , 2020). | 47 |
| Figura 3.17 Ubicación geográfica de los distritos en estudio de la Región Huetar Norte. | 48 |
| Figura 3.18 Etapas generales del proceso de producción de biocrudo via LHT propuesto. | 53 |
| Figura 3.19 Proceso de producción de biocrudo via LHT propuesto. | 54 |
| Figura 3.20 Simulación del proceso LHT de rastrojo de piña en el programa Aspen Plus con recirculación de todos los componentes de la fase acuosa. | 55 |
| Figura 3.21 Diagrama de intervalos de temperatura para el diseño de la red de intercambiadores de calor, para un ΔT_{min} de 10 °C. | 59 |
| Figura 3.22 Diagrama en cascada para el diseño de la red de intercambiadores de calor, para un ΔT_{min} de 20 °C. | 59 |
| Figura 3.23 Cumplimiento de la diferencia de temperaturas en los extremos del intercambiador de calor colocado abajo del pellizco, para un ΔT_{min} de 10 °C. | 60 |
| Figura 4.24 Lavadora de vegetales propuesta para el proceso de acondicionamiento del rastrojo de piña (Maurer Gep Kft, 2021). | 71 |
| Figura 4.25 Picadora propuesta para el proceso de cortado del rastrojo de piña (Penagos, 2021). | 72 |
| Figura 4.26 Diagrama Gantt propuesto para los procesos de lavado y cortado del rastrojo de piña. | 73 |
| Figura 4.27 Banda transportadora propuesta para el proceso de transporte del rastrojo de piña (FORECH India Private Limited, sf). | 73 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.28 Extrusor propuesto para el procesamiento de la biomasa en la planta de producción de biocrudo (Coperion, 2021). | 75 |
| Figura 4.29 Bomba de tornillo propuesta para presurizar los reactivos hacia el calentador (PCM, 2021b). | 76 |
| Figura 4.30 Intercambiador de calor propuesto para calentar los reactivos previo al reactor (Sigma Thermal, 2021). | 77 |
| Figura 4.31 Filtro de sólidos propuesto para separar el hydrochar del producto de reacción (Forsta Filters Incorporation, 2021). | 79 |
| Figura 4.32 Válvula reductora de presión (modelo 720) propuesta para regular la presión de los productos a la salida del reactor (V-101) (BERMAD, 2021). | 80 |
| Figura 4.33 Separador trifásico propuesto para dividir las fases acuosa, orgánica (biocrudo) y gaseosa provenientes del sistema de reacción de LHT (S-101) (Luoyang Runcheng Petrochemical Equipment, 2021). | 81 |
| Figura 5.34 Límites del sistema en estudio propuestos para el análisis de ciclo de vida. | 83 |
| Figura 5.35 Flujos netos de entrada y salida a la planta de producción de biocrudo a partir de LHT. | 92 |
| Figura 5.36 Diagrama de cajas con los resultados del análisis del inventario del proceso de licuefacción hidrotérmica. | 95 |
| Figura 11.37 Flujos másicos de las corrientes de entrada y salida y requerimientos energéticos de cada unidad funcional del proceso industrial. | 138 |
| Figura 11.38 Diagrama de flujo de proceso para de producción de biocrudo a partir de licuefacción hidrotérmica. | 139 |

1. Introducción

Existe en la actualidad una creciente preocupación respecto a la obtención y demanda de los combustibles fósiles. Principalmente debido a la inevitable escasez que presentarán las fuentes de las cuales se obtienen y el interés colectivo por disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y evitar que la temperatura media del planeta aumente en 2 °C, según lo estipulado en el Acuerdo de París (Xiu y Shahbazi, 2012), (Ramírez *et al.*, 2015). Estos combustibles fósiles se obtienen por medio de procesos como la perforación de pozos y la fractura hidráulica (fracking), los cuales resultan altamente dañinos para el ambiente, ya que en los procesos de exploración, extracción, traslado y bombeo, los químicos se pueden filtrar en el suelo y contaminar mantos acuíferos utilizados por seres humanos, animales y plantas; además, se produce la emisión de gases de efecto invernadero y se puede llegar a inducir sismicidad (Jackson *et al.*, 2014), (Azqueta Oyarzún y Delacámara, 2008), (Quemada y González, 2011).

Entre las principales desventajas de los combustibles fósiles es la alta cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que producen a lo largo de su proceso productivo y consumo (Fernandez y Jusmet, 2010). En su estudio, Capellán Pérez *et al.* (2014) estimaron que el uso de crudo extraído de manera convencional emite 3,10 t CO₂/t diésel; Sathre (2014) indica que, en veinte años, las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ provenientes de ciclo de vida de combustibles fósiles contribuirán en un 41,4%; 0,2% y 58,5%, respectivamente, al calor acumulado del planeta; por último, se estima que las emisiones de metano provenientes de combustibles fósiles corresponden (177 ± 37) t CH₄/año en el periodo del 2003 al 2012 (Hmiel *et al.*, 2020), (Saunois *et al.*, 2016).

Debido a lo anterior, surge la necesidad de poder producir combustibles a partir de fuentes alternas. Una posible solución a este problema se plantea por medio de la licuefacción hidrotérmica. Este proceso consiste en producir biocrudo similar al derivado de petróleo, con mayor viscosidad y menor cantidad de oxígeno, el cual puede llegar a ser un combustible de transporte (Muppaneni, 2015). Este proceso se basa en colocar biomasa y agua (comúnmente) en un reactor a temperaturas y

presiones elevadas (alrededor de 300 °C y 15 MPa), por un tiempo reducido (Gollakota *et al.*, 2018). Entre las principales ventajas que posee este método es la amplia gama de biomásas que se pueden utilizar, pues la humedad presente no resulta problemática, a diferencia de procesos como la gasificación (Castro Vega, 2011). Por otro lado, cabe destacar que los productos obtenidos se pueden tratar para llegar a ser combustibles con propiedades similares a los que se utilizan hoy en día. O bien, se pueden combinar con combustibles tradicionales sin generar cambios significativos en el funcionamiento del motor, lo cual brinda seguridad al consumidor y evita tener que realizar un gasto considerable de dinero en la flotilla de transporte actual (Ramírez *et al.*, 2015).

Por otro lado, en Costa Rica la producción de piña es una de las principales actividades económicas; para el 2019 se cosecharon alrededor de 40 000 hectáreas de piña; lo que resulta en una equivalencia de 10 millones toneladas de rastrojo de piña (FAO, 2020). El rastrojo de piña (desecho del cultivo de piña que corresponde a tallos, hojas y raíces) constituye un riesgo pues, debido a que se genera en grandes cantidades y se degrada lentamente en condiciones naturales, puede aumentar la cantidad de moscas de establo y afectar la productividad del ganado (González Alfaro, 2012). Actualmente, en Costa Rica, los desechos de la piña no se reutilizan en otros procesos y para disponer de estos se suele quemar el rastrojo con algún herbicida (Paraquat) o fuego; y, en algunos casos, se descompone la biomasa con ayuda de microorganismos y se reincorpora al suelo; dicha práctica es económicamente más costosa y solo un 40 % de los productores la utilizan (Chacón *et al.*, 2018).

Prácticas como la quema química de residuos pueden llegar a ser altamente perjudiciales para el medio ambiente en términos de gases de efecto invernadero y desgaste del suelo (CCA, 2014). Debido a esto, el presente proyecto plantea un proceso de producción de biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica, utilizando el rastrojo de la piña como materia prima, brindándole una posible fuente de aprovechamiento a este desecho. Esto podría resultar beneficioso no sólo para la producción de fuentes de energía como el biocrudo, sino para la reducción de los residuos agrícolas y su impacto ambiental. Así como proporcionar un enfoque de economía circular a una industria tan importante como lo es la producción de piña en el país.

El presente proyecto se encuentra dentro del marco global de una investigación de la Universidad de Costa Rica, respecto a la “Producción y caracterización de biocrudos obtenidos mediante licuefacción hidrotérmica (LHT) de biomásas disponibles en Costa Rica”. Dentro de este estudio principal, Ulate Sancho (2020) evaluó, a nivel de laboratorio, diferentes condiciones de experimentación de la licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña para la obtención de biocrudo. Se analizó el efecto que tenían las variables de tiempo, temperatura y ciclos de extracción sólido - líquido sobre el rendimiento de biocrudo respecto a la masa inicial, obteniendo rendimientos de hasta 43,4 %.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que todos los productos tienen asociado un ciclo de vida, este se entiende como la serie de etapas que engloban la producción y vida útil de este, desde la adquisición de materia prima hasta la disposición final del producto generado (ISO, 2006). Por su parte, un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un estudio que brinda una estimación de los impactos ambientales totales producidos por un sistema de producción. A su vez, si se realiza una modificación teórica en algún punto del sistema de producción, el ACV identifica en qué etapa y con qué magnitud varían los impactos producidos. Entre las principales ventajas que ofrece un ACV, es que permite desarrollar procesos y productos más sostenibles con el ambiente. Lo cual incluye planificar el proceso de producción de manera más premeditada. Por ejemplo, buscar distintos proveedores, fuentes energéticas, rutas, medios de transporte y demás, en caso de ser necesario; redirigir las actividades de investigación hacia los problemas cuyos impactos se quieren reducir de forma prioritaria.

El ACV también permite dar declaraciones ambientales respecto a un producto determinado, lo cual puede brindar estrategias de marketing para una empresa. Lo anterior debido a que existe una elevada tendencia a que los consumidores quieran conocer cuál es el producto menos nocivo para el ambiente, además de que le daría cierto renombre a la empresa (Colón y Arena, 2016). Cabe resaltar que este tipo de análisis no ha sido ampliamente estudiado para la temática de producción de biocrudo utilizando licuefacción hidrotérmica en países en desarrollo. En su mayoría, los análisis de ciclo de vida que se han hecho tratan técnicas como la pirolisis rápida

(Fan *et al.*, 2011), o bien, si se analiza una licuefacción hidrotérmica, se utilizan algas como materia prima; por lo que no existen muchos estudios de análisis de ciclo de vida con biomásas lignocelulósicas o residuos agroindustriales (Adams *et al.*, 2018), (Bennion *et al.*, 2015), (Hsu, 2012), (Frank *et al.*, 2013).

En este trabajo se retoman los estudios realizados a nivel nacional en la producción de biocrudo mediante la licuefacción hidrotérmica. El objetivo principal del presente proyecto es analizar el ciclo de vida de un proceso de biorefinería que utiliza licuefacción hidrotérmica para la producción de biocrudo a partir de rastrojo de piña como posible sustituto a los combustibles fósiles siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 14044. Para lo anterior, se utilizarán los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Química en términos de diseño de procesos, reacciones y reactores químicos. Se pondrán en práctica los conceptos referidos al medio ambiente y energías renovables estudiados en la carrera, buscando alternativas de obtención de combustibles ante un problema global como lo son los combustibles fósiles.

Para el cumplimiento de objetivos específicos, el proyecto se puede dividir en cuatro etapas principales. La primer etapa consiste en un diseño conceptual de las operaciones requeridas en la planta de producción del biocrudo. Seguidamente, se plantea una simulación de proceso de una planta de licuefacción hidrotérmica. La tercer consiste en realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso, con el fin de determinar el efecto de este sobre el medio ambiente. Por último, se pretende comparar los datos obtenidos en este estudio con los datos reportados por otras investigaciones, con el fin de evaluar su impacto ambiental en contraste con otros métodos de obtención de biocrudo u otras biomásas.

2. Marco teórico

En el campo de generación de energías renovables y conversión termoquímica, la licuefacción hidrotérmica ha desarrollado un importante interés como una alternativa al procedimiento común de obtención de combustibles. Por su parte, los análisis de ciclo de vida se presentan como una herramienta útil para estimar el impacto ambiental de un sistema productivo, como por ejemplo, la producción de biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica. A continuación, se presenta un marco teórico referente al proceso de licuefacción hidrotérmica y análisis de ciclo de vida.

2.1. Situación actual del petróleo

Un proceso altamente utilizado para la extracción de combustibles fósiles, como el petróleo, es la fractura hidráulica, también conocida como fracking; la cual consiste en cavar hoyos en la tierra, extraer los hidrocarburos atrapados en rocas inyectando grandes cantidades de agua, arena y químicos, y sellar los hoyos con esta misma mezcla. Sin embargo, este proceso se considera altamente dañino para el ambiente; entre los principales efectos que acarrea este proceso se pueden mencionar: la filtración de químicos en el suelo, lo que induce la contaminación de mantos acuíferos; la producción de gases de efecto invernadero y la posibilidad de inducir sismicidad (Jackson *et al.*, 2014), (Azqueta Oyarzún y Delacámara, 2008), (Quemada y González, 2011).

Por otro lado, según una proyección de la (EIA, 2019), la producción de petróleo de esquisto (obtenido por fracking) en Estados Unidos llegará a un pico máximo en el 2021 y, luego de alcanzado este punto, se tendrá un descenso paulatino de este producto, tal como se muestra en la Figura 2.1.

A pesar de lo anterior, se estima que el consumo de energía para transporte y de petróleo se mantengan con altos niveles de demanda. En la Figura 2.2, se aprecia un descenso en la demanda de transporte entre los años 2020 y 2040, la cual se debe a avances tecnológicos y la producción de vehículos más livianos, sin embargo, se aprecia que la proyección en la demanda vuelve a aumentar debido al crecimiento de viajes (EIA, 2019).

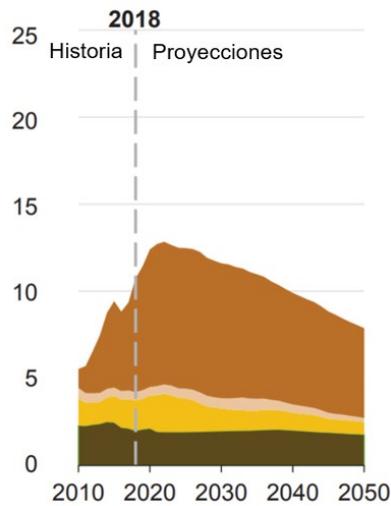


Figura 2.1. Proyección de la producción de petróleo de esquisto en Estados Unidos en millones de barriles por día a través de los años (EIA, 2019).

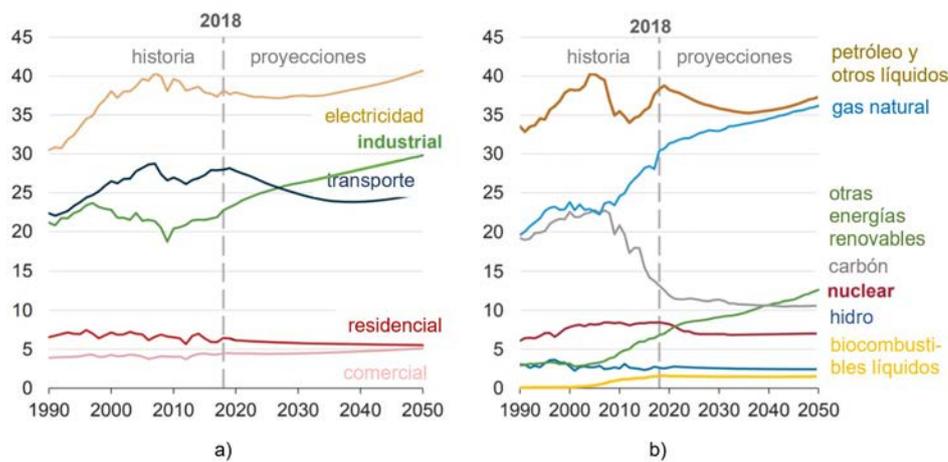


Figura 2.2. Consumo de energía por sector (a) y por fuente (b) en BTU a través de los años (EIA, 2019).

2.2. Conversión térmica de la materia

Existen diversas formas alternas de obtener combustibles. La conversión termoquímica es un proceso en el cual, mediante una serie de reacciones de despolimerización y reformación de compuestos lignocelulósicos en un sistema calentado sin oxígeno libre, se obtienen productos de valor añadido, como combustibles (He *et al.*, 2001). Esta conversión termoquímica puede ocurrir mediante pirolisis, gasificación, combustión o tratamientos hidrotérmicos; los cuales suelen tener altas eficiencias y lapsos de reacción del orden de minutos (Adams *et al.*, 2018).

La pirolisis es un proceso de descomposición que ocurre en ausencia de oxígeno, cuyos principales productos de conversión son líquido (biocrudo), sólidos y gases. Existen diversos tipos de pirolisis, dependiendo de la velocidad de calentamiento y la presión del sistema, sin embargo, la mayoría de estos procesos se da a temperaturas que rondan los 500 °C y requiere de materia prima seca. En este proceso, a menores temperaturas de reacción se favorece la conversión a carbón, la temperaturas moderadas resultan en mayor cantidad de productos líquidos y las altas temperaturas aumentan la producción de gases (Klug, 2012), (Adams *et al.*, 2018).

Los tratamientos hidrotérmicos se clasifican en tres tipos: carbonización, licuefacción y gasificación hidrotérmica. La principal diferencia entre ellas es el ámbito de temperaturas en el cuál trabajan; la carbonización hidrotérmica trabaja a temperaturas por debajo de los 200 °C y produce principalmente alquitranes (chars); la gasificación hidrotérmica se realiza a temperaturas por encima de 375 °C y su producto es el gas sintético (syngas); la licuefacción hidrotérmica (LHT), por su parte, trabaja a temperaturas entre (200-375) °C y produce biocrudos, que podrían llegar a ser destilado para ser combustible (Muppaneni, 2015).

2.3. Licuefacción hidrotérmica

Como se mencionó anteriormente, la licuefacción hidrotérmica es un proceso termoquímico cuyo rango de temperaturas de trabajo ronda entre (200-375) °C. Al realizar este proceso utilizando biomasa como materia prima se lleva a cabo una ruptura de las moléculas de celulosa y lignina presentes en su matriz, se remueve la mayor cantidad de oxígeno posible y se adiciona a las moléculas átomos de hidrógeno, lo que da como resultado una mezcla de hidrocarburos que se condensan como un líquido (biocrudo). Por otro lado, una de las principales ventajas de este método de conversión es que, por sus características, permite tratar no sólo biomásas secas, sino también húmedas; lo cual permitiría un ahorro del proceso de secado (Pandey *et al.*, 2015a).

La utilización de agua como solvente a altas temperaturas (alrededor de 300 °C), disminuye la constante dieléctrica de esta, lo que permite solubilizar más compuestos de la biomasa, a comparación de condiciones ambiente (Mathew, 2017).

2.4. Factores que afectan la licuefacción hidrotérmica

Existen diversos factores que se deben tomar en cuenta al llevar a cabo el proceso de licuefacción hidrotérmica. Entre las variables más incidentes en el proceso se pueden mencionar: el tipo de biomasa y su humedad, catalizadores, y la temperatura, presión y tiempo de reacción.

2.4.1. Tipo de biomasa

La biomasa lignocelulósica se compone, principalmente, de lignina, celulosa y hemicelulosa. Según Pandey *et al.* (2015a), las biomásas que tienen una estructura pobre, suelen obtener un rendimiento bajo de biocrudo y bajos valores de poder calorífico; mientras que los mayores rendimientos se obtienen, teóricamente, de biomásas ricas en celulosa y hemicelulosa, debido a que altos contenidos de lignina disminuyen el rendimiento, por su estabilidad química.

2.4.2. Catalizadores

En este tipo de proceso, las sales minerales, así como ácidos y bases se consideran buenos catalizadores, pues aumentan la velocidad de la hidrólisis y favorecen la generación de monómeros y moléculas pequeñas solubles en agua, que se degradan y conforman el biocrudo, además de reducir la formación de alquitranes y prevenir la repolimerización de lignina (Cao *et al.*, 2017), (Dimitriadis y Bezergianni, 2017). Las sales de potasio se encuentran entre los mejores catalizadores, pues inhiben las reacciones de carbonización, lo que aumenta la producción de biocrudo; el amoníaco por su parte, inhibe la gasificación. Los catalizadores ácidos estabilizan e hidroxigenan el biocrudo; sin embargo, las bases y sales alcalinas permiten trabajar en condiciones subcríticas y ahorrar energía, pues el biocrudo que producen es más liviano e incrementan la fracción alifática en los alquitranes (Castro Vega, 2011) (Castro, 2011). En el Cuadro 2.1, a continuación, se presenta una lista de catalizadores que se podrían utilizar en la licuefacción hidrotérmica.

Cuadro 2.1. Catalizadores utilizados en la licuefacción hidrotérmica y sus condiciones de reacción (Castro Vega, 2011).

| Catalizador | Condiciones de reacción |
|-------------------------------------|------------------------------|
| H ₂ /CO | n.d |
| Na ₂ CO ₃ /CO | 30 min, 623 K |
| K ₂ CO ₃ | (623-673) K |
| NaOH | 10 mEq/L; 1 min |
| Na ₂ CO ₃ | 613 K; 30 l/min |
| KOH; K ₂ CO ₃ | (1.3-3.6) mEq/L; (673-823) K |
| Sales de Potasio | 1 241 ppm; (603-643) K |
| Sales de Níquel | 1 %; 60 min; 773 K |
| KOH; NaOH | 10 MPa; (443-553) K |

2.4.3. Solvente

Un solvente sirve como medio para que se desarrolle la reacción favoreciendo las vibraciones y choques entre las moléculas y actuando, muchas veces, como reactivo o incluso catalizador. Para la licuefacción hidrotérmica se utiliza comúnmente el agua, debido a su accesibilidad y disminución de la constante dieléctrica durante el proceso; sin embargo, otros solventes práticos, como alcoholes (etanol o metanol, por ejemplo) se pueden utilizar para disminuir el fenómeno de repolimerización luego de la reacción, además de que pueden activar los enlaces éter; los alcoholes presentan como ventaja principal sobre el agua una menor constante dieléctrica. Para obtener mejores condiciones de reacción se podría llegar a plantear la utilización de cosolventes (Kozliak *et al.*, 2016).

2.4.4. Carga de sólidos

La relación de sólido/solvente puede resultar importante en este tipo de reacción. La presencia del agua es beneficiosa debido a que los hidrógenos activos permiten estabilizar los productos intermediarios en la reacción y previenen la formación de productos sólidos; una cantidad muy baja de agua puede provocar una mezcla de suspensión pobre y se retardaría la reacción; por otro lado, cantidades excesivas de agua pueden provocar la formación de productos sólidos, debido a una autocondensación de los compuestos del biocrudo.

Para una LHT de aserrín con agua, se obtuvo el mayor rendimiento de biocrudo

utilizando una relación 1:6 de biomasa:agua (Kozliak *et al.*, 2016). Por su parte, Gómez *et al.* (2019) indican que los mejores resultados respecto al rendimiento energético (6.31 MJ/kg biomasa) se obtuvieron a 300 °C, 30 min y una relación de 1:10 de biomasa:agua. Sin embargo, el mayor rendimiento de biocrudo se obtuvo con una relación 1:6 de biomasa:agua.

En relación a lo anterior, Reyes Plascencia (2020) indica que una mayor cantidad de agua favorece el rendimiento de biocrudo, mediante la hidrólisis de los carbohidratos presentes, mientras que realizar la reacción sin agua favorece la pirólisis y una mayor producción de gases.

2.4.5. Condiciones de reacción (temperatura, presión y tiempo)

Entre los principales factores que se deben vigilar durante el proceso de licuefacción hidrotérmica son las condiciones en que se efectúa la reacción. Durante las primeras etapas del proceso, la depolimerización es la reacción dominante; el aumento de temperatura proporciona un incremento en el rendimiento de la reacción, debido a que favorece el fraccionamiento de los componentes de la biomasa; sin embargo, al avanzar en la reacción, se favorece la repolimerización y formación de alquitranes (chars), por lo que se requiere trabajar a temperaturas intermedias para obtener los rendimientos más altos de biocrudo. Este factor se puede controlar directamente y es considerado el que tiene mayor efecto en el producto final; se indica que ámbitos de (280-350) °C permiten un rendimiento eficiente tanto para condiciones subcríticas como supercríticas (Pandey *et al.*, 2015a).

Por otro lado, la presión permite mantener una sola fase en el reactor, ya que si se trabajara con dos fases, se requeriría mayor cantidad de energía para llevar a cabo el proceso; también aumenta la densidad del solvente, lo que permite que este se adentre en las moléculas de biomasa y las desintegre con mayor facilidad y se obtengan mejores resultados. Sin embargo, la presión deja de ejercer un papel determinante en el proceso luego de alcanzadas las condiciones supercrítica, pues en esta región la presión no ejerce cambios significativos (Pandey *et al.*, 2015a).

Según Castro Vega (2011), alrededor del punto crítico del agua, el tiempo de reacción define el avance de la reacción y que este suele ser menor a 100 minutos.

El autor también indica que la región supercrítica es la adecuada para trabajar la licuefacción hidrotérmica, ya que permite llevar a cabo, de manera simultánea, reacciones de ruptura y degradación.

De igual manera, Cao *et al.* (2017) indica que el calentamiento del reactor debe ser preferiblemente 1 °C/s o más veloz, debido a que si es muy lento, se puede dar la repolimerización del producto y disminuir el rendimiento; al igual que tiempos muy largos de reacción, por ejemplo 1 h o más, ya que causan el mismo efecto.

2.4.6. Efecto del pH

En su investigación, Yin y Tan (2012) estudiaron el efecto de distintos pH en una licuefacción térmica de celulosa. Las condiciones estudiadas fueron pH de 3, 7 y 14 a temperaturas entre (275-320) °C y tiempos de reacción entre (0-30) min. Según este estudio se obtienen mejores rendimientos con pH ácidos, y aumentar la temperatura más de 300 °C disminuye el rendimiento. Según los autores, a niveles de pH neutros los rendimientos de biocrudo disminuían por la formación de productos sólidos y gaseosos; bajo condiciones alcalinas el biocrudo se descomponía en productos gaseosos por la formación de ácidos de cadenas cortas y aldehídos.

2.5. Composición de la biomasa (biomasa lignocelulósica)

La biomasa es un recurso renovable que puede ser utilizado como fuente de hidrocarburos. La biomasa lignocelulósica es aquella que proviene de: madera dura, madera blanda, residuos agrícolas o pastos, y corresponde a la materia prima de la segunda generación de biocombustibles. Está conformada, principalmente, por celulosa, hemicelulosa y lignina (Hassan *et al.*, 2018).

2.5.1. Lignina

La lignina es un polímero aromático e insoluble en agua, que le confiere a los tejidos de las plantas refuerzo estructural, resistencia al agua y a ataques físicos y biológicos. Este polímero está conformado por tres núcleos monoméricos: p-hidroxifenilos (alcohol cumarílico, ácido cumarílico y ácido hidroxicinámico), guayacoles (alcohol

conferílico y ácido ferúlico) y siringilos (alcohol sinapílico) (ver Figura 2.3) (Holladay *et al.*, 2007). Los fenilpropanos de lignina están unidas por enlaces éter (β -O-4) y carbono-carbono; los primeros corresponden a un 50 % de las uniones de la molécula (Pandey *et al.*, 2015b). Los enlaces éter éter (β -O-4) le otorgan el carácter lineal al polímero y es cuando se da el proceso de lignificación que se presentan ramificaciones; la deconstrucción de la corteza de la lignina es uno de los principales obstáculos energéticos de este proceso (Pandey *et al.*, 2015a).

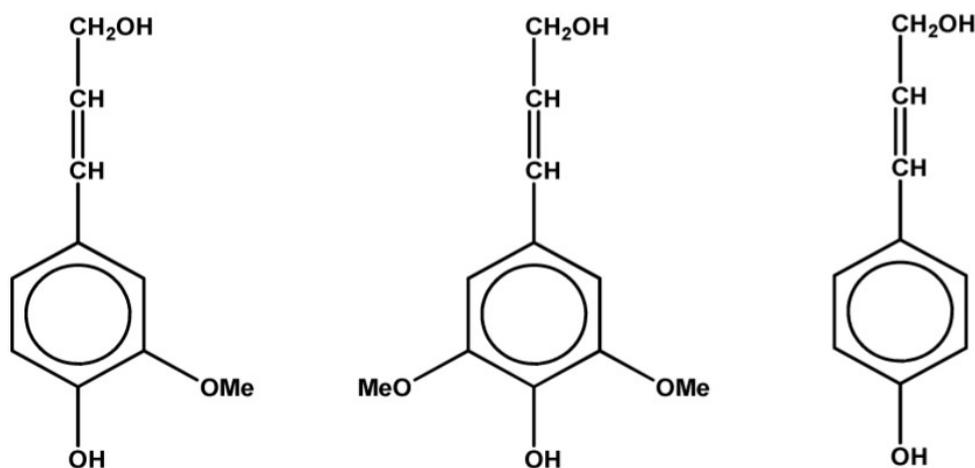


Figura 2.3. Estructura de alcohol coniferílico (izquierda), sinapílico (centro) y p-cumarílico (derecha) (Elumalai y Pan, 2011).

2.5.2. Celulosa

La celulosa corresponde al componente que se encuentra en mayor proporción en la biomasa; es un biopolímero cuya composición se basa en monómeros de β -glucosa, que se unen entre sí por enlaces β -1,4-glucosídicos, como se observa en la Figura 2.4. Este tipo de unión provoca que sea naturalmente insoluble en agua, por el acomodo e interacción de sus cadenas, las cuales se observan como fibras lineales y compactas. Debido a su biodegradabilidad, este compuesto gran interés en la industria de polímeros (Gañán *et al.*, 2017).

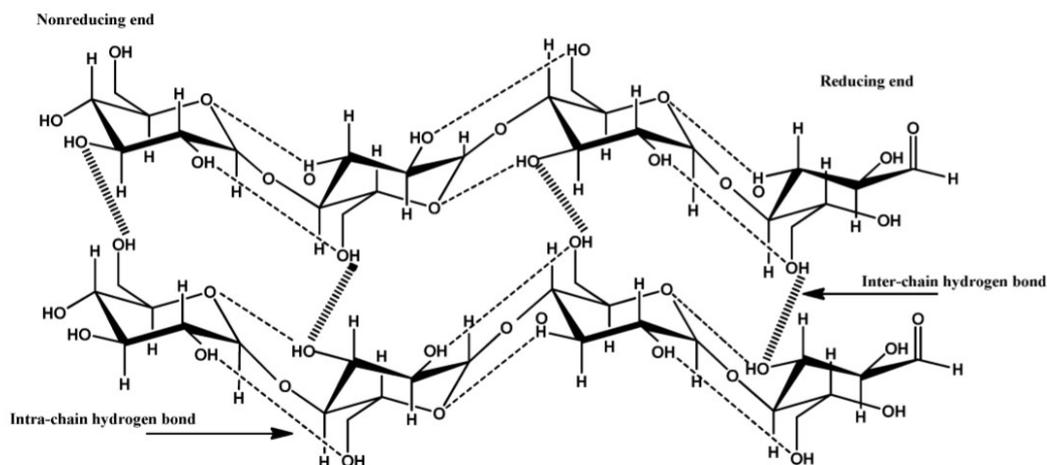


Figura 2.4. Estructura parcial de la celulosa (Elumalai y Pan, 2011).

2.5.3. Hemicelulosa

La hemicelulosa, por su parte, está formada por diferentes azúcares: pentosas, como la xilosa o arabinosa; hexosas, como la glucosa, manosa o galactosa; ácidos hexurónicos; y diohexosas (ver Figura 2.5). Estos azúcares se acomodan en cadenas más cortas y ramificadas en comparación a la celulosa, lo que la hacen más fácilmente hidrolizable; y su cadena principal puede basarse en una sola unidad repetitiva o varias (Nogués *et al.*, 2010).

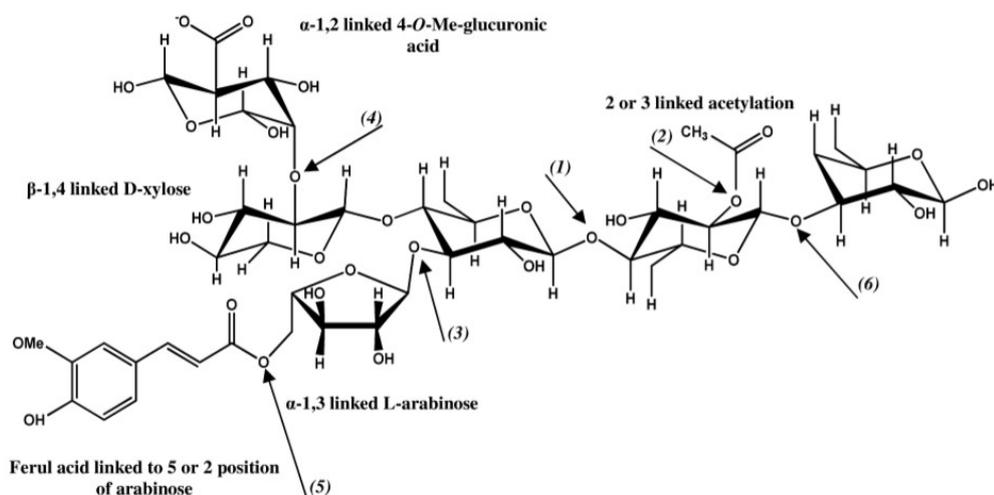


Figura 2.5. Estructura parcial de la hemicelulosa (Elumalai y Pan, 2011).

2.5.4. Composición porcentual de diferentes tipos de biomasa

Los porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa varían con el tipo de biomasa: la madera dura presenta el mayor contenido de lignina, seguido por la madera blanda, los pastos y los residuos agrícolas, respectivamente (Hassan *et al.*, 2018). A continuación, se presenta un cuadro resumen con los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa para diferentes tipos de biomasa.

Cuadro 2.2. Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa para distintos tipos de biomasa (Hassan *et al.*, 2018); (Pandey *et al.*, 2015a); (Herrera *et al.*, 2009).

| Biomasa | | Lignina (%) | Celulosa (%) | Hemicelulosa (%) |
|------------------------|---------------------|-------------|--------------|------------------|
| Madera dura | Eucalipto | 26,2 | 44,9 | 28,9 |
| | Roble | 35,4 | 43,2 | 21,9 |
| Madera blanda | Pino | 26,8 | 45,6 | 24,0 |
| | Cedro japonés | 33,5 | 52,7 | 13,8 |
| Pastos | Bambú | 25,7 | 46,5 | 18,8 |
| | Heno | 12,0 | 44,9 | 31,4 |
| | Cáscara de coco | 35,72 | 44,2 | 22,1 |
| Residuo agroindustrial | Casco de café | 33,0-33,5 | 40-49 | 25,0-32,0 |
| | Broza de café | 15,3-19,7 | 60,5-65,5 | 1,3-3,3 |
| | Cáscara de arroz | 26,0 | 40,0 | 16,0 |
| | Rastrojo de piña | 2,83 | 32,20 | 21,0 |
| | Cáscara de almendra | 36,0 | 30,0 | 27,0 |
| | Cáscara de avellana | 38,0 | 30,0 | 23,0 |

Fuentes: (Hassan *et al.*, 2018); (Pandey *et al.*, 2015a); (Herrera *et al.*, 2009)

2.6. Rastrojo de piña como biomasa para la licuefacción hidrotérmica en Costa Rica

El rastrojo de piña corresponde a los restos de tallos, hojas y raíces que quedan en el terreno de cultivo luego de la recolección del fruto de la última cosecha (aproximadamente cada 2 años). Como se muestra en el Cuadro 2.2, es un material fibroso

que presenta una cantidad de lignina de alrededor 3%, con cantidades de celulosa de aproximadamente 32% y 21% de hemicelulosa, los cuales pueden variar según el lugar y condiciones de cultivo. Se han reportado datos de poder calórico superior que rondan los 14 GJ/t con porcentajes de humedad de 87% en base húmeda (Chacón *et al.*, 2018).

Según la FAO (2020), Costa Rica es el mayor productor de piñas a nivel mundial; en el año 2018 se produjeron en Costa Rica 3,4 millones de toneladas de piña y, para el 2019, 3,3 millones de toneladas, siendo este el tercer producto más cultivado en el país. Las exportaciones de piña en el 2019 produjeron un ingreso de \$930,49 millones al país (CANAPEP, 2020). Por otro lado, Christian *et al.* (2020) indican en su estudio que en el 2018 se cultivaron en Costa Rica 65 600 hectáreas de piña. Según una investigación realizada por la Universidad de Costa Rica, en una hectárea se siembran 60 000 plantas (MAG, 2020) y se produce alrededor de 210 000 kg de rastrojo de piña (Peña Bonilla, 2018); por lo tanto, para el 2018 se estima una producción de alrededor de 13,7 millones de toneladas húmedas de rastrojo de piña. En la Figura 2.6 se puede apreciar la distribución del cultivo de piña en las principales zonas de cultivo del país para el año 2018.

Según el Decreto No. 26921-MAG “Reglamento a la Ley de Protección Fitosanitaria No. 7664”, artículo 88, todo propietario está obligado a tratar, procesar o destruir los rastrojos y desechos de su finca, cuando éstos constituyan riesgo de diseminación o aumento de la población de una plaga que signifique algún riesgo para un determinado cultivo, la salud humana y animal. Debido a que el rastrojo se genera en grandes cantidades y se degrada lentamente en condiciones naturales, este sirve de medio para que la mosca del establo se reproduzca y llegue a resultar perjudicial (González Alfaro, 2012).

La mayoría de los residuos agrícolas que se producen en gran cantidad, se suelen descartar o quemar (Hassan *et al.*, 2018). En Costa Rica, para disponer de los desechos de la piña actualmente se utilizan dos técnicas principalmente: quemar el rastrojo con algún herbicida (Paraquat) o con fuego, lo cual constituye la disposición más barata; o bien, se tritura el rastrojo y, en algunos casos con ayuda de microorganismos, se descompone la biomasa y se reincorpora al suelo. Esta segunda

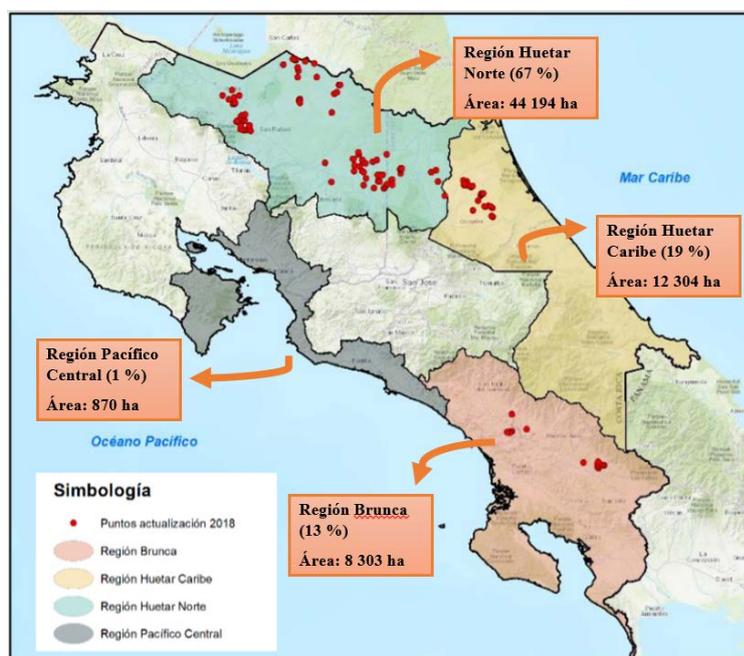


Figura 2.6. Distribución de la extensión sembrada en hectáreas de piña en las principales regiones productoras en Costa Rica para el año 2018 a partir de los datos de (Christian *et al.*, 2020).

práctica es económicamente más costosa y un 40 % de los productores la utilizan; de igual manera, si se utiliza esta técnica, se debe esperar un tiempo de barbecho (sin siembra) de 12-20 semanas antes de volver a cultivar en ese terreno (Chacón *et al.*, 2018).

Como una opción alterna al manejo de este desecho, a nivel país se han desarrollado una serie de proyectos que pretenden contribuir con el adecuado manejo de este desecho, según se indican a continuación. En primera instancia, Peña Bonilla (2018) indica que, desde la Escuela de Zootecnia de la Universidad de Costa Rica, se plantea el método de ensilaje del rastrojo de piña como alimento alternativo al ganado; este proceso consiste en una fermentación anaerobia en húmedo, que produce un aumento en la acidez y permite conservar el material y sus características nutricionales por más tiempo. Por otro lado, Acuña Navarro (2018) indica que si se le da un adecuado manejo a los residuos, como por ejemplo, compostaje o fabricación de ácidos húmicos, y estos se reincorporaran al suelo, se tendría una fuente especial de nutrientes que permitiría ahorrar en fertilizantes.

De igual manera, en el país se han realizado estudios que indican que este desecho

se podría utilizar para distintas actividades, tales como: el cultivo y exportación del Hongo Ostra, el cual es comestible y se utiliza como un sustituto a la carne; la empresa REUTI-PIÑA (ubicada en Guanacaste) manejaba, en el 2017, alrededor de 700 toneladas de rastrojo de piña para la obtención de bromelina y microcelulosa, para ser utilizadas en la industria alimentaria y farmacéutica, respectivamente; desde la Universidad Técnica Nacional y la Universidad de Costa Rica, se ha estudiado la producción de nanocelulosa a partir de este desecho, la cual se puede utilizar para producir empaques biodegradables; por último, estudiantes de la Universidad de Costa Rica han planteado un proyecto para la producción de platos a partir de estos desechos (CANAPEP, 2017).

Por otra parte, desde la Universidad de Costa Rica, se realizó un estudio que plantea el rastrojo de piña como materia prima para la elaboración de un textil no tejido, reforzado con biopolímeros. Esto se realiza al recolectar las hojas largas y verdes del rastrojo, sin utilizar las partes secas; a estas se les aplica un proceso de decorticado y extracción para remover las ceras y se secan a temperatura ambiente. Luego, la fibra obtenida se peina para quitarle las impurezas más grandes y se pasa por tratamientos húmedos o secos para obtener una hoja delgada y uniforme, con el tratamiento en húmedo o una lámina esponjosa y gruesa, con el tratamiento en seco, a las cuales se le puede añadir el biopolímero para otorgar mayor resistencia y rigidez al producto. Finalmente, se prensa la lámina a alta temperatura y elevada presión, y el tejido obtenido se deja enfriar (Jirón García, 2020).

Las actividades anteriormente mencionadas se encuentran aún en proceso de estudio y desarrollo, por lo cual el proceso de licuefacción hidrotérmica resulta ser una posible fuente de aprovechamiento competitiva, considerando las características fisicoquímicas de estos residuos.

2.7. Licuefacción hidrotérmica de biomasa

Los diferentes compuestos de la biomasa sufren diferentes transformaciones durante el proceso de licuefacción hidrotérmica, para dar como producto final un bio-crudo, el cual es una mezcla de ácidos orgánicos, cetonas, aldehídos, fenoles, alcoholes, furanos, hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos alifáticos (Peterson, 2018).

En cuanto a la lignina, esta experimenta un proceso de hidrólisis, en el cual, se rompen los enlaces éter y de carbonos, se da una desmetoxilación, alquilación y condensación; sin embargo, los anillos aromáticos, debido a su estabilidad, no presentan un cambio apreciable. De igual manera, a una menor temperatura y tiempo de reacción, se producen monómeros y dímeros fenólicos, por la ruptura del enlace éter y C-C; y, si se aumenta la temperatura, se propicia la desmetoxilación y alquilación de compuestos fenólicos para obtener alquifenoles (ver Figura 2.7) (Pandey *et al.*, 2015a).

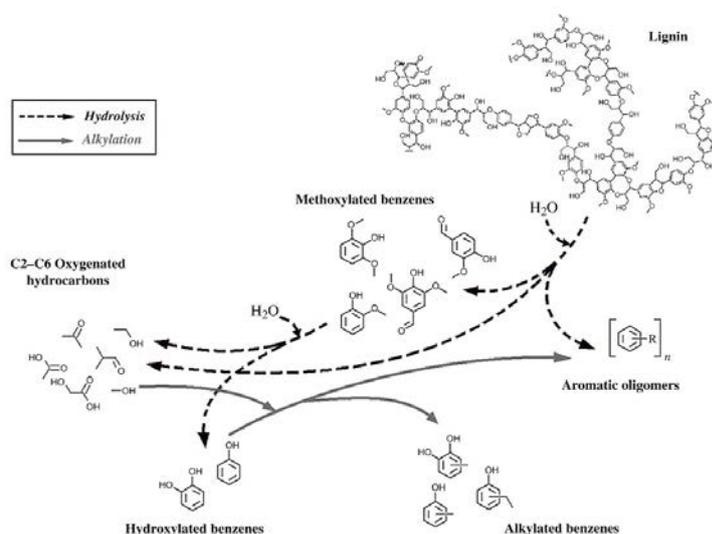


Figura 2.7. Esquema de reacciones que puede sufrir la lignina en un proceso de licuefacción hidrotérmica (Castro Vega, 2011).

La celulosa y la hemicelulosa son los carbohidratos que se encuentran en mayor proporción en la biomasa. Durante la conversión hidrotérmica de la celulosa, se reduce la relación (O:C) pero, a diferencia de la pirolisis, la relación (H:C) no se reduce y, cuando se alcanza esta última, se obtiene el producto biocrudo (Castro Vega, 2011). Como se mencionó anteriormente, la hemicelulosa se hidroliza con mayor facilidad que la celulosa, y los productos de ambos se encuentran en la fase acuosa luego de la hidrólisis. Algunos de los productos obtenidos son la glucosa y otros sacáridos, que se degradan para formar hidrocarburos oxigenados, tales como ácido fórmico, ácido láctico, hidroximetilfurfural y ácido levulínico (ver esquema de reacciones en la Figura 2.8) (Pandey *et al.*, 2015a).

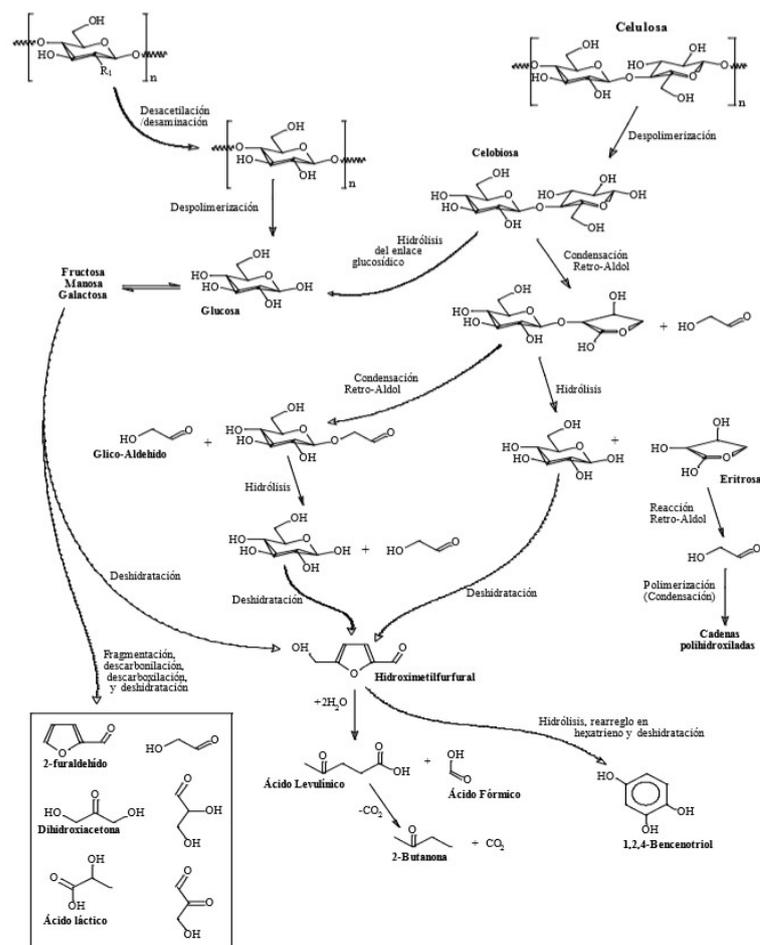


Figura 2.8. Esquema de reacciones que puede sufrir la celulosa en un proceso de licuefacción hidrotérmica (Castro Vega, 2011).

La celulosa se descompone en glucosa y otros oligosacáridos, así como aldehydos y moléculas ácidas, que se obtienen con el aumento de la temperatura; sin embargo, al aumentar la temperatura y el tiempo de reacción, se puede correr el riesgo de obtener compuestos como el hidroximetilfurfural (aproximadamente a 180 °C), que genera un producto similar al alquitrán dentro del reactor, si no hay presencia de catalizadores. La hemicelulosa se hidroliza luego de los 120 °C, proceso que se puede catalizar tanto en medio ácido como básico y puede producir compuestos xilooligosacáridos. La lignina, por su parte, aporta moléculas aromáticas, que se prefieren de bajo peso molecular; según estudios, la lignina oxidada produce más de estos compuestos debido a que se pueden polarizar los enlaces C-H y disminuir la barrera energética necesaria (Cao *et al.*, 2017).

Al finalizar el proceso de LHT se obtienen cuatro productos principales: una fase orgánica, la cual consiste en el biocrudo, una fase acuosa, un residuo sólido y gases (Dimitriadis y Bezergianni, 2017).

2.7.1. Fase orgánica - biocrudo:

Según Ulate Sancho (2020), el biocrudo obtenido experimentalmente corresponde a un producto altamente viscoso, el cual tuvo un rendimiento del 43,41 %, este biocrudo estaba compuesto principalmente de compuestos alifáticos, alcoholes (en su mayoría fenoles), naftol, ácidos grasos, una flavona, una chalcona, dietilftalato, cetonas, clorambucilo, una coenzima, entre otros.

2.7.2. Fase acuosa:

La fase acuosa, suele tener porcentajes de rendimiento entre 20-50 % de la biomasa inicial (Cao *et al.*, 2017; Magdeldin *et al.*, 2017; "Yang *et al.*, 2016). Ulate Sancho (2020), en su estudio con rastrojo de piña, obtuvo un rendimiento de fase acuosa de 92,08 %, e indica que esto se pudo deber al alto contenido de humedad (77,73 %) de la biomasa trabajada.

Para biomazas lignocelulósicas, la mayoría de los compuestos que se encuentran en esta fase corresponden a ácidos orgánicos, tales como ácido glicólico y ácido acético, y alcoholes, como metanol y etanol, principalmente Cao *et al.* (2017). También indican que se puede encontrar la presencia de acetona y ciclopentonas; así como trazas de sodio, silicio y azufre. Según Magdeldin *et al.* (2017), esta fase se puede enviar a una planta de tratamiento y reincorporar en alguna parte del proceso.

2.7.3. Fase sólida:

En cuanto a la fase sólida, Ulate Sancho (2020) determinó que esta tuvo un rendimiento de 35,92 %, respecto a una base seca de rastrojo de piña alimentado. Este dato concuerda con los rendimientos experimentales de otros estudios, los cuales rondan (29-32) % (Magdeldin *et al.*, 2017), (Dimitriadis y Bezergianni, 2017), (Cheng *et al.*, 2010).

Esta fase suele denominarse “hydrochar”. Debido a su alto contenido en elementos como carbono, hidrógeno y nitrógeno, este co-producto es idóneo como fertilizante, correctivo/rectificadores de suelo. También puede utilizarse como combustible (Cao *et al.*, 2017), (Magdeldin *et al.*, 2017) o adsorbente de CO₂ (Masoumi *et al.*, 2021).

2.7.4. Fase gaseosa:

La fase gaseosa se puede recolectar en un recipiente en la etapa de despresurización; esta consiste, principalmente, en dióxido de carbono, sin embargo, también se encuentra el gas inerte utilizado para presurizar el sistema (hidrógeno o nitrógeno), monóxido de carbono, metano y, en algunos casos, trazas de etano, etileno, propano y propeno (Dimitriadis y Bezergianni, 2017), (Cheng *et al.*, 2010), (Sun *et al.*, 2010), ("Yang *et al.*, 2016), (Cao *et al.*, 2017).

Según (Cheng *et al.*, 2010), esta fase gaseosa reporta un rendimiento másico de alrededor de 8%. Por su parte, ("Yang *et al.*, 2016) indicaron rendimientos másicos de menos de 1%; mientras que (Magdeldin *et al.*, 2017) indican que el rendimiento de la fase gaseosa corresponde a un 9%, de la cual, el 92% en masa corresponde a dióxido de carbono.

De manera general, (Cao *et al.*, 2017) indican que la fase gaseosa, luego del proceso de LHT, tiene un rendimiento entre (5-10)% de los compuestos orgánicos originales, con un porcentaje volumétrico de 72% de CO₂, 16% de H₂, 10% de CO y 2% de CH₄. Según (Magdeldin *et al.*, 2017), esta corriente se puede utilizar para la generación de hidrógeno “in situ”, el cual puede servir para el proceso de mejoramiento del biocrudo.

2.8. Licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña en Costa Rica

En la Universidad de Costa Rica, Ulate Sancho (2020) llevó a cabo en el periodo del 2019-2020 un estudio que buscaba evaluar el tratamiento de licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña para la obtención de biocrudo. En esta investigación, se evaluó el efecto que tenían las variables de tiempo, temperatura y ciclos de extrac-

ción sólido - líquido sobre el rendimiento de biocrudo obtenido, el cual se calculó con base en la masa de biomasa seca inicial (3,3 g). El diseño del experimento planteó estudiar, mediante un factorial 22 las condiciones de temperaturas de (275, 300 y 325) °C y tiempos de reacción de (1; 1,5 y 2) h, añadiendo dos experimentos adicionales con (0,793 y 2,207) h a 300 °C y un bloque estadístico que estudiaba el número de ciclos aplicados para extraer el biocrudo (1 y 2) ciclos, utilizando diclorometano como disolvente.

Los rendimientos obtenidos en este estudio rondaron entre (19-43) %, donde las mejores condiciones de reacción estudiadas fueron 325 °C, 1h y 1 ciclo de extracción y 300 °C, 0,793 h y 2 ciclos de extracción; para un rendimiento de 43,4 %. En este estudio se detectó que con menores tiempos de residencia, se alcanzaban mejores rendimientos; y que efecto de la temperatura variaba con el tiempo de residencia: a mayores tiempos de residencia, el rendimiento aumentaba con menores temperaturas de operación; y a menores tiempos de residencia, los mejores rendimientos se obtenían con temperaturas más altas.

Por otro lado, el biocrudo fue caracterizado mediante un GC/MS y se detectó la presencia de compuestos alifáticos, alcoholes (en su mayoría fenoles), naftol, ácidos grasos, una chalcona, una flavona, un ftalato, cetonas, clorambucilo, una coenzima; y familias de moléculas que previamente habían sido reportadas para la LHT. Por medio de un análisis TGA/DSC se determinó que el biocrudo reducía su masa en un 81 % a una temperatura de 800 °C. Por último, mediante un estudio con bomba calorimétrica, se determinó un calor de combustión de $(35,922 \pm 0,724)$ MJ/kg para el biocrudo y de $(27,567 \pm 0,388)$ MJ/kg para el hydrochar, lo que señala un alto contenido energético.

Al finalizar el proceso de LHT se obtienen cuatro productos principales: una fase orgánica (biocrudo), una fase acuosa, un residuo sólido y gases. Las cuatro fases obtenidas deben ser separadas para obtener el biocrudo, que corresponde al producto de interés. A continuación, en la Figura 2.9 se presenta un diagrama del proceso de separación realizado experimentalmente en el estudio. Dicho procedimiento experimental se utiliza como base para la creación de la simulación de proceso de referencia para la separación industrial del biocrudo a producir.

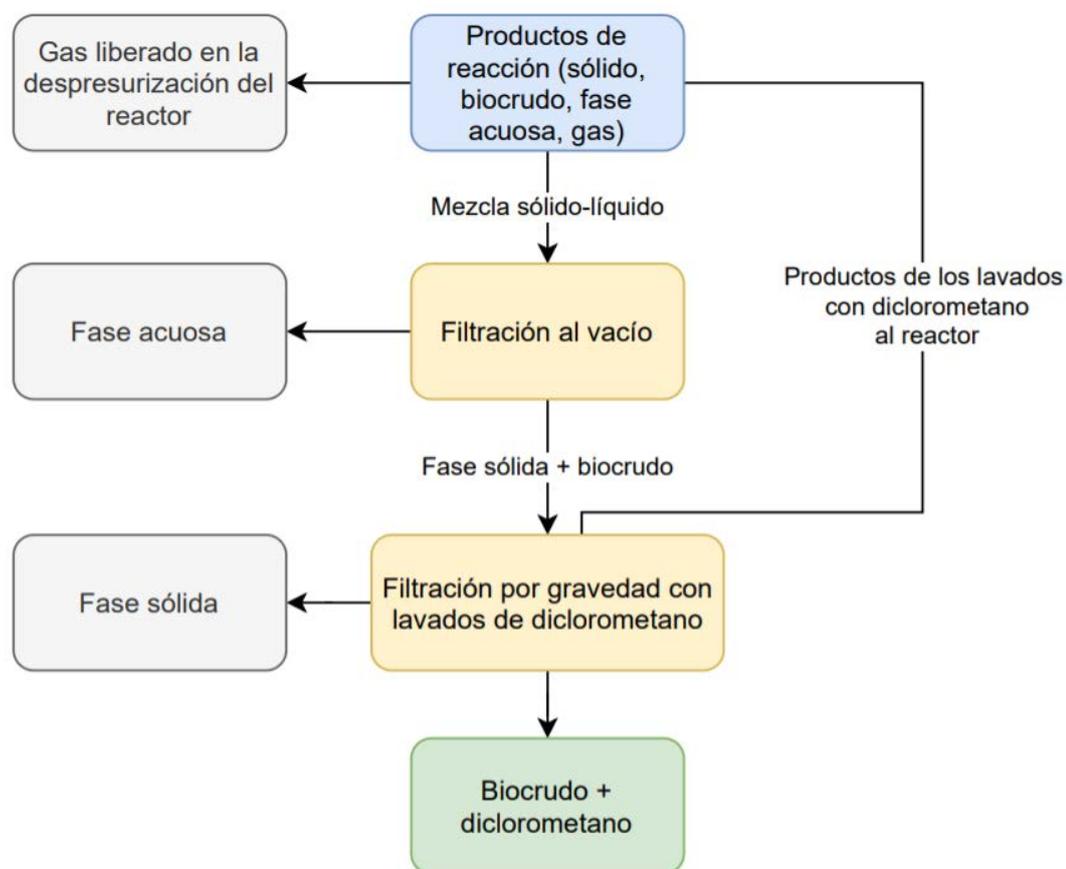


Figura 2.9. Proceso de separación experimental del biocrudo elaborado en la Universidad de Costa Rica (Ulate Sancho, 2020).

Como se puede observar de la Figura 2.9, a nivel experimental, una vez se alcanza la temperatura ambiente en el reactor, se retira la mezcla sólido-líquido que se obtuvo de la reacción. Luego, se realizan lavados de diclorometano a las paredes del reactor y al agitador, para extraer mayor cantidad de biocrudo; estos lavados se almacenan aparte. La mezcla sólido-líquido obtenida se filtra al vacío, en este paso se separan la fase sólida de la fase acuosa. Seguidamente, los sólidos se juntan con los productos obtenidos de los lavados realizados previamente al reactor y se procede a filtrar por gravedad. Para dicha filtración, se hacen lavados con diclorometano, y es en este punto donde se separa la fase orgánica (solvente y biocrudo) de la fase sólida.

A escala laboratorio, el biocrudo se separa del diclorometano mediante un rotavapor al vacío. Sin embargo, a nivel industrial este proceso se debe realizar en un equipo como una columna de destilación. Cabe resaltar que en esta investigación se

recomendó almacenar y conservar el biocrudo en conjunto con el diclorometano en un recipiente hermético, con el fin de que el disolvente no se evapore; lo anterior debido a que el biocrudo obtenido resultó ser tan viscoso que su manipulación se tornaba complicada.

En el laboratorio se utilizaron en total 170 mL de diclorometano, donde 50 mL fueron para los lavados al reactor y 120 mL para los lavados en la filtración al vacío, los cuales se hicieron pasar dos veces por el papel filtro. Es decir, del total del disolvente a utilizar, un 30 % se utiliza para lavados al reactor y el 70 % restante para lavados al sólido.

2.9. Posibles usos y comercialización de biocrudo en Costa Rica

Según se expuso anteriormente, la EIA (2019) estima que el consumo de energía para transporte y de petróleo se mantengan con altos niveles de demanda entre el 2020 y 2050. En Costa Rica, en el año 2019, se consumieron 111 789 TJ de derivados de petróleo para uso energético; el sector de transporte ocupó el mayor consumo de estos, requiriendo 93 232 TJ; seguido por el consumo de la industria, la cual ocupó 10 133 TJ (SEPSE, 2019). Lo anterior se puede apreciar en la Figura 2.10.

Entre los principales usos que posee el biocrudo producido a partir de licuefacción hidrotérmica se pueden mencionar (Xiu y Shahbazi, 2012):

- Después de un proceso de mejoramiento, se puede utilizar como combustible de transporte.
- Combustible para calderas para generación de calor.
- Producción de agroquímicos, fertilizantes, agentes de control de emisiones y resinas.
- Producción de adhesivos, como bioaglomerante asfáltico.

Debido a lo anterior, un biocrudo como el que se puede obtener a partir de licuefacción hidrotérmica tenga una demanda considerable, ya que se puede refinar

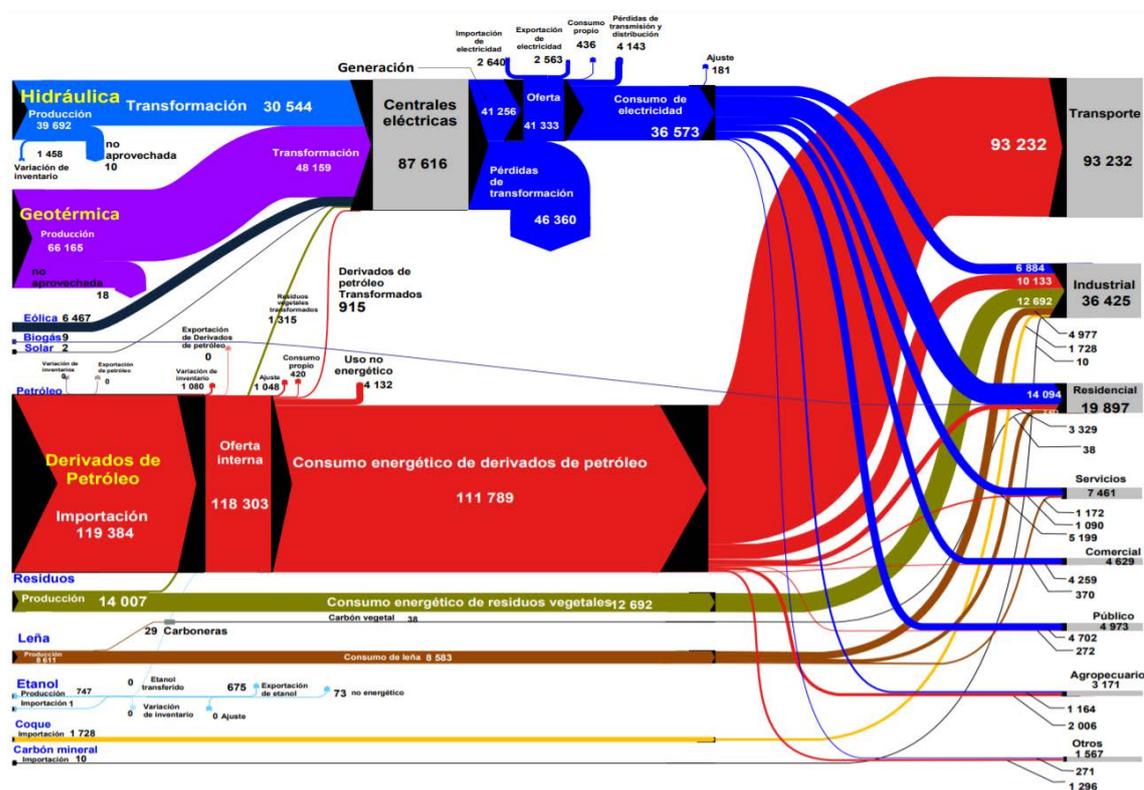


Figura 2.10. Balance Energético de Costa Rica durante el 2019 (valores en TJ) (SEPSE, 2019).

para producir distintos tipos de combustibles, los cuales tienen una alta demanda en el país y, aunque no se destinará exclusivamente a la producción de combustibles, se puede comercializar como precursores de los otros productos antes mencionados.

2.10. Análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto

El ciclo de vida de un producto son las etapas consecutivas e interrelacionadas para la producción de este, desde la adquisición de los recursos naturales necesarios hasta la disposición final del producto. El análisis de ciclo de vida corresponde a una metodología que busca identificar, cuantificar y caracterizar los distintos potenciales impactos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida de un producto (ISO, 2006). En un ACV se evalúan las cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o actividad; se identifican los materiales y la energía utilizada y los residuos liberados en el ambiente natural. Las principales actividades que se toman en cuenta al realizar este estudio son: la extracción y tratamiento de la materia prima,

la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y el despacho final del producto; así como la clasificación del análisis según las etapas que se tomen en cuenta (Colón y Arena, 2016).

2.11. Etapas del análisis del ciclo de vida de un producto

Las principales normas que dictan los principios y lineamientos que se deben seguir para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida son la ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006; según estas, el procedimiento del análisis consta de cuatro etapas principales: la definición de objetivos y alcance, la cuantificación del inventario, la evaluación de impactos y la interpretación de los resultados (ISO, 2006). Una vez terminado el estudio, se puede tener una estimación de los impactos totales producidos por el sistema. De igual manera, este método es dinámico, de modo que las cuatro etapas de estudio se relacionan entre sí (ver Figura 2.11), tal que, luego de obtener ciertos resultados, se pueden modificar los datos, hipótesis, límites, objetivos y demás, obteniendo nuevos resultados para el estudio; por lo que se vuelve un cálculo iterativo (Colón y Arena, 2016). A continuación, se abordará cada etapa antes mencionada.

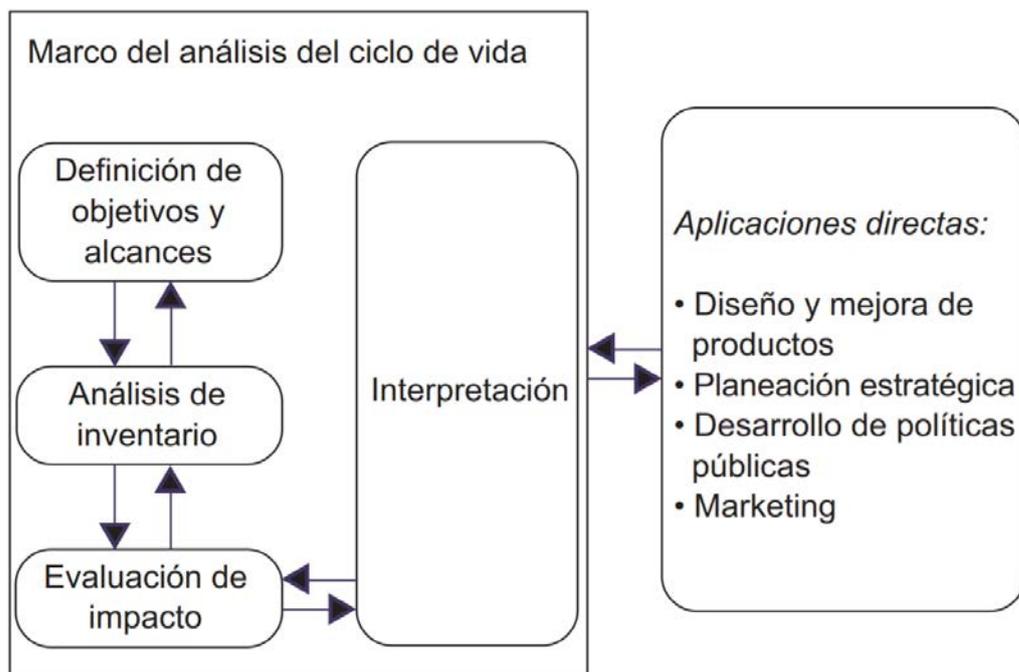


Figura 2.11. Relación entre las etapas de estudio del Análisis de Ciclo de Vida (Rodríguez, 2003).

2.11.1. Definición de objetivos y alcance

Primeramente, se debe definir cuál es el objetivo de realizar este estudio, las razones por las cuáles se lleva a cabo y el público destino. Segundo, se delimita el alcance del estudio, definiendo los impactos que se van a evaluar la robustez permitida, cuál será la unidad funcional del estudio, los datos requeridos, entre otras variables. Por definición, el ciclo de vida toma en cuenta todos los flujos de entrada y salida de cada etapa del proceso de producción. Los flujos de entrada se consideran en la forma que se encuentran en el ambiente, sin previa modificación humana; mientras que los flujos de salida se liberan al ambiente sin sufrir transformaciones posteriores por el ser humano (ISO, 2006). Sin embargo, un inconveniente de lo anterior, es que para la mayoría de procesos no adquieren sus materias primas directamente de la naturaleza, sino que manejan proveedores; o bien, la producción de la energía es muy ajena al sistema en estudio.

Dado a lo anterior, resulta necesario delimitar el estudio ya que, de lo contrario, podría resultar poco práctico. Entre los principales criterios utilizados para esto se pueden mencionar: reglas de corte que desprecien flujos que contribuyan por debajo de un valor definido, ya que, por lo general, la mayor parte de los impactos se dan por un pequeño número de procesos; indicar procesos o materiales que no se tomarán en cuenta por causas como falta de información o que este sea poco confiable; asignar los impactos asociados a un producto específico a su propia cadena de producción; entre otros (Colón y Arena, 2016). En la Figura 2.12 se pueden apreciar diversas divisiones del ciclo de vida de un producto, según el alcance que se le otorgue al estudio.

Ahora bien, si el objetivo del análisis resulta en la comparación de dos productos, lo principal que se debe tomar en cuenta es la función que este va a desempeñar y sobre eso se evalúan los impactos producidos, es decir, se deben comparar dos productos que cumplan la misma función de servicio. De igual manera, hay que asegurarse de que la comparación se basa en la misma unidad funcional, la cual es la cuantificación del proceso en términos de, por ejemplo, masa, volumen, valor económico, contenido energético, entre otras (ISO, 2006).



Figura 2.12. Diversos alcances del análisis del ciclo de vida de un producto según los límites del sistema en estudio, según lo indicado en la Norma ISO 14040:2006.

2.11.2. Inventario del ciclo de vida

El inventario se puede definir, a grandes rasgos, como un balance de masa y energía; en él se contabilizan todas las entradas y salidas de cada proceso unitario dentro del sistema de estudio. En cada proceso se define la unidad de referencia, sus límites, flujos de entrada y salida, materiales auxiliares y embalaje. En el caso de la evaluación del transporte se debe considerar la infraestructura utilizada (rutas, puertos, aeropuertos, entre otros), el medio de transporte (camión, barco, avión, tren, entre otros) y el vector energético (gasolina, electricidad, gas, y demás); de igual manera, se deben tomar en cuenta los viajes de vuelta, vacíos o llenos (Colón y Arena, 2016).

En la medida de lo posible, los datos utilizados deben ser datos directamente obtenidos del proceso que se está estudiando; de igual manera, con el fin de representar la información de manera más clara, se deben incluir: diagramas de flujo que relacionen cada parte del proceso; descripción de cada unidad del proceso, listando las categorías de los datos (ver Cuadro 2.3); una lista donde se especifique la unidad de medida de cada parámetro; descripción de los métodos empleados para recolectar la información y de las técnicas de cálculo empleadas; y, en caso de obtener datos de fuentes externas, indicarlas (Pérez, 2013). La información recaudada en el inventario se puede clasificar en distintas categorías; en el Cuadro 2.3 se muestran las principales.

Cuadro 2.3. Clasificaciones para la información recaudada en el inventario del ciclo de vida (Pérez, 2013).

| Categoría | Información contenida |
|--|---|
| Materias primas directas y auxiliares | <ul style="list-style-type: none"> ■ Materiales que se utilizan para producir el producto, pueden ser provenientes de otros procesos. |
| Energía | <ul style="list-style-type: none"> ■ Combustibles y electricidad utilizada en el proceso. ■ Energía utilizada como materia prima a ser transformada. ■ Energía consumida en la producción y transporte de los combustibles. ■ Energía consumida en la producción de electricidad. |
| Emisiones a la atmósfera | <ul style="list-style-type: none"> ■ Todas las emisiones de contaminantes a la atmósfera (gases y partículas), de fuentes móviles y estacionarias; después de pasar por equipos de control de emisiones. ■ De fugas existentes. |
| Descargas al agua | <ul style="list-style-type: none"> ■ Las descargas de fuentes puntuales o difusas, a las aguas superficiales y a las subterráneas, después de pasar por las plantas de tratamiento de aguas. ■ Descargas debidas a fugas. |
| Descargas al suelo | <ul style="list-style-type: none"> ■ Todos los residuos y sustancias que son enviados a confinamientos controlados, inyectados en pozos profundos y descargas directas a los suelos. Los contaminantes se consideran en forma sólida o líquida. ■ Residuos que se generan después de los procesos de incineración, compostaje, procesos de tratamiento, recuperación y reciclaje. ■ Fugas y tiraderos de basura. |

Cuadro 2.3. Continuación. Clasificaciones para la información recaudada en el inventario del ciclo de vida (Pérez, 2013).

| Categoría | Información contenida |
|--|---|
| Emisiones y descargas provenientes del uso de combustibles | <ul style="list-style-type: none"> ■ Emisiones al aire, agua y suelo asociadas con la combustión y el uso de la energía. |
| Otras emisiones y descargas | <ul style="list-style-type: none"> ■ Ruido, vibraciones, radiación, olor y calor de desecho. |

2.12. Evaluación del impacto del Ciclo de Vida

Luego de realizado el inventario, se deben caracterizar y estimar los efectos de los resultados obtenidos, y se evalúan posibles modificaciones y los consumos de recursos producidos. Ahora bien, para evaluar los impactos se deben definir categorías de impacto y clasificar y caracterizar cada uno (Colón y Arena, 2016). Según Antón Vallejo (2004), a cada categoría de impacto se le asigna un indicador de categoría. A continuación, se muestran una serie de categorías para clasificar los datos del inventario, tomando en cuenta que, algunas sustancias, pueden clasificarse dentro de una o más categorías de impacto, según Pérez (2013).

- **Consumo de recursos:** se mide efecto del consumo de un recurso sobre el agotamiento de este; teniendo en cuenta su escasez relativa y el tiempo en el que se cree que se agotarán, de forma que, cuanto más hay de un determinado recurso, es menos preocupante su consumo. Este cálculo tiene cierto nivel de complejidad, ya que supone conocer datos de los recursos existentes.
- **Calentamiento global / Cambio climático:** aquí se incluyen las emisiones que contribuyen al calentamiento global, para esto, se realiza un cálculo que expresa la capacidad de una unidad de masa de contaminante para absorber radiación infrarroja en comparación con la misma unidad de masa de CO₂. En esta categoría se agrupan las cargas ambientales por CO₂, CH₄ y los CFC. Según Viquez-Zamora (2014), esto se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\text{Cambio climático} = \sum_i GWP_i \cdot m_i \quad (1)$$

dónde:

Cambio climático: caracterización de cambio climático, kg de CO₂ equivalente

GWP: potencial de cambio climático para un horizonte de 100 años de la sustancia *i*, adim

m_i: masa de la sustancia *i*, kg

- **Destrucción de la capa de ozono**: para esta categoría se reporta la capacidad que tiene un contaminante para destruir el ozono, dicho contaminante se expresará en kilogramos equivalentes de CFC-11.
- **Acidificación**: indica la capacidad de algunos compuestos de liberar iones H⁺; se compara la capacidad de una unidad de masa para liberarlos en comparación con la misma unidad de masa de SO₂. La principal fuente de este fenómeno es el uso de combustibles con alto contenido en azufre. Es importante recalcar, que se deben tener en cuenta el lugar donde se produce la deposición, los efectos sinérgicos y el tipo de emisión ácida.

$$\text{Acidificación} = \sum_i AP_i \cdot m_i \quad (2)$$

dónde:

Acidificación: caracterización de acidificación, kg de SO₂ equivalente

AP: potencial de acidificación de la sustancia *i*, adim

- **Eutrofización**: este fenómeno es el crecimiento excesivo de nutrientes en el agua, lo que produce la generación acelerada de biomasa (algas, principalmente) que consume gran parte del oxígeno en el sistema, lo que provoca la disminución de otras formas de vida. Para medir este fenómeno se hace uso el anión fosfato (PO₄³⁻), al cual se refieren el resto de los componentes.

$$Eutrofizacion = \sum_i NP_i \cdot m_i \quad (3)$$

dónde:

Eutrofizacion: caracterización de Eutrofización, kg de PO_4^{3-} equivalente

NP: potencial de nutricación de la sustancia i, adim

- **Toxicidad humana:** según Viquez-Zamora (2014), para esta categoría, se utilizan factores de caracterización del Potencial de Toxicidad Humana (HTP), describe el destino, la exposición y los efectos de las sustancias tóxicas para un horizonte de tiempo infinito. Los HTP se expresan como kg de 1,4-diclorobenceno equivalente/kg de emisiones.

$$Toxicidad\ humana = \sum_n \sum_i HTP_i \cdot f_{i,n} \cdot m_i \quad (4)$$

dónde:

Toxicidad humana: caracterización de toxicidad humana, kg de 1,4-diclorobenceno equivalente

HTP: potencial de toxicidad humana de la sustancia i, adim

$f_{i,n}$: fracción de la sustancia i que se transporta desde el lugar de emisión hasta el compartimiento ambiental, adim

n: compartimiento ambiental, adim

- **Toxicidad por metales pesados:** esta categoría mide la concentración de metales pesados en el aire; utiliza el plomo (Pb) como elemento de referencia para analizar la contribución a esta categoría de impacto; algunos elementos que pueden contribuir son los combustibles, por la presencia de este elemento en sus matrices.
- **Toxicidad por sustancias cancerígenas:** la sustancia de referencia para esta categoría es el Benzo alfa pireno (una concentración de 0,01 ng conlleva

un caso de cáncer por millón de habitantes y año); los hornos de carbón y los motores de diésel producen gran cantidad de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), que son las sustancias más cancerígenas en la atmósfera.

- **Toxicidad por smog invernal:** los compuestos que más afectan a esta categoría es el SO₂, los óxidos de nitrógeno, compuestos organovolátiles y el monóxido de carbono; las sustancias que se utilizan como referencia son las partículas en suspensión o polvo.
- **Toxicidad por smog fotoquímico:** las principales sustancias que lo provocan son los compuestos organovolátiles y los óxidos de nitrógeno; este fenómeno aumenta en la estación de verano, por un aumento en la concentración de ozono, debido a la radiación solar (ozono troposférico); la sustancia que se utiliza como referencia para cuantificarla es el etileno (C₂H₄).
- **Generación de residuos sólidos y líquidos:** se contabilizan la cantidad de residuos que generan las actividades involucradas en el ciclo de vida en estudio.

De igual manera, Colón y Arena (2016) indican que la caracterización es el cálculo de los resultados de los indicadores de categorías, el cual depende tanto de la cantidad de contaminantes emitidos, como del potencial de cada uno de producir un determinado daño. Los distintos factores de caracterización (equivalencias respecto a las sustancias referentes) se pueden encontrar en: el documento de Factores de Emisión de Gases de Efecto Invernadero – Décima Edición, 2020 de Costa Rica (IMN, 2020); el Handbook on Life Cycle Assessment (Guinée y Lindeijer, 2002); el Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (UNEP, 2006); entre otros documentos.

2.12.1. Interpretación de resultados

En esta etapa se combinan y analizan los resultados obtenidos, entre ellos la sensibilidad de los datos y la consistencia entre ellos, y se establecen conclusiones y recomendaciones al sistema, según los objetivos inicialmente definidos.

2.13. Softwares utilizados para la evaluación del impacto del ciclo de vida

En la actualidad existen diversas herramientas que permiten llevar a cabo un estudio más completo del ciclo de vida de los productos; de manera general, estas permiten acceder a bases de datos comerciales; crear inventarios propios e introducir datos en ellos; obtener las tablas del inventario; clasificar, normalizar y evaluar los resultados del estudio; llevar a cabo análisis de sensibilidad y crear modelos virtuales del producto de interés (TECPA, 2015). Entre los principales softwares utilizados se pueden mencionar: SimaPro, Open LCA, GaBi, Umberto y Ecochain (Martin Navarro, 2012). A continuación, en el Cuadro 2.4, se presenta un resumen de las principales características de estos softwares.

Cuadro 2.4. Resumen de algunos softwares utilizados para la evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida de un producto.

| Software | Características | Referencias |
|----------------|--|--|
| SimaPro | <ul style="list-style-type: none"> ■ Calcula la huella de carbono, huella hídrica y huella ambiental de la Unión Europea del producto ■ Brinda la Declaración Ambiental del Producto ■ Realiza un reporte del ACV completo ■ Ofrece consultoría ■ Modela productos alternativos ■ Calcula impactos según la ISO 14040 (caracterización, normalización y valoración) ■ Base de datos de las más completas (documentadas con fuente): incluye Ecoinvent, ILCD, Agri-footprint, entre otras; y permite crear una base de datos propia ■ Posee métodos de evaluación como ReCiPe 2016, EPD, Impact 2002, ILCD 2011 Midpoint+, CML – IA baseline, IPCC 2013 y Traci 2.1 ■ Se requiere descargar y licencia | (SimaPro, 2020); (Ecochain, 2020); (Martin Navarro, 2012);(ISM, 2020b) |

Cuadro 2.4. Continuación. Resumen de algunos softwares utilizados para la evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida de un producto.

| Software | Características | Referencias |
|-----------------|--|---|
| OpenLCA | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcula la huella del producto ▪ Brinda la Declaración Ambiental del Producto ▪ Ofrece consultoría ▪ Modela productos alternativos ▪ Integra costes del ciclo de vida y evaluación social ▪ Incluye las bases de datos GaBi Database Content, Ecoinvent, ProBas, SHD, USDA, PSILCA, entre otras ▪ Se requiere descargar y es gratis | (OpenLCA, 2020); (Ecochain, 2020) |
| GaBi | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcula la huella de carbono, huella hídrica y huella ambiental de la Unión Europea del producto ▪ Brinda la Declaración Ambiental del Producto ▪ Realiza un reporte del ACV completo ▪ Ofrece consultoría ▪ Modela productos alternativos ▪ Incluye las bases de datos GaBi Professional, Ecoinvent, ILCD-ELCD, US LCI, entre otras ▪ Posee métodos de evaluación como ReCiPe 2016, ILCD 2011 Midpoint+, CML – IA baseline, IPCC 2013 y Traci 2.1 ▪ Permite simular entradas y salidas complejas ▪ Asocia costos a los flujos ▪ Se pueden introducir pasos de los procesos y dirección de flujos ▪ Se requiere descargar y licencia | (Sphera, 2020); (Ecochain, 2020); (Martín Navarro, 2012); (ISM, 2020a) |

Cuadro 2.4. Continuación. Resumen de algunos softwares utilizados para la evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida de un producto.

| Software | Características | Referencias |
|-----------------|---|---|
| Umberto | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Versiones de prueba gratuitas ▪ Calcula la huella de carbono del producto y balances de CO₂ ▪ Integra análisis de costos ▪ Incluye la base de datos GaBi Database Content y Ecoinvent ▪ Posee más de 400 módulos de procesos estándar y se pueden crear módulos nuevos ▪ Tiene versión de consulta, educativa y profesional | (IFU-Hamburg, 2020); (Martin Navarro, 2012) |
| Ecochain | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcula la huella del producto ▪ Brinda la Declaración Ambiental del Producto ▪ Realiza un reporte del ACV completo ▪ Ofrece consultoría ▪ Se utiliza online y tiene una versión gratuita | (Ecochain, 2020) |

2.14. Métodos de evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida

La evaluación de impactos se encarga de determinar qué tan significativos resultan los impactos ambientales del Inventario del Ciclo de Vida, asociándolos a diversas categorías de impacto (Ruíz López, 2016). Según Antón Vallejo (2004), los diferentes métodos de evaluación se diferencian, en muchos casos, dependiendo de los efectos que evalúen, ya sea el efecto último (“*endpoints*”) o efectos intermedios (“*midpoint*”), tal como se indica en la Figura 2.13. La autora indica que es más común utilizar categorías de impacto intermedias, pues se encuentran más cercanas a la intervención ambiental, por lo que brindan más información de en qué punto y

de qué forma se afecta el medio ambiente; mientras que para los efectos finales, aunque son más relevantes a nivel social, no hay metodologías plenamente desarrolladas para su estudio, por lo que existe más incertidumbre asociada.

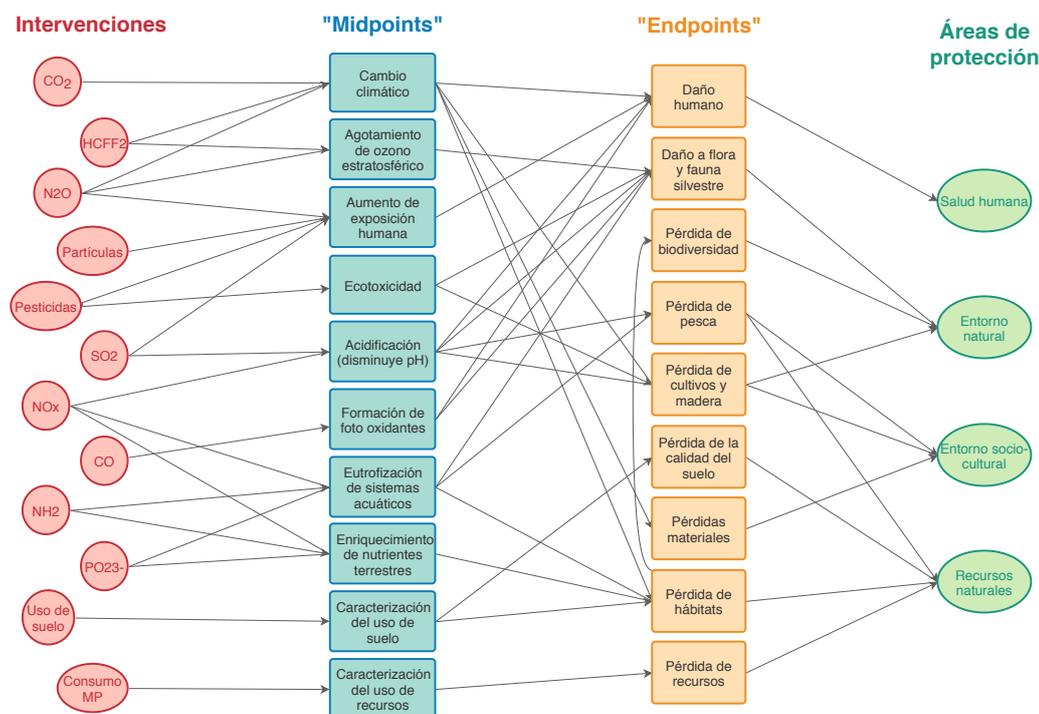


Figura 2.13. Metodología de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, con relaciones entre ejemplos de impactos de efectos intermedios “midpoints” y efectos últimos “endpoints” (Antón Vallejo, 2004).

Como se mencionó, actualmente existen diversas metodologías que permiten convertir el Inventario del Ciclo de Vida en impactos, usando indicadores ambientales, coeficientes de caracterización, normalización y ponderación; a continuación, se muestran algunas de estas, según (Leiva, 2016); (Ruíz López, 2016); (Antón Vallejo, 2004); (Fernández Fernández, 2018) y (Vivancos Bono *et al.*, 2005).

- CML 2016:** Esta metodología, desarrollada en la Universidad de Lieden, Holanda. Utiliza datos globales y europeos para las categorías de impacto y un enfoque “*midpoint*”, entre las categorías que analiza se encuentran: agotamiento de recursos abióticos, uso de suelo, cambio climático, agotamiento de ozono estratosférico, toxicidad humana, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización, for-

mación de ozono fotoquímico y agotamiento de recursos no renovables; cubre hasta 800 sustancias y tiene, en su mayoría, horizontes temporales infinitos, excepto para el potencial de cambio climático (100 años). Cubre las fases de clasificación, caracterización y normalización.

- **Eco-indicator 99:** Esta metodología fue desarrollada en Holanda por la consultora PRé. Utiliza, principalmente, datos europeos para las categorías de impacto y un enfoque “*endpoint*”; entre las categorías que analiza se encuentran: daños a la salud humana, daños a la calidad del ecosistema, daños a los recursos, uso de suelo, cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, carcinogénicos, respiratorios orgánicos e inorgánicos, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos minerales y fósiles; cubre hasta 391 sustancias y tiene horizontes temporales de alrededor de 100 años. Cubre las fases de clasificación, caracterización y normalización, agrupación y ponderación. Este expresa la carga medio ambiental total del producto en una puntuación única; ponderando las categorías de daño a los recursos, daños al ecosistema y daños a la salud humana.
- **Environmental Design of Industrial Products (EDIP 2003):** Esta metodología fue desarrollada en la Universidad Técnica de Dinamarca. Utiliza datos globales y europeos para las categorías de impacto (que se pueden organizar en globales, regionales o locales, siendo estas dos últimas sólo para Europa) y un enfoque “*midpoint*”; entre las categorías que analiza se encuentran: cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización, toxicidad humana y ruido; cubre hasta 500 sustancias y tiene horizontes temporales infinitos. Cubre las fases de clasificación, caracterización y normalización.
- **Impact 2002+:** Esta metodología fue desarrollada por el Instituto Federal de Tecnología de Lausana en Suiza. Utiliza datos europeos para las categorías de impacto y enfoques “*midpoint*” y “*endpoint*”; entre las categorías que analiza se encuentran: daños a la salud humana, daños a la calidad del ecosistema, daños a los recursos, cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, formación

de oxidantes fotoquímicos, eco-toxicidad, acidificación, eutrofización, toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, uso de suelo y energías no renovables; cubre hasta 1 500 sustancias y tiene horizontes temporales infinitos. Cubre las fases de clasificación, caracterización, normalización, agrupación y ponderación.

- **ReCiPe:** Esta metodología fue desarrollada en Holanda, combinando los métodos CML 2001 y Eco-indicator 99. Utiliza datos globales (cambio climático, agotamiento de la capa de ozono y recursos) y europeos para las categorías de impacto y enfoques “*midpoint*” y “*endpoint*”; entre las categorías que analiza se encuentran: daños a la salud humana, daños a la calidad del ecosistema, daños a los recursos, cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad (terrestre, marina y de agua dulce), acidificación, eutrofización, toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, uso de suelo y agotamiento de recursos naturales, minerales y de agua potable; cubre hasta 3 000 sustancias y tiene horizontes temporales de 20 años, 100 años o infinitos. Cubre las fases de clasificación, caracterización, normalización, agrupación y ponderación.
- **TRACI:** Esta metodología fue desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Utiliza datos de EEUU para las categorías de impacto y un enfoque “*midpoint*”; entre las categorías que analiza se encuentran: daños a la salud humana, daños a la calidad del ecosistema, daños a los recursos, cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización, salud humana y agotamiento de carburantes fósiles; cubre hasta 3 000 sustancias y tiene horizontes temporales infinitos, excepto para el potencial de cambio climático (100 años). Cubre las fases de clasificación, caracterización, normalización, agrupación y ponderación.
- **Environmental Priority Strategy in Product Design (EPS 2015):** Esta metodología fue desarrollada en Suecia. Utiliza datos de globales y de Suiza (biodiversidad) para las categorías de impacto y un enfoque “*endpoint*”; entre

las categorías que analiza se encuentran: daños a la salud humana, capacidad de producción de ecosistema, biodiversidad, stock de recursos abióticos, salud humana, ambiente natural, recursos naturales y agotamiento de reservas fósiles y minerales; cubre hasta 200 sustancias y tiene horizontes temporales infinitos, excepto para el potencial de cambio climático (100 años). Cubre las fases de clasificación, caracterización y ponderación.

- **Cumulative Energy Requirement Analysis (CERA):** Esta metodología fue desarrollada por la Asociación de Ingenieros Alemanes y está destinada a analizar el uso de energía a lo largo del Ciclo de Vida del Producto.
- **IPCC 2014:** Esta metodología fue desarrollada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático y elabora inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero.
- **ILCD 2011:** Esta metodología fue desarrollada en Europa. Utiliza datos europeos; entre las categorías que analiza se encuentran: cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, sustancias inorgánicas con efectos respiratorios, radiaciones ionizantes, potencial de formación de ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, agotamiento de recursos del agua y agotamiento de reservas fósiles y minerales. Cubre las fases de clasificación, caracterización y normalización.

2.15. Análisis del ciclo de vida de biocrudos

En los últimos años, se han realizado algunos estudios de análisis de ciclo de vida para la producción de biocrudo, sin embargo, no existen muchos estudios de análisis de ciclo de vida para procesos como licuefacción hidrotérmica de biomásas lignocelulósicas o residuos agrícolas (Adams *et al.*, 2018), (Bennion *et al.*, 2015), (Hsu, 2012), (Frank *et al.*, 2013). A continuación, en el Cuadro 2.5, se presenta información resumen de algunos análisis de ciclo de vida concernientes a biocrudos.

Cuadro 2.5. Resumen de estudios de análisis de ciclos de vida para biocrudos y sus resultados.

| Materia prima | Tecnología utilizada | Productos | Emisiones / Impacto | Tipo ACV | País de estudio | Referencias |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|-------------------|--------------------------------|
| Algas | LHT / pirólisis | Biodiesel (biocrudo mejorado) | LHT: 11,4 g CO _{2-<i>eq</i>} / MJ biodiesel Pirólisis: 210 g CO _{2-<i>eq</i>} / MJ biodiesel | De la cuna a la distribución al cliente | Estados Unidos | (Bennion <i>et al.</i> , 2015) |
| Algas | LHT / extracción lipídica | Biodiesel (biocrudo mejorado) | LHT: 29,38 g CO _{2-<i>eq</i>} / MJ biodiesel Pirólisis: 20,38 g CO _{2-<i>eq</i>} / MJ biodiesel | De la cuna a la tumba | Estados Unidos | (Frank <i>et al.</i> , 2013) |
| Racimo frutas vacías de palma aceitera | LHT / pirólisis | Biocrudo | LHT: 2,29 kg CO _{2-<i>eq</i>} / kg biocrudo Pirólisis: 4,46 kg CO _{2-<i>eq</i>} / kg biocrudo | De la cuna a la puerta | Filipinas y Japón | (Chan <i>et al.</i> , 2016) |
| Residuos forestales | Pirólisis rápida con hidrocresamiento | Gasolina / Diesel (biocrudo mejorado) | Gasolina: 117 g CO _{2-<i>eq</i>} / km viajado Diesel: 98 g CO _{2-<i>eq</i>} / km viajado | De la cuna a las llantas (uso) | Estados Unidos | (Hsu, 2012) |

Cuadro 2.5. Continuación. Resumen de estudios de análisis de ciclos de vida para biocrudos y sus resultados.

| Materia prima | Tecnología utilizada | Productos | Emisiones / Impacto | Tipo ACV | País de estudio | Referencias |
|---------------------|-----------------------------|--|--|---|-----------------|-------------------------------|
| Residuos forestales | Pirólisis rápida | Energía por combustión del biocrudo con combustibles fósiles | Producción del biocrudo: 0,42 g CO _{2-<i>eq</i>} / MJ biocrudo quemando: 160 g CO _{2-<i>eq</i>} / kWh Turbina de gas del ciclo combinado: 45 g CO _{2-<i>eq</i>} / kWh Generador de diésel: 40 g CO _{2-<i>eq</i>} / kWh | De la cuna a la tumba | Estados Unidos | (Fan <i>et al.</i> , 2011) |
| Algas | Extracción y esterificación | Energía por combustión en motor de diésel | GWP (potencial de cambio climático): 1,7 Destrucción de la capa de ozono: 1 Acidificación: 1 | De la cuna a la tumba (según categorías de impacto) | Francia | (Lardon <i>et al.</i> , 2009) |
| Residuos forestales | LHT | 100 millones de litros biocombustible (biocrudo mejorado) | (12,67 ± 1,46) g CO _{2-<i>eq</i>} / MJ biocombustible | De la cuna a la tumba (dato reportado para el proceso de LHT) | Canadá | (Nie y Bi, 2018) |

2.16. Economía circular del rastrojo de piña en Costa Rica

La economía circular es una estrategia que busca reorganizar los sistemas de producción en favor del medio ambiente y los seres vivos hacia un modelo de desarrollo sostenible; de esta forma, persigue cambiar la manera de producir y consumir bienes de una economía lineal; la cual se basa en producir, usar y desechar. El sistema de producción lineal se ha vuelto cada vez más difícil de implementar y sustentar, debido al agotamiento de los recursos. Es así que la economía circular busca diseñar productos sin desechos (ecodiseño), productos cuyo desmonte y reutilización sea sencillo, y definir modelos empresariales socialmente inteligentes, donde los fabricantes pudieran económicamente recoger los desechos de sus productos ya utilizados, volver a fabricarlos y distribuirlos (Balboa y Somonte, 2014).

A partir de lo anterior, esta economía busca extraer sus materias primas del entorno; transformarlas con procesos los más sostenibles posible; distribuirlos a los clientes, de la manera más eficiente (en términos de empaques, rutas y demás) para reducir el impacto ambiental; poner el producto a disposición de los clientes, quienes le darán su uso respectivo; y, finalmente, recuperar los residuos, lo cual se puede hacer permitiendo que los clientes devuelvan el producto después de su uso, para permitir devolverlo a la biosfera o reincorporarlo al sistema de producción u otro proceso industrial, donde este desecho funcione como la nueva materia prima (Sandoval *et al.*, 2017). Según Balboa y Somonte (2014), indican que hay tres niveles de economía circular: el primero, donde se reduce el consumo de recursos y emisiones y se reciclan componentes del producto final; el segundo, donde se reciclan y reutilizan recursos en parques eco-industriales e industrias encadenadas; y el tercero, donde se integran diversos sistemas de producción y consumos locales, de manera que los recursos circularon de una a otra industria y entre los sistemas urbanos. En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo del modelo que se plantea para la economía circular.

Según lo anteriormente expuesto, y tomando en cuenta la actividad de producción y generación de desechos de la piña en Costa Rica (sección 2.6 de este Maco Teórico); la actividad de reutilizar el rastrojo de piña como materia prima dentro de otra industria productiva, como lo es la producción de biocrudo; permite clasificar este manejo de residuos dentro del tercer nivel de economía circular indicado por Balboa

y Somonte (2014).



Figura 2.14. Diagrama del modelo de sistemas productivos utilizando como base la economía circular (Balboa y Somonte, 2014).

3. Simulación y diseño conceptual de la biorefinería para producir biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica

3.1. Estudio de mercado de la producción de piña en Costa Rica

El diseño conceptual de la planta de producción industrial de biocrudo comenzó con un estudio de mercado considerando la disponibilidad de materia prima.

Costa Rica es el mayor productor de piñas a nivel mundial, con 65 600 hectáreas de piña sembrada en el 2018 (Christian *et al.*, 2020). A partir de los datos proporcionados por Peña Bonilla (2018), quien indica que se obtienen alrededor de 210 toneladas de rastrojo de piña húmedo por cada hectárea de cultivo, se estimó que, para el 2018, se produjeron aproximadamente 13,7 millones de toneladas húmedas de rastrojo de piña.

En Costa Rica se desarrollan diversos estudios para la utilización del rastrojo de piña como materia prima para diversos productos. Estas actividades se considerarían como potenciales competidores por el rastrojo de piña como materia prima si llegasen a desarrollarse en el sector industrial. Según CANAPEP (2017), en Costa Rica existen dos empresas productoras de bromelina a partir de rastrojo de piña, ubicadas en Guanacaste. Según Méndez Masís (2021), estas empresas captan alrededor de 1 tonelada anual de desechos del empacado de piña, en la región Chorotega del país y en Pital, por lo que no serían un competidor directo para el rastrojo de piña.

A partir de lo anterior, se plantea colocar la planta productora en un sector del país que pueda abastecer de satisfactoriamente la demanda de rastrojo de piña. Para esto, se propone el sector norte del país, ya que es aquí donde se concentra la mayor producción de piña (49 % para el 2019, según se aprecia en la Figura 2.6) y en donde, además, no se reporta algún competidor fuerte por la materia prima, pues estudios como la producción de hongos ostra en la región Huetar Norte aún se encuentra en su fase de investigación (CANAPEP, 2018).

Además, en un informe nacional presentado por Christian *et al.* (2020) en re-

presentación del Proyecto Monitoreo de Cambio de Uso en Paisajes Productivos (MOCUPP) del CONARE, indican que los cantones de la Región Huetar Norte con mayor área cultivada de piña para el 2018 son San Carlos, Los Chiles, Sarapiquí y Río Cuarto, con 18 mil, 8 mil, 6 mil y 5 mil hectáreas, respectivamente. Esta distribución de cultivo se puede apreciar en la Figura 3.15. El cantón de San Carlos resulta ser el principal productor de piña de la región norte del país, por lo que se propone colocar la planta productora, en esta zona.

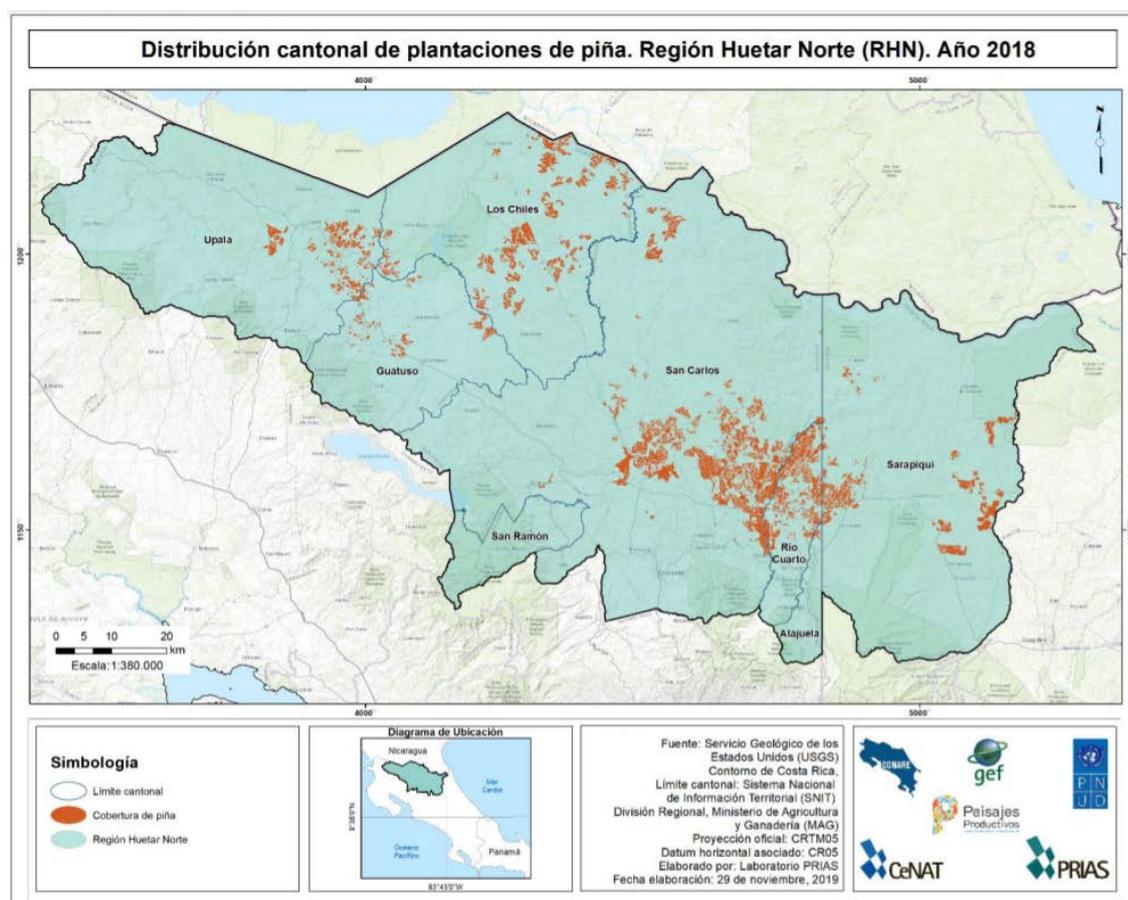


Figura 3.15. Distribución cantonal de plantaciones de piña en la Región Huetar Norte de Costa Rica para el año 2018 (Christian *et al.*, 2020).

3.2. Ubicación de la planta según disponibilidad de materia prima

Como se puede apreciar en la Figura 3.16, el distrito con mayor producción de piña es Pital, con un área de cultivo de 7 500 hectáreas, seguido por Cutris, con 4

800 hectáreas y Santa Isabel con 4 160 hectáreas (Christian *et al.*, 2020). En primer instancia, se propone colocar la empresa en Pital, que se encuentra en medio de Cutris y Santa Isabel.

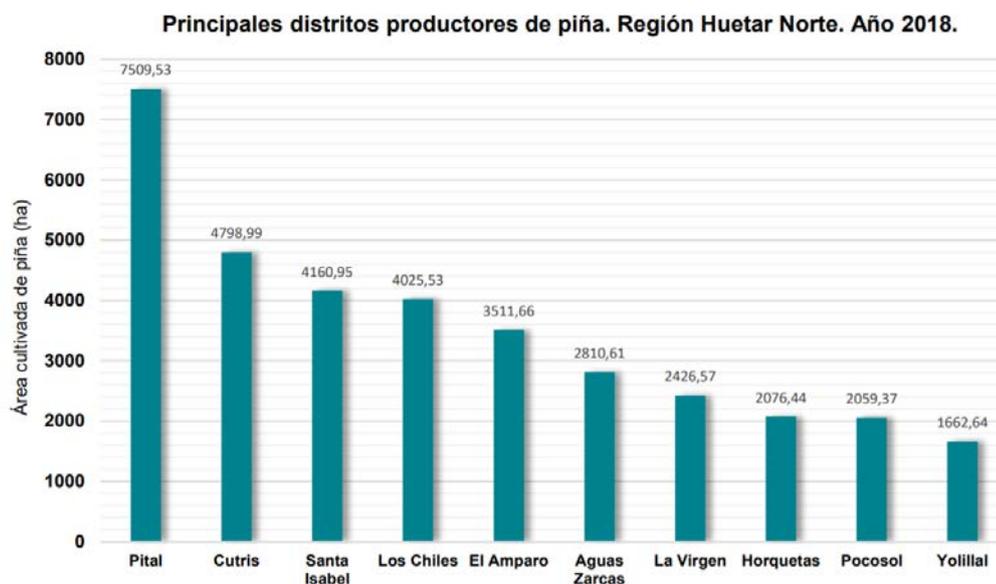


Figura 3.16. Hectáreas cultivadas en los principales distritos productores de piña en la Región Huetar Norte de Costa Rica para el año 2018 (Christian *et al.*, 2020).

Con base en los datos brindados por Peña Bonilla (2018), se estima que en las 7 500 hectáreas de cultivo de Pital se producen alrededor de 1,5 millones de toneladas de rastrojo de piña húmedo, según se aprecia en la siguiente ecuación 5:

$$m_{\text{rastrojo}} = 7\,500 \text{ ha} \cdot \frac{210 \text{ ton}}{1 \text{ ha}} = 1\,575\,000 \text{ ton} \quad (5)$$

Por otro lado, los distritos de Pital, Cutris y Santa Isabel se encuentran muy próximos entre sí y suman un área total de cultivo de alrededor de 16 460 hectáreas, por lo que se propone que inicialmente se extraiga la materia prima de las fincas de Pital; con la posibilidad de extender la demanda a otros sectores de la región, como por ejemplo, Cutris, Santa Isabel, Los Chiles y El Amparo, tomando en cuenta las distancias de transporte para el Análisis de Ciclo de Vida. La ubicación geográfica de estos distritos se aprecia, de mejor manera, en la Figura 3.17.

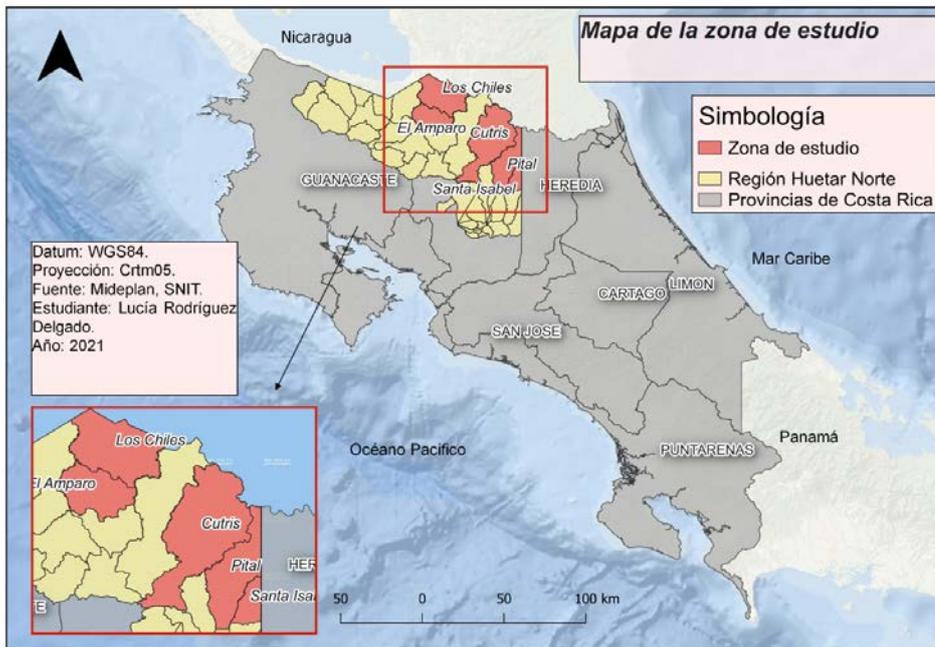


Figura 3.17. Ubicación geográfica de los distritos en estudio de la Región Huetar Norte.

3.3. Generalidades de la simulación del proceso

De la mano con el diseño conceptual de la planta, se realizó una simulación. Con esta se verificaron y obtuvieron los flujos másicos y energéticos del proceso. El proceso de simulación se llevó a cabo utilizando el programa Aspen Plus V11. El paquete termodinámico escogido para estimar las propiedades de estado del proceso fue el NRTL-RK (Aspen Technology, 2000). Este paquete utiliza el modelo de coeficientes de actividad NRTL para la fase líquida y el Redlich-Kwong para la fase vapor. El modelo NRTL es recomendado para sistemas químicos altamente no ideales (Renon y Prausnitz, 1968). Y el modelo Redlich-Kwong se recomienda para aplicaciones de procesamiento de hidrocarburos (Mathias, 1983). Debido a lo anterior, el paquete NRTL-RK es adecuado para la simulación del proceso de licuefacción hidrotérmica del rastrojo de pña.

3.4. Introducción de compuestos y propiedades al programa

Se introdujeron al programa los reactivos y productos. Los compuestos sólidos de esta investigación (biomasa de rastrojo de pña y cenizas del “*hydrochar*”) se

definieron en el programa como “comopuestos no tradicionales” y sus propiedades de entalpía y densidad se simularon mediante los modelos HCOALGEN y DCOALIGT, respectivamente; pues son los modelos recomendados para compuestos derivados del carbono (Aspen Technology, 2000), (Magdeldin *et al.*, 2017).

De igual manera, en la sección de “Propiedades de Métodos para Componentes No Convencionales”, se seleccionó para el rastreo de paja una opción que permite introducir manualmente el dato de calor de combustión (16,08 MJ/kg) de la biomasa (AspenTech, 2001), (AspenTech, 2013), (Aspen Technology, 2000). Es importante resaltar que esto sólo se realizó para el rastreo de paja, ya que sólo se contaba con valores experimentales de este, sin embargo, las guías del programa Aspen indican que el método encontrado por defecto en el programa es aceptable para compuestos como las cenizas (AspenTech, 2013).

Seguidamente, el rastreo de paja es un compuesto no convencional, cuyos datos no se tienen registrados en el programa, se debió introducir la información correspondiente de forma manual. Estos datos se reportan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Datos relacionados a la biomasa de rastreo de paja introducidos en el simulador Aspen Plus (Ulate Sancho, 2020), (Mansor *et al.*, 2018), (Vargas *et al.*, 2019), (Quesada Solís *et al.*, 2005), (Mata Monge, 2019).

| Dato | Valor |
|---------------------------------------|-------|
| Contenido de humedad / % | 77,73 |
| Contenido de humedad en base seca / % | 12,80 |
| Materia volátil / % | 50,52 |
| Carbón fijado / % | 29,38 |
| Contenido de cenizas / % | 7,30 |
| Calor de combustión / MJ/kg | 16,08 |
| Contenido de carbón / % | 40,60 |
| Contenido de hidrógeno / % | 6,26 |
| Contenido de nitrógeno / % | 1,36 |
| Contenido de oxígeno / % | 51,50 |
| Contenido de azufre / % | 0,18 |

De igual manera, el sólido que se obtiene de la reacción, también conocido como “*hydrochar*”, se modeló como la mezcla de un compuesto no convencional (cenizas) y carbono. Los parámetros introducidos en el programa se muestran en el Cuadro

3.2. Experimentalmente sólo se obtuvo el calor de combustión del hydrochar y no se caracterizó la composición química de este producto, por lo que los datos utilizados corresponden a sólidos obtenidos por licuefacción hidrotérmica de biomásas similares al rastrojo de piña, en cuanto composición de lignina, celulosa y hemicelulosa.

Cuadro 3.2. Datos relacionados al sólido “*hydrochar*” obtenido de la LHT de rastrojo de piña introducidos en el simulador Aspen Plus (Ulate Sanchez, 2020), (Mathanker *et al.*, 2020).

| Dato | Valor |
|-----------------------------|--------|
| Contenido de carbón / % | 68,00 |
| Contenido de cenizas / % | 32,00 |
| Calor de combustión / MJ/kg | 27,567 |

Por su parte, el biocrudo obtenido experimentalmente se caracterizó por medio de una cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC / MS), con lo cual se obtuvo una distribución de probabilidad de compuestos presentes en la matriz del biocrudo, los cuales se muestran en el Cuadro 3.3 y se introdujeron al programa Aspen Plus.

En cuanto a la fase acuosa, esta no fue caracterizada experimentalmente. Sin embargo, se encontraron fuentes bibliográficas que reportan las corrientes de procesos de licuefacción hidrotérmica para biomásas lignocelulósicas similares al rastrojo de piña. La caracterización de la fase acuosa resultante del rastrojo de piña se calculó como el promedio del contenido y porcentaje de los componentes encontrados en las referencias. Estos se muestran en el Cuadro 3.4.

La fase gaseosa no fue caracterizada ni cuantificada de manera experimental, sin embargo, al simulador se introdujeron datos teóricos, tanto del rendimiento total de esta fase, como la composición comúnmente encontrada para esta en este tipo de procesos. Esta composición se normalizó para un rendimiento másico. Esta información se encuentra tabulada en el Cuadro 3.5

Cuadro 3.3. Moléculas con mayor presencia en el biocrudo de LHT de rastrojo de piña Ulate Sancho (2020).

| Molécula | Presencia / % |
|--|---------------|
| 4-etilfenol | 7,2 |
| 4-etil-2-metoxifenol | 4,9 |
| 3-Metoxi-2-naftol | 3,6 |
| Fenol | 7,8 |
| 2,6-dimetoxifenol | 2,1 |
| Ácido n-hexadecanoico | 20,1 |
| Ácido 9,12-Octadecadienoico (Z,Z) | 13,9 |
| Dietilftalato | 3,0 |
| Vainillina | 1,3 |
| p-Xileno | 0,7 |
| 6-Metoxiluteolina | 0,3 |
| Estigmasta-3,5-dieno | 8,8 |
| 3, 5, 7-Trihidroxi-2H-1-Benzopiran-2-ona | 3,7 |
| Ciclotridecano | 2,9 |
| 2,5-Hexanodiona | 5,4 |
| 1-(2-Furanil)-etanona | 5,1 |
| 2-Metil,2-ciclopenten-1-ona | 5,4 |
| Clorambucilo | 0,4 |
| Trifluoracetato-5Beta-Clorestan-3-alpha-ol | 0,3 |
| Bis-trifluoracetato-5Beta-pregnane3alpha, 20alpha-diol | 0,6 |
| 3'-Dephospho coenzima A | 0,5 |
| 11-Octadecanonitrilo | 0,4 |
| 3'-Hidroxido de 5,6,7,4'- tetrametoxiflavona | 0,5 |
| 3-Hidroxido de 2',4,4',6'- tetrametoxichalcona | 0,1 |

Cuadro 3.4. Compuestos presentes en la fase acuosa resultante del proceso LHT y su composición (Watson *et al.*, 2020), (Madsen *et al.*, 2016), (Madsen *et al.*, 2017), (Villadsen *et al.*, 2012) .

| Compuesto | Rastrojo de Maíz (%) | DDGS (%) | Rastrojo de Piña (%) |
|-------------------------|----------------------|----------|----------------------|
| Biomasa | | | |
| Celulosa | 45,06 | 10,34 | 32,20 |
| Hemicelulosa | 29,68 | 24,75 | 21,00 |
| Lignina | 5,65 | 1,27 | 2,83 |
| Fase acuosa | | | |
| Agua | 96,68 | 99,43 | 97,12 |
| Ácido acético | 0,878 | 0,1885 | 0,5332 |
| Ácido 4-metilpentanóico | - | 0,0054 | 0,0054 |
| Ácido 4-oxohexanóico | - | 0,0684 | 0,0684 |
| Ácido glicocílico | 1,678 | - | 1,678 |
| Ácido succínico | - | 0,1423 | 0,1423 |
| Ácido levulínico | - | 0,0225 | 0,0225 |
| Ácido hexadecanóico | - | 0,002 | 0,002 |
| Metanol | 0,203 | - | 0,203 |
| Etanol | 0,068 | - | 0,068 |
| Ciclopentanona | 0,017 | 0,0105 | 0,0138 |
| Fenol | 0,030 | 0,00695 | 0,0185 |

Cuadro 3.5. Compuestos presentes en la fase gaseosa resultante del proceso LHT y su porcentaje de composición (Cao *et al.*, 2017).

| Compuesto | Presencia / % |
|---------------------|---------------|
| Dióxido de carbono | 90,97 |
| Hidrógeno | 0,92 |
| Monóxido de carbono | 7,27 |
| Metano | 0,84 |

3.5. Planteamiento del proceso de producción del biocrudo mediante la simulación

Para producir el biocrudo a nivel industrial, se plantea seguir una serie de etapas generales descritas en la Figura 3.18.



Figura 3.18. Etapas generales del proceso de producción de biocrudo via LHT propuesto.

Experimentalmente, se determinó que el proceso de LHT a 325 °C durante 1 h y a 300 °C durante 0,793 h produce en ambos escenarios un rendimiento de biocrudo de 43.4% (Ulate Sancho, 2020). Debido a lo anterior, se decidió utilizar las condiciones de reacción de 300 °C y 0,793 h, pues estas generan un ahorro de tiempo y electricidad, y se obtiene el mismo rendimiento.

Así mismo, en el Cuadro 3.6 se muestra el cambio de la temperatura y presión a distintos tiempos. De esta forma, es posible observar que en el laboratorio se tomó un tiempo de 85 min en calentarse el reactor para tener las condiciones necesarias para llevar a cabo la reacción de LHT, la cual duró 48 min, para finalmente tomar 33 min en enfriarse nuevamente a condiciones ambientales.

Cuadro 3.6. Resumen de las condiciones de la reacción LHT a escala de laboratorio basada en (Ulate Sancho, 2020).

| Tiempo, t / min | Temperatura, T / °C | Presión, P / psi |
|---|-----------------------|--------------------|
| 0 | 19,8 | 15 |
| 85 | 299,1 | 1 251 |
| 133 | 335,8 | 1 282 |
| 166 | 19,1 | 45 |
| Tiempo total de reacción, τ / h | | 0,793 |
| Volumen de agua, V_A / mL | | 170 |
| Masa total de rastrojo, m_{TOT} / g | | 30 |
| Volumen total del reactor, V_{react} / mL | | 300 |
| Volumen utilizado del reactor, V_{react} / mL | | 200 |

Inicialmente, se propuso escalar el sistema en un proceso batch, como el que se llevaba a cabo en el laboratorio. Para esto, se utilizarían 5 reactores de 2 000 L,

en los cuales se procesaría 1,5 t/d de rastrojo de piña, y se obtendría 48,71 t/a de biocrudo. Sin embargo, Jazrawi *et al.* (2013) indican que una planta continua es más recomendable, debido a que económicamente es más rentable y se puede controlar de mejor manera a nivel químico, así como realizar una integración térmica más exitosa.

Debido a lo anterior, a diferencia del proceso de laboratorio, a nivel industrial se plantea una operación continua, debido a su rentabilidad técnica y económica. Las etapas previamente descritas se observan en la Figura 3.19 como una disposición de equipos y se describen en esta sección. De igual manera, este diagrama de flujo se puede apreciar de mejor manera en los Anexos del presente documento.

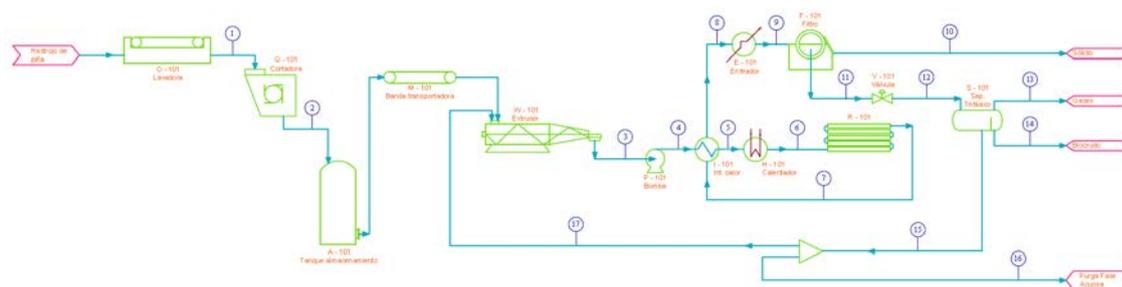


Figura 3.19. Proceso de producción de biocrudo via LHT propuesto.

El proceso planteado se introdujo dentro del software AspenPlus. En esta simulación, se recircula la fase acuosa con todos sus compuestos. Según Yin *et al.* (2021) esta recirculación resulta beneficiosa sobre el rendimiento de biocrudo, debido a que se promueve el enriquecimiento de ácidos orgánicos y alcoholes, además de la conversión de cetonas y fenoles en esta fase, los cuales son compuestos comunes del biocrudo. El autor indica que este reciclaje mejora, a su vez, la calidad del biocrudo, pues se disminuye también el contenido de oxígeno. Se menciona, de igual manera, que el impacto negativo que conlleva este proceso es la deposición de sólidos, que puede disminuir la eficiencia de la licuefacción hidrotérmica, sin embargo, luego de varias recirculaciones, se observó la formación de microesferas de carbono y partículas de sales (como potasio y calcio) que pueden funcionar como catalizadores de la reacción.

Para evitar la formación excesiva de sólidos y mantener lo más posible la relación

de 15% de biomasa al inicio del proceso, y así mantener los datos de rendimiento lo más exactos a los experimentales, se coloca una purga de la fase acuosa. La simulación planteada se muestra en la Figura 3.20. Los balances de masa y energía obtenidos de la simulación en Aspen Plus se pueden consultar en el Apéndice A.5.

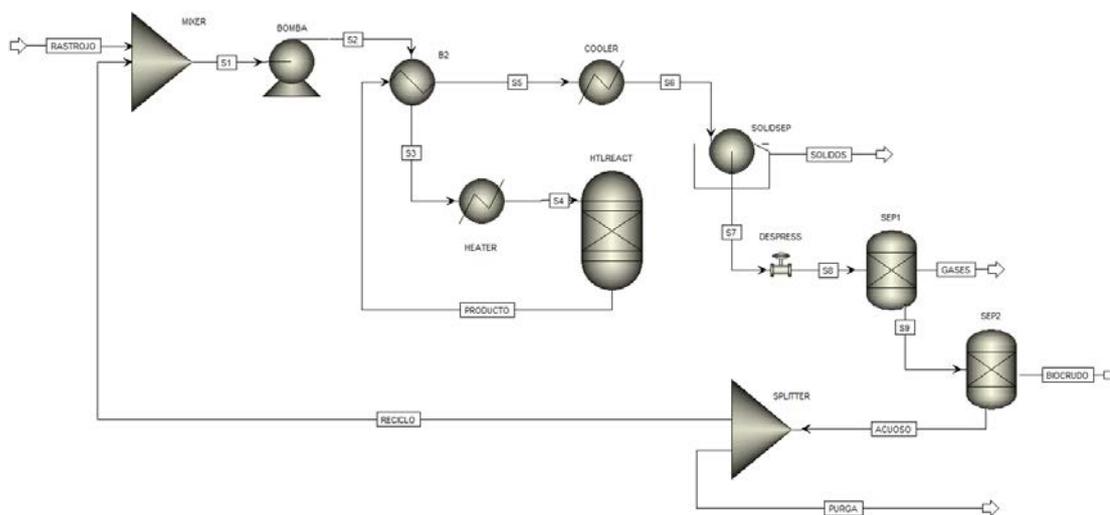


Figura 3.20. Simulación del proceso LHT de rastrojo de piña en el programa Aspen Plus con recirculación de todos los componentes de la fase acuosa.

A continuación, se describe cada proceso unitario presente en el sistema productivo de biocrudo a partir de licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña. De la mano con esta descripción, se detallan las condiciones de simulación propuestas para cada equipo, según corresponda.

3.5.1. Recolección del rastrojo de piña

El proceso productivo se plantea iniciar recolectando el rastrojo de Piña de Pital. Esta biomasa se traslada a la planta de procesamiento vía terrestre. Se propone recolectar la biomasa de forma semanal, pues al generarse constantemente a largo del año de producción, no es necesario captarla toda en un determinado momento del año. Así, no se requiere un mayor espacio de almacenamiento para preservar el rastrojo.

3.5.2. Pretratamiento de la biomasa (Lavado y disminución de tamaño del rastrojo de piña)

Una vez que el rastrojo se encuentre en la planta de producción, se propone que este pase por un proceso de lavado (O-101) para eliminar impurezas superficiales que puedan estar presentes, tales como suciedad proveniente de la tierra de cultivo, fertilizante, insectos, entre otros factores que podrían afectar su conservación.

Por otro lado, se propone la disminución del tamaño del rastrojo de piña en una cortadora (Q-101) para garantizar un mejor manejo de esta; además, según Magdeldin *et al.* (2017) se recomienda un tamaño de partícula de (0,5-1,5) cm para el proceso de LHT.

3.5.3. Conservación y almacenamiento de la biomasa

A nivel experimental, se recomendó utilizar un congelador cuya temperatura oscile entre los (-2 y -5) °C, debido a que bajo estas condiciones, el rastrojo se conservó por más de 6 meses. Sin embargo, Acuña Navarro (2018) indica que si se abandona el rastrojo en los terrenos de los productores, se requieren aproximadamente 13 meses para que este se descomponga en la tierra. Debido a que el tiempo de almacenamiento no es tan extenso, pues se procesaría semanalmente, no se recomienda utilizar refrigeradores para preservar la biomasa, sino que se propone almacenarla en condiciones ambiente en un tanque (A-101).

3.5.4. Transporte de la biomasa de la estación de almacenamiento hacia el extrusor

Para transportar la biomasa se propone la utilización de bandas industriales (M-101). Para esta operación es necesario tomar en cuenta que la biomasa requiere bandas que sean resistentes a la resina y otros aceites contenidos en la madera; por esta razón, Trelleborgs (sf) recomiendan las bandas lisas o Chevron, Ripcheck y bandas transportadoras deslizantes.

3.5.5. Mezclado y extrusión de los reactivos (biomasa y agua)

A nivel experimental no se realizó esta operación, sin embargo, Berglin *et al.* (2012) indican que las mezclas no homogéneas de biomasa lignocelulósicas tiende a sedimentar, por lo que se podrían tener bloqueos en la bomba o el reactor a causa de esta sedimentación. Una posible solución a esto corresponde a mezclar previamente la biomasa con el agua en la proporción definida y pasar esta mezcla por un extrusor (W-101), con el fin de crear una corriente más homogénea (“*slurry*”) capaz de ser alimentada fácil y continuamente dentro del reactor (Anastasakis *et al.*, 2018).

En el ambiente de la simulación, como primer paso se introdujeron las corrientes de rastrojo de piña y agua (la cual proviene del reciclo de la fase acuosa) en un mezclador, de forma tal que se obtuvo en la corriente de salida de este equipo una composición másica del 15 % con la masa húmeda.

3.5.6. Presurización de los reactivos (biomasa y agua)

Seguidamente, se colocó una bomba (P-101), debido a que a nivel industrial se necesitaría un equipo como este para transportar la mezcla hasta el reactor. La especificación de este equipo en el ambiente de simulación fue una presión de salida de 1251 psi, que corresponde a la presión a la cual se llevó a cabo la reacción a nivel de laboratorio.

3.5.7. Pre calentamiento del lodo biomásico (biomasa y agua)

Según el proceso experimental, el lodo biomásico se debe calentar hasta 300 °C para alcanzar la temperatura de reacción. En la simulación realizada, la bomba colocada no provoca un cambio en la temperatura de salida. Debido a lo anterior, se propone colocar un intercambiador de calor (I-101) que aumente la temperatura de la corriente de reactivos. Esta operación se realiza aprovechando el calor que posee la corriente que sale del reactor para precalentar el lodo biomásico que va a entrar a este equipo. Para esta operación, se simuló un intercambiador de calor (“HeatX”), al cual se le especificó una temperatura de salida de la corriente fría de 290 °C, de acuerdo con el siguiente análisis de pellizco.

Para este análisis, se tomaron del simulador los datos de flujos másicos y calor específico que poseían las corrientes que debían pasar por un cambio de temperatura, así como sus temperaturas iniciales y se definió, por medio de especificaciones del proceso, las temperaturas finales a las que debía llegar cada corriente. Estos datos se encuentran tabulados en el Cuadro 3.7.

Cuadro 3.7. Valores de flujos, temperaturas, calores específicos y capacidades caloríficas de las corrientes frías y calientes tomadas en consideración para el análisis del pellizco.

| Corriente | Flujo, F / kg/s | Tempe- ratura inicial, T_i / °C | Tempe- ratura final, T_f / °C | Calor espe- cífico, c / kJ/(kg · °C) | Calor es- pecífico promedio, c / kJ/(kg · °C) | Capacidad calorífica C_p / kW/°C |
|------------------------------------|----------------------|--|--|---|--|---|
| Producto | | | | 28,665 | | |
| H ₁ ↓ S ₅ | 1,591 | 300 | 90 | 5,3336 3,6515 | 12,550 | 19,967 |
| S ₂ | | | | 4,3396 | | |
| C ₁ ↓ S ₃ | 1,425 | 81,06 | 300 | 5,0664 6,1785 | 5,195 | 7,403 |

El estudio de red de intercambio se realizó utilizando una diferencia de temperatura mínima de 10 °C ($\Delta T_{min} = 10$ °C). Las condiciones de temperatura y capacidades caloríficas se muestran en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.8. Valores de temperaturas, temperaturas ajustadas y capacidades caloríficas de las corrientes frías y calientes para el análisis del pellizco, para un ΔT_{min} de 10 °C.

| Corriente | Temperatura inicial, T_i / °C | Temperatura final, T_f / °C | Capacidad calorífica C_p / kW/°C | Temperatura inicial ajustada, T_i^* / °C | Temperatura final ajustada, T_f^* / °C |
|----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|
| H ₁ | 300 | 90 | 19,967 | 295 | 85 |
| C ₁ | 81,06 | 300 | 7,403 | 86,06 | 305 |

Con estos, se planteó un diagrama de intervalos de temperatura (ver Figura 3.21). A partir de este, se calcularon los valores de entalpías asociadas, multiplicando la diferencia de las capacidades caloríficas por la diferencia de temperatura de cada intervalo.

| Intervalos de temperatura, $T^*/^{\circ}\text{C}$ | Corrientes | $\Delta T^*/^{\circ}\text{C}$ | $\Sigma C_{p,C} - \Sigma C_{p,H} / \text{kW}/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta H / \text{kW}$ |
|---|------------|-------------------------------|--|------------------------|
| 305 | C_1 | 10 | 7,403 | 74,026 |
| 295 | H_1 | 210 | -12,564 | -2638,538 |
| 86,06 | H_1 | 11,2 | 7,403 | 82,910 |
| 85 | C_1 | | | |

Figura 3.21. Diagrama de intervalos de temperatura para el diseño de la red de intercambiadores de calor, para un ΔT_{min} de 10°C .

Con los datos de entalpías, se realizó un diagrama en cascada, el cual se presenta en la Figura 3.22, y con el cual se obtuvieron los datos de requerimiento calor mínimo para calentadores y enfriadores de la red total. En dicha Figura se aprecia que en los 295°C se alcanza un valor de calor de 0 kW , por lo que se define el intervalo de $(290-300)^{\circ}\text{C}$ como el intervalo de pellizco de la red de intercambio.

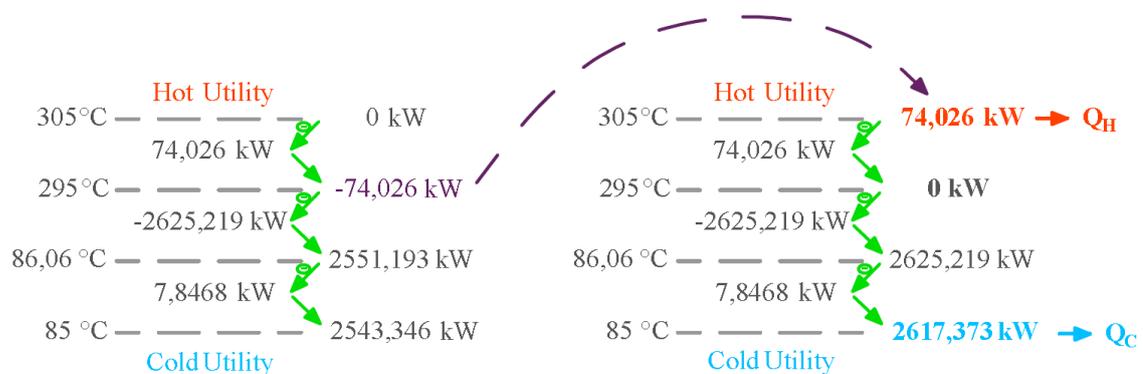


Figura 3.22. Diagrama en cascada para el diseño de la red de intercambiadores de calor, para un ΔT_{min} de 20°C .

Seguidamente, se realiza un análisis abajo del pellizco, con el cual se consideran las condiciones de las corrientes que se encuentran en el Cuadro 3.9. A partir de los datos anteriores, se elige satisfacer la corriente fría " C_1 " ($1583,720 \text{ kW}$) con la corriente caliente " H_1 " ($4193,092 \text{ kW}$), ya que la " C_1 " es menor. Con lo anterior se obtuvo una temperatura de salida de la corriente " H_1 " insatisfecha de 220°C . Con esto, para llevar esta corriente hasta los 90°C se requieren $2609,371 \text{ kW}$, que

corresponde al valor del requerimiento de calor “ Q_c ” mínimo, que se muestra en la Figura 3.22.

Cuadro 3.9. Valores de temperaturas y capacidades caloríficas de las corrientes frías y calientes analizadas abajo del pellizco para el cálculo de las demandas de calor de estas, para un ΔT_{min} de 20 °C.

| Corriente | Capacidad calorífica C_p / kW/°C | Temperatura inicial, T_i / °C | Temperatura final, T_f / °C | Demanda de calor Q / kW |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| H ₁ | 19,967 | 300 | 90 | 4193,092 |
| C ₁ | 7,403 | 81,06 | 290 | 1583,720 |

Luego, se corroboró que la diferencia de temperaturas en los extremos del intercambiador fueran como mínimo 10 °C ($\Delta T_{min}=10$ °C), esto se aprecia en la Figura 3.23. Es de este valor que se define la temperatura de salida de la corriente fría que se introduce al simulador (290 °C).



Figura 3.23. Cumplimiento de la diferencia de temperaturas en los extremos del intercambiador de calor colocado abajo del pellizco, para un ΔT_{min} de 10 °C.

3.5.8. Calentamiento de los reactivos (biomasa y agua)

A partir de la unidad de proceso anterior, se puede obtener que la temperatura máxima que se alcanza luego del intercambiador de calor es de 290 °C, por lo que se requiere un calentador (H-101) que aumente este valor hasta 300 °C que corresponde a la temperatura de reacción. Con esta información, el software indica que se requieren 123,83 kW (0,42 MMBtu/h) en el calentador para subir la temperatura del fluido hasta 300 °C. Para este equipo se eligió un modelo similar al de la sección anterior, pero con distintas especificaciones técnicas (ver Cuadro 4.10).

Este equipo debe una corriente de servicio a altas temperaturas para lograr la transferencia de calor requerida. Para esto, se propone utilizar una sal térmica de nitrato (60 % nitrato de sodio y 40 % nitrato de potasio), la cual puede alcanzar

temperaturas de trabajo de 565 °C (Bonk y Bauer, 2021). En el ámbito de la simulación, se designó que este servicio tendría un cambio de temperatura de 500 °C a 400 °C, el cual es suficiente para calentar los reactivos de 288 °C a 300 °C. Para simular esta corriente de servicio, se introdujeron los datos mostrados en el Cuadro 3.10 al software.

Cuadro 3.10. Datos relacionados a la utilidad de sal térmica de nitrato introducidos en el simulador Aspen Plus (Bonk y Bauer, 2021), (Bauer *et al.*, 2013).

| Dato | Valor |
|-----------------------------------|---------|
| Viscosidad / mPa · s | 3,452 |
| Conductividad térmica / W/(m · K) | 0,5501 |
| Densidad / kg/m ³ | 1712,33 |
| Poder calorífico / J/g | 113 |

3.5.9. Sistema de reacción LHT

A nivel industrial se plantea una operación continua. Para lo cual se propone utilizar un reactor PFR (reactor de flujo pistón, R-101), ya que permite procesar una alta cantidad de producto en poco tiempo.

Para la simulación del proceso de licuefacción hidrotérmica se utilizó un reactor de rendimiento. Lo anterior debido a que este equipo, en el programa AspenPlus, permite calcular balances de masa y energía sin necesidad de contar con la cinética ni estequiometría de reacción; ya que sólo requiere datos de rendimiento másico o molar de los productos, así como las condiciones de presión y temperatura de la reacción (Gagliano *et al.*, 2017). En este caso, el rendimiento se debe colocar como una base de la cantidad de reactivo o producto entre la cantidad total de la corriente de alimentación, tal como se muestra en la siguiente ecuación (Hussain, sf).

$$Rendimiento = \frac{Cantidad\ reactivo/producto}{Cantidad\ total\ corriente\ alimentacion} \cdot 100\% \quad (6)$$

A partir de los datos experimentales (ver Cuadro A.2) y la ecuación anteriormente descrita, se calcularon los rendimientos del reactor que se introdujeron al programa. Los valores obtenidos se encuentran tabulados en el Cuadro 3.11.

Cuadro 3.11. Valores de rendimientos del reactor introducidos en el simulador Aspen Plus, según la ecuación de rendimiento.

| Dato | Valor |
|-----------------------|-------|
| Biocrudo / % | 1,45 |
| Gases / % | 8,35 |
| Sólidos (Biochar) / % | 1,2 |
| Fase acuosa / % | 89,0 |

Ahora bien, cada fase del producto de reacción está integrada por diversos compuestos químicos. El rendimiento de cada compuesto en el reactor se introdujo siguiendo el cálculo mostrado en la ecuación (6). La cantidad de producto obtenida se calculó según las composiciones mostradas en los Cuadros 3.3, 3.4 y 3.5, para cada compuesto. El detalle del cálculo se puede apreciar en los apéndices del presente documento. A partir de lo anterior, se introdujeron los siguientes rendimientos al reactor de Aspen Plus (ver Cuadro 3.12).

Cuadro 3.12. Valores de rendimientos de cada compuesto obtenido en la reacción introducidos en el simulador Aspen Plus, en base másica.

| Dato | Rendimiento |
|----------------------------|-------------|
| Dióxido de carbono | 0,075959 |
| Hidrógeno | 0,000766 |
| Monóxido de carbono | 0,006074 |
| Metano | 0,000700 |
| 4-etilfenol | 0,001044 |
| Fenol | 0,001131 |
| Siringol | 0,000305 |
| Ácido n-hexánico | 0,002915 |
| Ácido linoléico | 0,002016 |
| Dietilftalato | 0,000435 |
| Vainillina | 0,000189 |
| p-xileno | 0,000102 |
| Ciclotridecano | 0,000421 |
| 2,5-hexanodiona | 0,000783 |
| 2-acetilfurano | 0,000058 |
| 2-metil-2ciclopenten-1-ona | 0,000783 |
| Estearonitrilo | 0,000058 |

Cuadro 3.12. Continuación. Valores de rendimientos de cada compuesto obtenido en la reacción introducidos en el simulador Aspen Plus, en base másica.

| Dato | Rendimiento |
|-----------------|-------------|
| Agua | 0,864368 |
| Ácido acético | 0,004745 |
| Ácido glicólico | 0,014934 |
| Metanol | 0,001807 |
| Ácido succínico | 0,001266 |
| Carbono | 0,008160 |
| Cenizas | 0,003840 |

3.5.10. Enfriamiento del producto de reacción

En cuanto al producto de reacción, este se propone enfriar hasta 90 °C, utilizando un intercambiador de calor (E-101), ya que esta se encuentra por debajo de la temperatura máxima de trabajo que soporta el filtro seleccionado para separar los sólidos. El equipo se simuló como un calentador, para el cual se especificó la presión de trabajo y temperatura de salida de 90 °C, utilizando agua de enfriamiento como utilidad, a la cual se le designó un cambio de temperatura de 15 °C a 20 °C. El simulador indicó que para enfriar esta corriente se requieren 2 082,19 kW.

3.5.11. Separación de la fase sólida

Para esta operación, se propone aprovechar la presión que trae la corriente del producto para separar, por medio de un filtro, la fase sólida del producto de reacción (F-101). El separador de sólidos se simuló como un filtro rotatorio, con una fracción de sólidos retenida en el filtro del 99 %, mientras que todo el líquido pasaría a través del filtro. Para la simulación, no se tomó en cuenta un cambio de presión debido al filtro, ya que no se tienen datos de este valor, por lo que la presión de salida se consideró igual a la de la entrada (1251 psi).

3.5.12. Despresurización del producto de reacción

En cuanto a la despresurización del producto que se obtiene de la reacción se propone una válvula (V-101) que pueda trabajar en los rangos de temperatura y

presión requerido. En la simulación se especificó la presión de salida y un equipo adiabático. Para esto, la presión de salida colocada fue de 45 psi, ya que corresponde al dato experimental con el que se contaba.

3.5.13. Separación trifásica de la fase líquida (acuosa y orgánica) y gaseosa del producto de reacción

Para separar las fases involucradas en el proceso, se propone utilizar un separador trifásico (S-101). La fase gaseosa sale por la parte superior del equipo y, al ser en su mayoría CO₂, puede ser liberada al medio ambiente. La fase acuosa y orgánica se separan por diferencias de densidad, por lo que no se tiene la necesidad de recurrir a un disolvente tan contaminante como el diclorometano para realizar una extracción. Ya que el simulador no cuenta con un equipo de separación trifásica, la separación de la fase gaseosa, la orgánica y la acuosa se realizó por medio de separadores de componentes, cuyas fracciones se especificaron como 1 y 0, según la fase a separar.

3.5.14. Recirculación de la fase acuosa

Una vez separados, se propone recircular la fase acuosa al reactor, con el fin de reducir el consumo de agua fresca en el proceso. De igual manera, Leng *et al.* (2020) indica que recircular esta fase podría llegar a ser beneficioso en un aumento del rendimiento del biocrudo. La fase sólida se plantea secar al sol y que se pueda utilizar como abono o compostaje en procesos agropecuarios, ya que es rica en carbono (Cao *et al.*, 2017).

3.5.15. Posible mejoramiento del biocrudo

Existen pocos estudios que han llevado a cabo un mejoramiento a biocrudos de licuefacción hidrotérmica para obtener combustibles como diesel, gasolina o jet fuel. Castello *et al.* (2019) realizaron un hidrotreamiento con catalizador NiMo/Al₂O₃ a tres tipos de biocrudos, los resultados se pueden observar en el Cuadro 3.13. En esta investigación se concluyó que los biocrudos de lodos de aguas residuales y algas tenían mayores rendimientos para diesel, mientras que biocrudos producidos a partir de biomasa como pasto, conllevaban mayores rendimientos de gasolina.

Cuadro 3.13. Porcentaje de rendimiento másico de gasolina y diésel obtenidos por una simulación de destilación para distintos tipos de biocrudo hidrotratados (Castello *et al.*, 2019).

| Biocrudo | Temperatura, $T / ^\circ\text{C}$ | Tiempo, t / h | Presión de reacción, P / MPa | Gasolina ($<193\ ^\circ\text{C}$) | Diesel ((272-321) $^\circ\text{C}$) |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Spirulina (Microalga) | 400 | 4 | 15,6 | 16,8 | 22,2 |
| Lodos de aguas residuales | 400 | 4 | 15,7 | 14,1 | 31,4 |
| Miscanthus (Pasto) | 400 | 4 | 16,9 | 26,9 | 11,8 |

Por su parte, Goswami *et al.* (2019) indican que, luego de un proceso de destilación de biocrudo de microalgas y lodos de aguas residuales, se obtuvo un rendimiento de 30,62% de un producto similar al diesel. Por último, Frank *et al.* (2013) indicaron que con un hidrotratamiento con $(0,067-0,075) \text{ g}_{H_2}/\text{g}_{diesel}$ aplicado a un biocrudo obtenido a partir de algas, se alcanzaban rendimientos de biodiesel entre (75-85)%; sin embargo, indicaron que los rendimientos de diesel obtenidos con algas y con material lignocelulósico no son altamente comparables, debido a que la biomasa lignocelulósica suele tener considerablemente menores cantidades de nitrógeno.

Debido a lo anterior, se decide utilizar como referencia los rendimientos de gasolina y diesel obtenidos a partir de la biomasa lignocelulósica (pasto) y no las algas. De esta forma, si todo el biocrudo producido en la planta (289 995 ton) se mejora para ser gasolina, tomando en cuenta un rendimiento de 27%, se obtendrían 126,09 ton de gasolina. Mientras que si se mejora para producir biodiesel, con un rendimiento de 12%, se obtendrían 56,04 ton de biodiesel.

De igual manera, según SEPSE (2019) la oferta interna de gasolina regular en el país es de 21 567 TJ, la gasolina súper tiene una oferta interna de 22 840 TJ y el diesel una de 45 052 TJ; de los cuales se utilizan, para el sector transporte 21 311 TJ, 22 426 y 38 808 TJ, respectivamente.

Ahora bien, se han reportado, para los combustibles nacionales, valores de calor de combustión entre (43 500 - 47 700) kJ/kg para las gasolinas y (42 600 - 43 200)

kJ/kg para el diesel (RECOPE, sf), por lo que por medio de una conversión, se pueden obtener los datos que se muestran en el Cuadro 3.14.

Cuadro 3.14. Resumen de la oferta de gasolina o diesel que se podría obtener de la planta respecto a la oferta interna nacional de estos (SEPSE, 2019).

| Combustible | Oferta de la planta / ton | Oferta interna del país / ton | Porcentaje de la oferta nacional / % |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Diesel | 56,04 | 1 050 163 | 0,005 |
| Gasolina | 126,09 | 973 838 | 0,013 |

4. Dimensionamiento de los equipos de la biorefinería para producir biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica

4.1. Determinación de la cantidad de biomasa a procesar

Primeramente, para poder diseñar y dimensionar los equipos de la planta, se debe definir la cantidad de rastrojo de piña a procesar y la cantidad de biocrudo que se va a producir. Para esto, es necesario tomar en cuenta la cantidad de rastrojo de piña con la que se cuenta a lo largo del año en Costa Rica y el tamaño del reactor que se va a utilizar.

Las actividades que actualmente utilizan rastrojo de piña como materia prima aún se encuentran, en su mayoría, en escala de laboratorio. Debido a lo anterior, se considera que este desecho no tiene mucha demanda como materia prima. La cantidad de rastrojo de piña a procesar se determinó a partir del tamaño de un reactor industrial.

Por otro lado, en Costa Rica se trabaja, por ley, durante 50 semanas al año (MTSS, sf); sin embargo, se propone que la planta se mantenga en funcionamiento durante 48 semanas, dejando cuatro semanas anuales para un chequeo general de las instalaciones. Esto debido a que el proceso de LHT involucra equipos que trabajan a condiciones de altas temperaturas y presiones.

4.1.1. Sistema de reacción LHT y factor de capacidad de la planta

A partir de la investigación realizada en la Universidad de Costa Rica por Ulate Sancho (2020) acerca de la producción de biocrudo con LHT a partir de rastrojo de piña, se determinó las condiciones de reacción en 300 °C y 0,793 h, para un rendimiento de 43,4 %. Como se mencionó anteriormente, a nivel industrial se plantea una operación continua utilizando un reactor PFR (R-101). AmAr Equipment (2021) indican que se puede personalizar un reactor de flujo tubular de 2,55 m³, con lo que procesarían 3 216 L/h de reactivos. Las especificaciones de este equipo se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Datos relacionados al reactor PFR para la LHT escogido (R-101) (AmAr Equipment, 2021), (SUNKAIER, sf).

| Dato | Valor |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| Modelo | AMaR-4P / SK3020 |
| Volumen / L | 2550 |
| Flujo de trabajo / L/h | Hasta 10 000 (3 216) |
| Presión máxima de trabajo / bar | 350 |
| Temperatura máxima de trabajo / °C | 350 |
| Material de construcción | Hastelloy C276 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 1 500 |
| Aplicaciones | Lodos, fluidos de alta viscosidad |

Experimentalmente, se determinó que el 15 % en masa de la corriente de entrada corresponde a rastrojo de piña el cual, según la simulación realizada, posee una densidad de 1286,83 g/L. Con los datos anteriores se obtiene que la cantidad de rastrojo de piña a procesar son 482,46 L/h (14,9 toneladas diarias), obteniendo 1,52 toneladas diarias de biocrudo. Tomando en cuenta que se trabajaría durante 336 días al año, se procesarían anualmente 5 000 ton/año de rastrojo.

Los datos anteriores se calcularon a partir del rendimiento experimental obtenido en el laboratorio. Sin embargo, a partir de la simulación de Aspen Plus, y luego se aplicar el reciclo de la fase acuosa en el sistema, se obtuvo un rendimiento de biocrudo de 1,52 toneladas al día. Lo anterior se respalda con lo analizado por Yin *et al.* (2021), quienes resaltan que la recirculación de la fase acuosa resulta beneficiosa sobre el rendimiento del producto.

A continuación, se presenta en el Cuadro 4.2 el resumen de las cantidades de biomasa procesadas en la planta y la cantidad de biocrudo que se produce a partir de estas.

Cuadro 4.2. Resumen de las cantidades de biomasa procesada contra la cantidad de biocrudo producido en la planta propuesta.

| Producción | Biomasa procesada, m_{BM} / ton | Biocrudo producido, m_{BC} / ton | Biocrudo simulación, m_{BC} / ton |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Diaria | 14,9 | 1,44 | 1,52 |
| Mensual | 417,2 | 40 | 42,56 |
| Anual (48 semanas) | 5006,4 | 484 | 510,72 |

4.1.2. Cultivo de piña

Según los datos previamente mencionados, se plantea en primera instancia, recolectar alrededor de 5000 ton al año de biomasa para ser procesadas en biocrudo a través de LHT. Anteriormente se mencionó que en Pital anualmente se producen 1 575 000 toneladas anuales de rastrojo de piña, por lo que se estaría captando el 0,3 % de la biomasa disponible. Por lo anterior, es posible optar por una futura expansión, en caso de que el producto aumente su demanda una vez introducido al mercado.

Según González Alfaro (2012), el cultivo de piña se renueva cada dos años, sin embargo, los terrenos se preparan y se cultivan de tal manera que cada semana se cosecha una cantidad necesaria de piña para suplir la demanda de esta fruta (Çarazo *et al.*, 2016). De igual manera, este producto tiene un índice de estacionalidad (al rededor de 1) considerablemente constante a lo largo del año, según se muestra en el Cuadro 4.3 (CENADA, 2021). Debido a esta constancia de oferta no se considera un producto estacional, por lo que su desecho (rastrojo de piña) que se genera en cada cosecha de la fruta también se encuentra disponible a lo largo del año, en cantidades similares todos los meses. Según esta información, la planta productora contaría con una cantidad constante de materia de prima durante todo el año.

Cuadro 4.3. Índice estacional de la oferta, reportada en toneladas métricas, de piña mediana en Costa Rica (CENADA, 2021).

| Mes / Año | 2017 | 2018 | 2019 | Índice de estacionalidad |
|------------|--------|--------|--------|--------------------------|
| Enero | 432,00 | 494,40 | 462,24 | 0,8818 |
| Febrero | 474,72 | 546,00 | 571,68 | 0,9241 |
| Marzo | 566,16 | 515,40 | 618,00 | 1,0462 |
| Abril | 414,00 | 692,40 | 543,60 | 0,9981 |
| Mayo | 547,20 | 713,52 | 562,56 | 1,1075 |
| Junio | 511,20 | 666,00 | 490,08 | 0,9602 |
| Julio | 438,12 | 664,32 | 434,88 | 1,0021 |
| Agosto | 520,80 | 603,60 | 512,88 | 0,9906 |
| Septiembre | 558,00 | 594,00 | 572,40 | 1,0201 |
| Octubre | 496,80 | 674,40 | 618,72 | 1,0822 |
| Noviembre | 588,48 | 462,72 | 555,12 | 1,0348 |
| Diciembre | 516,00 | 462,72 | 635,28 | 0,9522 |
| Promedio | 505,29 | 590,79 | 548,12 | 1,00 |

4.2. Dimensionamiento y especificaciones de equipos de la planta de producción

Como se mencionó anteriormente, se propone que las 5006,4 ton anuales de rastrojo se recolecten de forma semanal, sin embargo, se trabaría con 14,9 toneladas diarias. Para procesar esta cantidad de materia prima, se proponen los equipos descritos a continuación.

4.2.1. Pretratamiento de la biomasa (Lavado y disminución de tamaño del rastrojo de piña)

En primera instancia, para asegurar la continuidad del proceso, se propone que la biomasa se encuentre lavada y cortada un día antes de ser utilizada en el proceso de reacción y se almacene a temperatura ambiente.

Una vez que el rastrojo se encuentre en la planta de producción, se propone que este pase por un proceso de lavado para eliminar impurezas superficiales que puedan estar presentes, tales como suciedad proveniente de la tierra de cultivo, fertilizante, insectos, entre otros factores que podrían afectar su conservación. Se propone un equipo de lavado (O-101) tal como el que se muestra en la Figura 4.24. Las especificaciones de este equipo se resumen en el Cuadro 4.4. Según lo anterior, el equipo puede procesar hasta 3000 kg/h, por lo que al cabo de 5 h se habría procesado las 14,9 toneladas (14 900 kg) diarias.

Cuadro 4.4. Datos relacionados a la lavadora (O-101) de biomasa escogida (Maurer Gep Kft, 2021).

| Dato | Valor |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Modelo | MDK 3000 |
| Producción / kg/h | 1 500 - 3 000 |
| Demanda eléctrica / kW | 5 |
| Demanda eléctrica / V | 400 |
| Demanda eléctrica / A | 16 |
| Suministro de agua para lavar / L/h | 100 - 200 |
| Emisión de sonido / dB | 60-70 |
| Peso / kg | 360 |
| Material de construcción | Acero inoxidable AISI 304 |
| Dimensiones / mm | 950 x 3 660 x 2 120 |



Figura 4.24. Lavadora de vegetales propuesta para el proceso de acondicionamiento del rastrojo de piña (Maurer Gep Kft, 2021).

Por otro lado, se propone la disminución del tamaño del rastrojo de piña para garantizar un mejor manejo de esta; además, según Magdeldin *et al.* (2017) se recomienda un tamaño de partícula de (0,5-1,5) cm para el proceso de LHT. Para esta operación, se contempla el uso de una cortadora o rallador industrial (Q-101), debido a que este tipo de equipos puede procesar sólidos húmedos (Colina Irezabal, 2016), acorde con una de las principales ventajas de la LHT, que corresponde al uso de altas relaciones solvente/biomasa.

Como se mencionó anteriormente, se plantea un procesamiento de 14 900 kg de biomasa al día, es decir, 621 kg/h. Para esto, se propone una cortadora como la que se muestra en la Figura 4.25, la cual permite picar productos como pasto, caña de azúcar, maíz, sorgo, leguminosas, entre otros.

Según la descripción anterior, se asume que el equipo funciona para cortar rastrojo de piña, y las especificaciones de este se muestran en el Cuadro 4.5. Según estas, se asume un flujo de trabajo de 2 200 kg/h, el cual se encuentra entre los (1 500 y 3 200) kg/h indicados por el equipo. A partir de la información anterior, se establece que se requieren al rededor de 7h para cortar las 14,9 toneladas diarias.

Debido a las características de los equipos, se requieren funcionarios que los operen, introduciendo la biomasa en ellos. Según lo anterior, se propone el horario



Figura 4.25. Picadora propuesta para el proceso de cortado del rastrojo de piña (Penagos, 2021).

Cuadro 4.5. Datos relacionados a la picadora de biomasa escogida (Q-101) (Penagos, 2021).

| Dato | Valor |
|---|------------------|
| Modelo | PE-700 |
| Producción verdes (caña de azúcar) / kg/h | 2 000 - 3 200 |
| Producción verdes (hojas) / kg/h | 1 500 - 1 800 |
| Número de cuchillas | 3 |
| Número de contracuchillas | 1 |
| Revoluciones del rotor / rpm | 1 400 - 1 800 |
| Potencia de motor eléctrico / HP | 5,0 - 7,5 |
| Tamaños de corte / cm | 0,5 ; 0,65 ; 0,9 |

que se muestra en la Figura 4.26 para procesar inicialmente la biomasa, de esta forma en un día se procesaría la biomasa total que se requiere para dos días de producción de biocrudo, lavando la biomasa de tres días y cortando la biomasa de dos días, por lo que se tiene suficiente materia prima, en caso de que un día no se pueda lavar o cortar. De igual manera, se propone rotar empleados por turnos, de forma que tengan tiempos de almuerzo, meriendas y esparcimiento, ya que estas labores requieren largos tiempos de pie o esfuerzo físico.

Este pretratamiento se realiza al menos un día antes de que se requiera la biomasa; para que en la producción de biocrudo se aprovechen las 24 horas de un día.

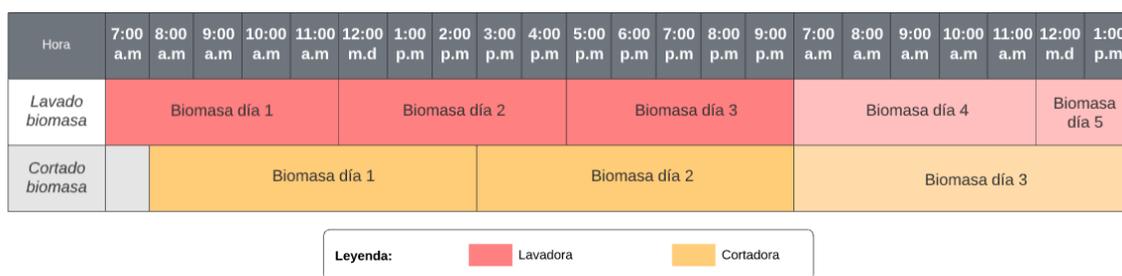


Figura 4.26. Diagrama Gantt propuesto para los procesos de lavado y cortado del rastrojo de piña.

4.2.2. Transporte de la biomasa de la estación de almacenamiento hacia el extrusor

Para esta operación es necesario tomar en cuenta que la biomasa requiere bandas que sean resistentes a la resina y otros aceites contenidos en la madera; por esta razón, Trelleborgs (sf) recomiendan las bandas lisas o Chevron, Ripcheck y bandas transportadoras deslizantes; un ejemplo de esta se muestra en la Figura 4.27.



Figura 4.27. Banda transportadora propuesta para el proceso de transporte del rastrojo de piña (FORECH India Private Limited, sf).

Por otro lado, Spinozzi (2020) recomienda que, para materiales como biomásas, las velocidades de las bandas transportadoras deben permanecer entre (1,0-2,5) m/s, debido a la generación de polvo, que permite clasificar este tipo de material como uno abrasivo. Por su parte, Forbo Siegling GmbH (2014) indican que para calcular

la potencia mecánica del motor de una banda transportadora, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{banda} = \frac{F_T \cdot v}{1000} \quad (C.1)$$

dónde:

P_{banda} : Potencia del motor de la banda transportadora, kW

F_T : Fuerza de tensión de la banda, N

v : Velocidad de la banda, m/s

Bajo esta línea, se encontró una banda transportadora tipo chevron (M-101), con cuya fuerza de tensión se calculó la potencia de motor requerida para una velocidad de 2 m/s, la cual se eligió para no trabajar cerca del límite máximo de velocidad. Los datos de esta banda se resumen en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6. Datos relacionados a la banda transportadora de biomasa escogida (M-101) (FORECH India Private Limited, sf).

| Dato | Valor |
|------------------------------------|---------|
| Modelo | Chevron |
| Velocidad lineal de la banda / m/s | 2 |
| Fuerza de tensión / N | 25 000 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 50 |

4.2.3. Mezclado y extrusión de los reactivos (biomasa y agua)

El equipo (W-101) propuesto para esta operación se muestra en la Figura 4.28, en esta se puede apreciar que a la entrada del equipo se encuentra una tolva que puede recibir los flujos de biomasa y agua en proporciones definidas, donde se daría el mezclado previo a la extrusión, donde se formaría una masa más homogénea de reactivos. Las especificaciones de este equipo se resumen en el Cuadro 4.7. El modelo se eligió suponiendo que el extrusor deba procesar el mismo flujo de biomasa y agua total que se introducirá al reactor (4 139 kg/h).



Figura 4.28. Extrusor propuesto para el procesamiento de la biomasa en la planta de producción de biocrudo (Coperion, 2021).

Cuadro 4.7. Datos relacionados al extrusor de reactivos escogido (W-101) (Coperion, 2021).

| Dato | Valor |
|-------------------------------------|---------------|
| Modelo | CTE PLUS |
| Torque por eje / N · m | 14 300 |
| Diámetro del tornillo / mm | 165 |
| Máxima velocidad del tornillo / rpm | 400 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 1 200 |
| Flujos de salida / kg/h | 2 000 - 5 000 |

4.2.4. Presurización de los reactivos (biomasa y agua)

Para presurizar la corriente de los reactivos se seleccionó una bomba de tornillo (P-101), de desplazamiento positivo (ver Figura 4.29) debido a que se requiere una elevada presión en el sistema de reacción (1 251 psi o 86 bar).

Según PCM (2021b) sus bombas eco-diseñadas tienen un diseño 38 % más ligero y con un consumo de energía de un 10 % menor que la generación de bombas anteriores, debido a que utilizan menos materias primas para su construcción, por lo que reduce el costo de ciclo de vida de los productos. Las características técnicas de este equipo se muestran en el Cuadro 4.8.



Figura 4.29. Bomba de tornillo propuesta para presurizar los reactivos hacia el calentador (PCM, 2021b).

Cuadro 4.8. Datos relacionados a la bomba para presurizar la corriente de reactivos escogida (P-101) (PCM, 2021b), (PCM, 2021a).

| Dato | Valor |
|--|----------------------|
| Modelo | PCM ECOMOINEAU™ M |
| Caudal máximo de trabajo / m ³ /h | 500 |
| Presión máxima de trabajo / bar | 45-200 |
| Temperatura máxima en funcionamiento continuo / °C | 120 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 18,5 |

4.2.5. Pre calentamiento de los reactivos (biomasa y agua)

Según el Cuadro 4.8, se puede observar que la temperatura máxima que se puede alcanzar luego de pasar por la bomba es de 120 °C, por lo que se requiere un intercambiador de calor (I-101), como el que se muestra en la Figura 4.30, que aumente este valor hasta 300 °C que corresponde a la temperatura de reacción.

De igual manera, se propone aprovechar el calor que posee la corriente que sale del reactor para precalentar el lodo biomásico que va a entrar a este equipo. En la simulación realizada, la bomba colocada no provoca un cambio en la temperatura de salida y, por medio del intercambiador de calor, se alcanza una temperatura de salida de alrededor de 290 °C. De igual manera, según la simulación realida, el flujo de calor requerido en este equipo corresponde a 1 591 kW (5,428 MMBtu/h). Las especificaciones técnicas del equipo se encuentran en el Cuadro 4.9.



Figura 4.30. Intercambiador de calor propuesto para calentar los reactivos previo al reactor (Sigma Thermal, 2021).

Cuadro 4.9. Datos relacionados al intercambiador de calor para precalentar la corriente de reactivos y enfriar la corriente de productos escogido (I-101) (Sigma Thermal, 2021).

| Dato | Valor |
|------------------------------------|-------|
| Modelo | HC2 |
| Caudal máximo de trabajo / gal/min | 350 |
| Salida de calor / MMBtu/h | 6,0 |
| Potencia de motor eléctrico / HP | 7,5 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 5,516 |

4.2.6. Calentamiento de los reactivos (biomasa y agua)

Según los datos de la simulación, la temperatura máxima que se alcanza luego del intercambiador de calor es de 290 °C: Por lo anterior, se requiere un calentador (H-101) que aumente la temperatura hasta 300 °C que corresponde a las condiciones de reacción. Con esta información, el software indica que se requieren 101 kW (0,35 MMBtu/h) en el calentador para subir la temperatura del fluido hasta 300 °C. Para este equipo se eligió un modelo similar al de la sección anterior, pero con distintas especificaciones técnicas (ver Cuadro 4.10).

Según cálculos de conversiones de unidades, el flujo de trabajo en el intercambia-

Cuadro 4.10. Datos relacionados al calentador para calentar la corriente de reactivos escogido (H-101) (Sigma Thermal, 2021).

| Dato | Valor |
|---|--------------------------------------|
| Modelo | HC2 |
| Caudal máximo de trabajo / gal/min | 50 |
| Temperatura máxima de fluido de servicio / °C | Mayores a 427 para sales térmicas |
| Salida de calor / MMBtu/h | 1,0 |
| Potencia de motor eléctrico / HP | 0,75 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 0,55 |

dor de calor son 37 gal/min, por lo que el equipo seleccionado cumple para transportar esa cantidad. De igual manera, la temperatura de la sal térmica de nitrato (que corresponde al fluido de servicio) colocada en la simulación fue de 500 °C, por lo que las especificaciones de diseño del intercambiador cumplen con el equipo simulado.

4.2.7. Enfriamiento del producto de reacción

El producto de reacción se propone enfriar a 90 °C, pues el separador de sólidos debe trabajar a temperaturas menores a 98 °C. El simulador indica que para enfriar esta corriente se requieren 2 082,19 kW (7,10 MMBtu/h). Para esto, se propone utilizar el mismo tipo de intercambiador de calor que se colocó para la operación de calentamiento, pero con las especificaciones se muestran en el Cuadro 4.11.

Cuadro 4.11. Datos relacionados al enfriador para enfriar la corriente de productos escogido (E-101) (Sigma Thermal, 2021).

| Dato | Valor |
|------------------------------------|-------|
| Modelo | HC2 |
| Caudal máximo de trabajo / gal/min | 450 |
| Salida de calor / MMBtu/h | 8 |
| Potencia de motor eléctrico / HP | 10 |
| Potencia de motor eléctrico / kW | 7,35 |

4.2.8. Separación de la fase sólida

En esta unidad de proceso se separaría el hydrochar proveniente de la reacción de LHT. Esta fase está compuesta principalmente por cenizas y carbono. Este producto

no se recicla en la fase acuosa, sin embargo, puede ser utilizado como fertilizante o rectificador de suelo (Cao *et al.*, 2017), (Magdeldin *et al.*, 2017). Debido a lo anterior se propuso separar el 99 % de los sólidos. Para esta operación, se seleccionó el filtro que se muestra en la Figura 4.31.



Figura 4.31. Filtro de sólidos propuesto para separar el hydrochar del producto de reacción (Forsta Filters Incorporation, 2021).

Según sus especificaciones técnicas, las cuales se resumen en el Cuadro 4.12, este equipo puede trabajar con caudales tan altos como los requeridos. Además, posee un alto grado de filtración, con lo cual se asegura de que la mayoría del sólido sea separado. En el caso de este estudio, se propuso separar un 99 % de sólido.

Cuadro 4.12. Datos relacionados al filtro de sólidos para separar el hydrochar del producto de reacción (F-101) (Forsta Filters Incorporation, 2021).

| Dato | Valor |
|---|------------|
| Modelo | LP180 |
| Caudal máximo de trabajo / gal/min | 15 – 7 350 |
| Grado de filtración / μm | 20 - 4 000 |
| Temperatura de trabajo / $^{\circ}\text{C}$ | 98,89 |

4.2.9. Despresurización del producto de reacción

Para despresurizar el producto obtenido se propone una válvula (V-101) como la que se muestra en la Figura 4.32. La válvula seleccionada, según especificaciones

proporcionadas por el fabricante, puede trabajar en los rangos de temperatura y presión requeridos (BERMAD, 2021).



Figura 4.32. Válvula reductora de presión (modelo 720) propuesta para regular la presión de los productos a la salida del reactor (V-101) (BERMAD, 2021).

4.2.10. Separación trifásica de la fase líquida (acuosa y orgánica) y gaseosa del producto de reacción

Para separar las fases restantes, se propone un separador trifásico (S-101) que opera por diferencias de densidades, como el que se muestra en la Figura 4.33. Las especificaciones técnicas de este equipo se muestran en el Cuadro 4.13.

Cuadro 4.13. Datos relacionados al separador trifásico escogido (Luoyang Run-cheng Petrochemical Equipment, 2021).

| Dato | Valor |
|---|-------------|
| Modelo | HCS25/100 |
| Capacidad de procesamiento de gas / m ³ /d | 25 |
| Capacidad de procesamiento de líquido / m ³ /d | 100 |
| Dimensiones / m | 7,4×2,2×2,4 |
| Presión máxima de trabajo / psi | 1 400 |
| Temperatura máxima de trabajo / °C | 80 |
| Potencia del motor eléctrico / W | 100 |

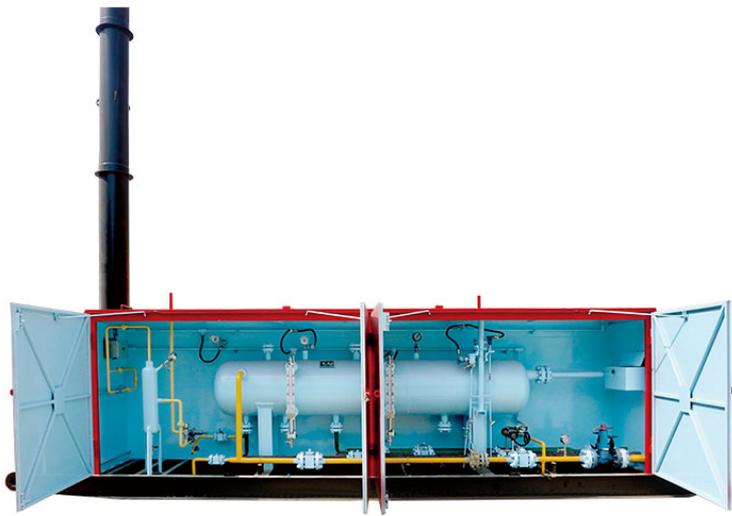


Figura 4.33. Separador trifásico propuesto para dividir las fases acuosa, orgánica (biocrudo) y gaseosa provenientes del sistema de reacción de LHT (S-101) (Luoyang Runcheng Petrochemical Equipment, 2021).

5. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOCRUDO

5.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

Para el presente análisis de ciclo de vida se pretende estudiar el impacto ambiental que se genera durante el proceso de producir de biocrudo a partir de rastrojo de piña, mediante la licuefacción hidrotérmica. De igual manera, se plantea comparar los resultados obtenidos con los resultados reportados en otros estudios de procesos de producción de biocrudo similares, que utilicen otras tecnologías o materias primas, con el fin de determinar si el proceso planteado resulta competitivo ambientalmente en comparación a estos.

Para esto, se definen los límites del sistema como un estudio de la puerta hasta la puerta (ver Figura 5.34), es decir, se analizará el sistema de producción, sin tomar en cuenta extracción y distribución de la materia prima, ni distribución, consumo y disposición final del producto producido. Lo anterior, se debe a que no se cuentan con datos experimentales acerca del uso del biocrudo propuesto y asumir valores de estudios realizados con otras materias primas, supondría introducir gran fuente de incertidumbre al análisis. Así mismo, no se toma en cuenta el transporte de la materia prima hasta la planta, ya que al no existir esta, no se cuenta con un terreno donde se pueda colocar, por lo que las distancias de transporte podrían variar considerablemente.

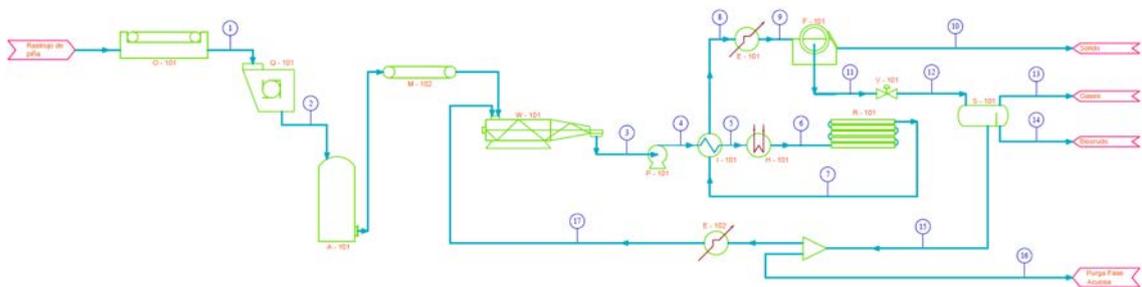


Figura 5.34. Límites del sistema en estudio propuestos para el análisis de ciclo de vida.

En cuanto a la unidad funcional, se define utilizar los kilogramos (kg) de biocrudo

producidos, debido a que es una unidad comúnmente utilizada en otros estudios de biocrudos.

De igual manera, se utilizará un criterio de corte o exclusión para los impactos estudiados, por ejemplo, según la Norma Inte B5:2020 y la ISO 14044, se pueden excluir de la cuantificación de gases de efecto invernadero los sumideros o fuentes de GEI indirectas que individualmente y en sumatoria no superen el 3% del inventario total (Programa País Carbono Neutralidad, 2021).

Por su parte, no se tomaran en cuenta los impactos de los materiales de construcción de los equipos, debido a que se considera que este impacto no resulta significativo por su distribución en el tiempo, a lo largo de su vida útil (Nie y Bi, 2018). De igual manera, se sabe que el biocrudo producido tiene un alto valor de viscosidad y se podría solidificar, por lo que para su trasiego se podría llegar a requerir trazar la tubería que lo transporte; este trazado así como sus requerimientos de materia y energía no serán tomados en cuenta en el presente análisis, debido a que no se conoce la extensión y cantidad requerida.

5.2. Análisis de inventario del estudio

Para montar el inventario del proceso, se empezó por generar la Figura 11.37 donde se muestran todos los flujos de entrada y salida, así como su caracterización, para cada unidad del proceso. De igual manera en el Cuadro B.1 se detallan de manera más clara estos flujos para cada unidad del proceso planteado.

Los datos presentados se obtuvieron a partir de la simulación descrita en la etapa anterior y de especificaciones técnicas de los equipos seleccionados en la etapa de diseño de la planta. Los datos correspondientes a la composición química de las fases encontradas en las corrientes del proceso se obtuvieron a partir de cuantificación experimental e investigación bibliográfica, utilizando referencias teóricas de datos presentados en artículos de estudio de procesos de licuefacción hidrotérmica con biomásas con composición química (de celulosa, hemicelulosa y lignina) similares a la del rastrojo de piña.

A partir de los datos anteriores, se tabuló el inventario con cada corriente del proceso, el cual se encuentra en el Cuadro 5.1. Estos Cuadros muestran los datos de

todas las corrientes que se encuentran dentro de los límites en el proceso. A forma de complemento, se acomodó la información de la composición de cada corriente mixta presente en el procesamiento de la biomasa mediante LHT, esta información se aprecia en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.1. Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad | Observación | Referencia |
|---------------------------|---------|--------|------------------|------------------------------------|
| Lavado de biomasa | | | | |
| Rastrojo de piña | 9,81985 | kg | Entrada y salida | Experimental |
| Agua | 1,97715 | kg | Entrada | (Maurer Gep Kft, 2021) |
| Electricidad | 0,0033 | kW | Entrada | (Maurer Gep Kft, 2021) |
| Sonido | 0,04613 | dB | Salida | (Maurer Gep Kft, 2021) |
| Cortado de biomasa | | | | |
| Rastrojo de piña | 9,81985 | kg | Entrada y salida | Experimental |
| Electricidad | 0,00368 | kW | Entrada | (Penagos, 2021) |
| Almacenamiento de biomasa | | | | |
| Rastrojo de piña | 9,81985 | kg | Entrada y salida | Experimental |
| Transporte de biomasa | | | | |
| Rastrojo de piña | 9,81985 | kg | Entrada y salida | Experimental |
| Electricidad | 0,03295 | kW | Entrada | (FORECH India Private Limited, sf) |

Cuadro 5.1. Continuación. Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad | Observación | Referencia |
|-----------------------------------|----------|--------|--------------------|-----------------------|
| Extrusión del lodo biomásico | | | | |
| Rastrojo piña | 9,81985 | kg | Entrada | Experimental |
| Reciclo de fase acuosa | 81,15297 | kg | Entrada | Simulación |
| Electricidad | 0,79061 | kW | Entrada | (Coperion, 2021) |
| Lodo biomásico | 90,97274 | kg | Salida | Simulación |
| Presurización del lodo biomásico | | | | |
| Lodo biomásico | 90,97274 | kg | Entrada, a 15 psi | Simulación |
| Electricidad | 0,012 | kW | Entrada | (PCM, 2021a) |
| Lodo biomásico presurizado | 90,97274 | kg | Salida, a 1251 psi | Simulación |
| Precalentamiento de los reactivos | | | | |
| Lodo biomásico | 90,97274 | kg | Entrada, a 81 °C | Simulación |
| Producto de reacción | 90,97274 | kg | Entrada, a 300 °C | Simulación |
| Electricidad | 0,00364 | kW | Entrada | (Sigma Thermal, 2021) |
| Lodo biomásico precalentado | 90,97274 | kg | Salida, 290 °C | Simulación |
| Producto de reacción preenfriado | 90,97274 | kg | Salida, 272 °C | Simulación |
| Calentamiento de los reactivos | | | | |
| Lodo biomásico precalentado | 90,97274 | kg | Entrada, 290 °C | Simulación |
| Electricidad | 0,00036 | kW | Entrada | (Sigma Thermal, 2021) |
| Sal térmica | 51,09799 | kg | Entrada, 500 °C | Simulación |
| Lodo biomásico calentado | 90,97274 | kg | Salida, 300 °C | Simulación |
| Sal térmica | 51,09799 | kg | Salida, 400 °C | Simulación |

Cuadro 5.1. Continuación. Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la sección del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad | Observación | Referencia |
|---|----------|--------|-------------------|-----------------------|
| Sistema de reacción | | | | |
| Lodo biomásico calentado | 90,97274 | kg | Entrada, 300 °C | Simulación |
| Electricidad | 0,989 | kW | Entrada | (SUNKAIER, sf) |
| Producto de reacción | 90,97274 | kg | Salida, 300 °C | Simulación |
| Enfriamiento del producto de reacción | | | | |
| Producto de reacción preenfriado | 90,97274 | kg | Entrada, a 272 °C | Simulación |
| Agua de enfriamiento | 5674,723 | kg | Entrada, a 15 °C | Simulación |
| Electricidad | 0,00485 | kW | Entrada | (Sigma Thermal, 2021) |
| Producto de reacción enfriado | 90,97274 | kg | Salida, 90 °C | Simulación |
| Agua de enfriamiento | 5674,723 | kg | Salida, 20 °C | Simulación |
| Separación de sólidos | | | | |
| Producto de reacción enfriado | 90,97274 | kg | Entrada | Simulación |
| Sólidos | 1,08771 | kg | Salida | Simulación |
| Fase líquida y gaseosa | 89,87842 | kg | Salida | Simulación |
| Despresurización del producto de reacción | | | | |
| Fase líquida y gaseosa | 89,87842 | kg | Entrada, 1251 psi | Simulación |
| Fase líquida y gaseosa | 89,87842 | kg | Salida, 45 psi | Simulación |

Cuadro 5.1. Continuación. Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la sección del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad | Observación | Referencia |
|--|----------|--------|-------------|--|
| Separación de trifásica de la fase líquida y gaseosa | | | | |
| Fase líquida y gaseosa | 89,87842 | kg | Entrada | Simulación |
| Electricidad | 0,000066 | kW | Entrada | (Luoyang Runcheng Petrochemical Equipment, 2021) |
| Gases | 7,64421 | kg | Salida | Simulación |
| Biocrudo | 1,000 | kg | Salida | Simulación |
| Fase acuosa | 81,23421 | kg | Salida | Simulación |
| Purga de la fase acuosa | | | | |
| Fase acuosa | 81,23421 | kg | Entrada | Simulación |
| Purga fase acuosa | 0,08124 | kg | Salida | Simulación |
| Fase acuosa caliente | 81,15297 | kg | Salida | Simulación |

Cuadro 5.2. Composiciones de las corrientes mixtas incluidas en el inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la sección del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad |
|-------------------------------|--------|--------|
| Reciclo de fase acuosa | 81,15 | kg |
| Agua | 79,06 | kg |
| Ácido acético | 0,43 | kg |
| Ácido glicólico | 1,37 | kg |
| Metanol | 0,17 | kg |
| Ácido succínico | 0,12 | kg |
| Carbono | 0,0075 | kg |
| Cenizas | 0,0035 | kg |
| Lodo biomásico | 90,97 | kg |
| Rastrojo | 9,82 | kg |
| Agua | 79,06 | kg |
| Ácido acético | 0,43 | kg |
| Ácido glicólico | 1,37 | kg |
| Metanol | 0,17 | kg |
| Ácido succínico | 0,12 | kg |
| Carbono | 0,0075 | kg |
| Cenizas | 0,0035 | kg |
| Producto de reacción | 90,97 | kg |
| Agua | 79,14 | kg |
| CO ₂ | 6,62 | kg |
| H ₂ | 0,92 | kg |
| CO | 0,55 | kg |
| CH ₄ | 0,06 | kg |
| 4-etilfenol | 0,10 | kg |
| Fenol | 0,10 | kg |
| Siringol | 0,03 | kg |
| Ácido n-hexánico | 0,27 | kg |
| Ácido linoléico | 0,18 | kg |
| Dietilftalato | 0,04 | kg |
| Vainillina | 0,02 | kg |
| p-xileno | 0,01 | kg |
| Ciclotridecano | 0,04 | kg |
| 2,5-hexanodiona | 0,07 | kg |
| 2-acetilfurano | 0,07 | kg |
| 2-metil-2-ciclopenten-1-ona | 0,07 | kg |
| Estearonitrilo | 0,01 | kg |
| Ácido acético | 0,43 | kg |
| Ácido glicólico | 1,37 | kg |
| Metanol | 0,17 | kg |
| Ácido succínico | 0,12 | kg |
| Carbono | 0,75 | kg |
| Cenizas | 0,35 | kg |

Cuadro 5.2. Continuación. Composiciones de las corrientes mixtas incluidas en el inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la sección del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad |
|-------------------------------|--------|--------|
| Fase líquida y gaseosa | 89,878 | kg |
| Agua | 79,14 | kg |
| CO ₂ | 6,62 | kg |
| H ₂ | 0,92 | kg |
| CO | 0,55 | kg |
| CH ₄ | 0,06 | kg |
| 4-etilfenol | 0,10 | kg |
| Fenol | 0,10 | kg |
| Siringol | 0,03 | kg |
| Ácido n-hexánico | 0,27 | kg |
| Ácido linoléico | 0,18 | kg |
| Dietilftalato | 0,04 | kg |
| Vainillina | 0,02 | kg |
| p-xileno | 0,01 | kg |
| Ciclotridecano | 0,04 | kg |
| 2,5-hexanodiona | 0,07 | kg |
| 2-acetilfurano | 0,07 | kg |
| 2-metil-2-ciclopenten-1-ona | 0,07 | kg |
| Estearonitrilo | 0,01 | kg |
| Ácido acético | 0,43 | kg |
| Ácido glicólico | 1,37 | kg |
| Metanol | 0,17 | kg |
| Ácido succínico | 0,12 | kg |
| Carbono | 0,0075 | kg |
| Cenizas | 0,0035 | kg |
| Sólidos | 1,088 | kg |
| Carbono | 0,75 | kg |
| Cenizas | 0,35 | kg |
| Gases | 7,64 | kg |
| CO ₂ | 6,62 | kg |
| H ₂ | 0,92 | kg |
| CO | 0,55 | kg |
| CH ₄ | 0,06 | kg |
| Fase acuosa | 81,23 | kg |
| Agua | 79,14 | kg |
| Ácido acético | 0,43 | kg |
| Ácido glicólico | 1,37 | kg |
| Metanol | 0,17 | kg |
| Ácido succínico | 0,12 | kg |
| Carbono | 0,0075 | kg |
| Cenizas | 0,0035 | kg |

Cuadro 5.2. Continuación. Composiciones de las corrientes mixtas incluidas en el inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la sección del procesamiento de la biomasa mediante LHT en la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad |
|-----------------------------|-----------|--------|
| Biocrudo | 1,00 | kg |
| 4-etilfenol | 0,10 | kg |
| Fenol | 0,10 | kg |
| Siringol | 0,03 | kg |
| Ácido n-hexánico | 0,27 | kg |
| Ácido linoléico | 0,18 | kg |
| Dietilftalato | 0,04 | kg |
| Vainillina | 0,02 | kg |
| p-xileno | 0,01 | kg |
| Ciclotridecano | 0,04 | kg |
| 2,5-hexanodiona | 0,07 | kg |
| 2-acetilfurano | 0,07 | kg |
| 2-metil-2-ciclopenten-1-ona | 0,07 | kg |
| Estearonitrilo | 0,01 | kg |
| Purga fase acuosa | 0,0812 | kg |
| Agua | 0,08 | kg |
| Ácido acético | 0,00043 | kg |
| Ácido glicólico | 0,00137 | kg |
| Metanol | 0,00017 | kg |
| Ácido succínico | 0,00012 | kg |
| Carbono | 0,0000075 | kg |
| Cenizas | 0,0000035 | kg |

La información del inventario de cada unidad del proceso se reacomodó según los límites definidos para el sistema de estudio y se obtuvieron los datos de flujos de entradas y salidas netas que se muestran en la Figura 5.35. Este inventario total de la planta de producción de biocrudo no considera las corrientes que se recirculan o pasan de una unidad funcional a otra dentro de los límites del sistema.

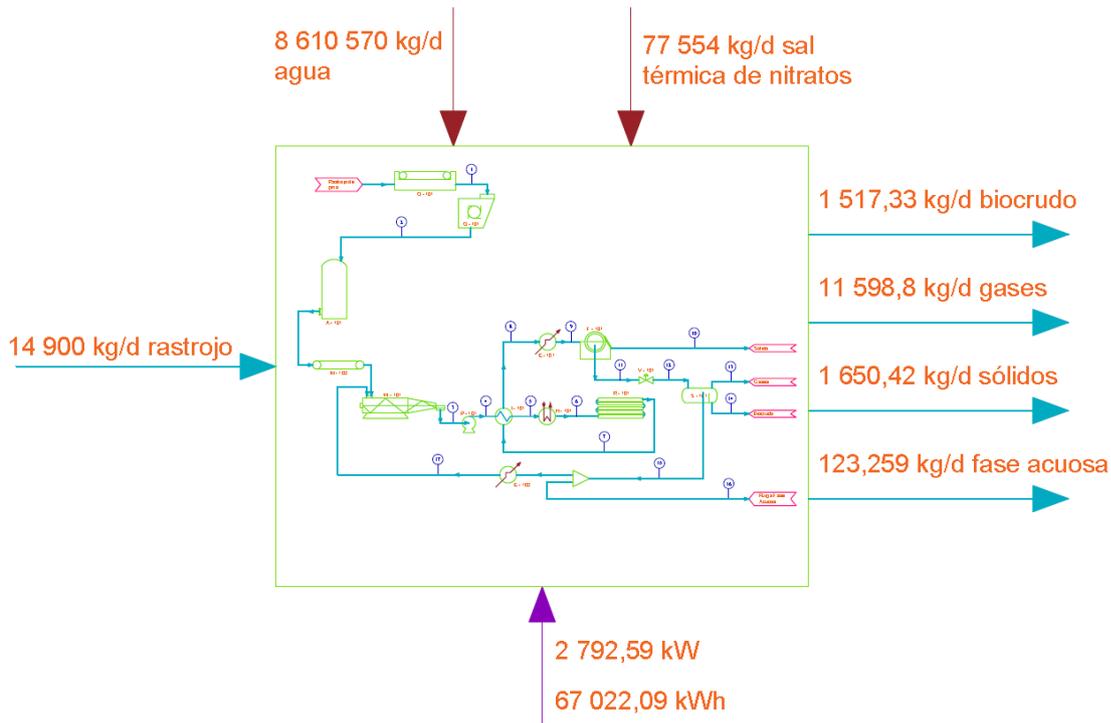


Figura 5.35. Flujos netos de entrada y salida a la planta de producción de biocrudo a partir de LHT.

De igual manera, los datos relevantes para este inventario neto se encuentran tabulados en el Cuadro 5.3, con la composición respectiva de cada corriente de salida y los valores requeridos de las corrientes y servicios auxiliares.

Cuadro 5.3. Inventario del análisis de ciclo de vida (LCI) para la producción base de 1 kg de biocrudo.

| Dato | Valor | Unidad | Observación | Referencia |
|-------------------------------------|-----------|--------|--------------------------------------|---|
| Entradas Netas | | | | |
| Cantidad de rastrojo de piña | 9,82 | kg | Biomasa húmeda | Experimental |
| Cantidad de agua | 5 265,46 | kg | De enfriamiento, a 15 °C | Simulación |
| Cantidad de vapor de agua | 33,62 | kg | De calentamiento, a 500 °C | Simulación |
| Electricidad | 1,84 | kW | Para equipos | (Sigma Thermal, 2021) |
| Salidas Netas | | | | |
| Sonido | 0,04613 | dB | - | (Maurer Gep Kft, 2021) |
| Cantidad de biocrudo | 1,00 | kg | Unidad funcional, rendimiento 1,45 % | Experimental |
| Cantidad de gases | 7,64 | kg | Rendimiento 8,35 % | Por diferencia, (Cao <i>et al.</i> , 2017) |
| CO ₂ | 6,62 | kg | - | - |
| H ₂ | 0,92 | kg | - | - |
| CO | 0,55 | kg | - | - |
| CH ₄ | 0,06 | kg | - | - |
| Cantidad de sólidos | 1,09 | kg | Rendimiento 1,20 % | Experimental |
| Carbono | 0,74 | kg | - | - |
| Ceniza | 0,35 | kg | - | - |
| Cantidad de fase acuosa | 0,08 | kg | Rendimiento 89,00 % | Experimental, (Watson <i>et al.</i> , 2020), (Madsen <i>et al.</i> , 2016), (Madsen <i>et al.</i> , 2017), (Villadsen <i>et al.</i> , 2012) |
| Agua | 0,0791 | kg | - | - |
| Ácido acético | 0,0004 | kg | - | - |
| Ácido glicólico | 0,0014 | kg | - | - |
| Metanol | 0,0002 | kg | - | - |
| Ácido succínico | 0,0001 | kg | - | - |
| Carbono | 0,0000075 | kg | - | - |
| Cenizas | 0,0000035 | kg | - | - |
| Cantidad de agua | 5 674,72 | kg | De enfriamiento, a 20 °C | Simulación |
| Cantidad de sal térmica | 51,0978 | kg | De calentamiento, a 400 °C | Simulación |

Nota: Los rendimientos reportados se encuentran respecto a la masa de entrada total y las referencias se tomaron para las composiciones de los flujos.

5.3. Evaluación de impactos

Para el presente análisis, se plantea considerar categorías de impacto comúnmente estudiadas en los análisis de ciclo de vida de producción de biocombustibles a partir de tecnologías como licuefacción hidrotérmica o pirólisis (Darojat *et al.*, 2019), (Chan *et al.*, 2018), (Hsu, 2012), (Chan *et al.*, 2016), (Fan *et al.*, 2011) y (Nie y Bi, 2018). Las categorías de impacto a analizar, así como las unidades de estas, fueron las siguientes:

- Cambio climático, (kg CO₂ – Eq)
- Acidificación, (kg SO₂ – Eq)
- Eutrofización, (kg P₂ – Eq)
- Toxicidad humana, (kg 1,4 – DCB – Eq)

La categoría de cambio climático se estudia debido al impacto por el calentamiento global que se genera al liberar gases de efecto invernadero en un proceso industrial como el planteado, lo cual tiene afectaciones tanto para la biodiversidad y los ecosistemas, como para la vida y los derechos humanos. Por su parte, la acidificación del agua y el suelo, por liberar compuestos como los contenidos en la fase acuosa, puede llegar a afectar la flora y la fauna. La eutrofización se elige estudiar debido a que podría provocar la reducción/eliminación de otras formas de vida que requieren de oxígeno en el agua. Por último, se elige estudiar la toxicidad humana, ya que los procesos industriales podrían tener grave impacto sobre la salud humana.

La evaluación de los impactos del ciclo de vida estudiado se realizó utilizando el programa OpenLCA y la base de datos Ecoinvent 3.6. Para este estudio se utilizó como método de evaluación el ReCiPe Midpoint (H). Se realizó un análisis de efecto intermedio (midpoint) debido a que lleva una menor incertidumbre asociada e indican de forma más específica dónde se está afectando al medio ambiente (Meijer, 2021). De igual manera, se utiliza una perspectiva jerárquica (H) pues suele ser el modelo predeterminado, ya que contempla periodos de tiempo intermedios y se utiliza en modelos científicos (Pré Sustainability, 2021).

La Figura 5.36 muestra los resultados obtenidos para la evaluación de impactos de este estudio. En el Cuadro 5.4 se encuentran los resultados porcentuales para cada unidad del proceso estudiado.

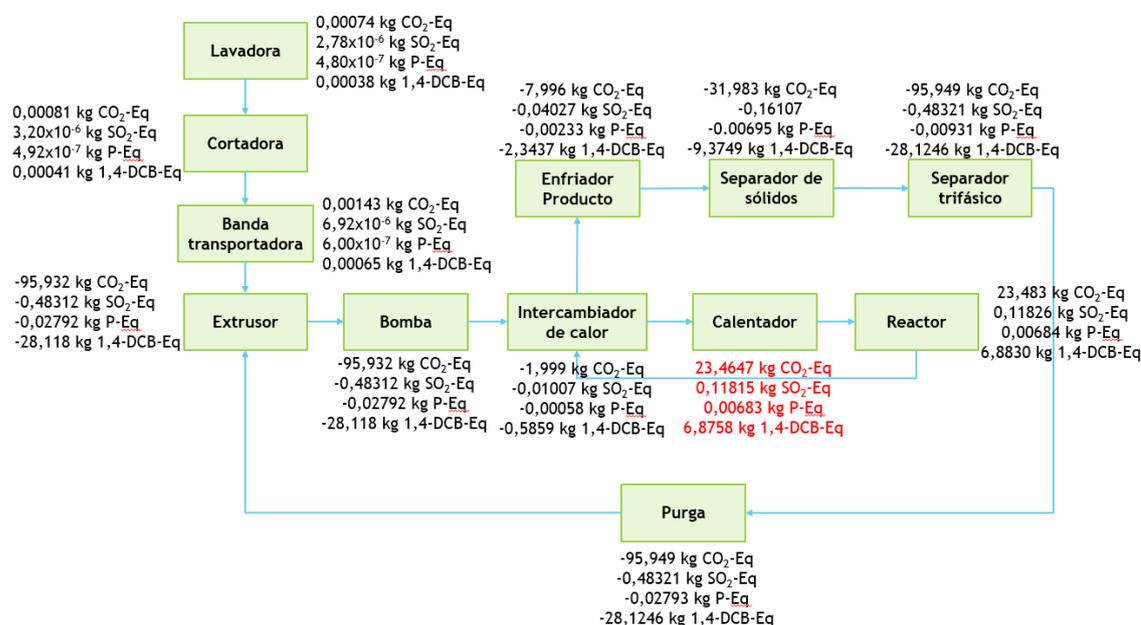


Figura 5.36. Diagrama de cajas con los resultados del análisis del inventario del proceso de licuefacción hidrotérmica.

5.4. Fase de interpretación

A partir de la evaluación anterior, se obtiene que para producir 1 kg de bio-crudo mediante licuefacción hidrotérmica de rastrojo de piña se generan 23,953 kg CO₂ – Eq; 0,12063 kg SO₂ – Eq; 0,00697 kg P – Eq; y 7,02068 kg 1,4 – DCB – Eq.

De igual manera, mediante la evaluación de impactos es posible identificar que el proceso de calentamiento contribuye en un mayor porcentaje al impacto total. En esta línea, siguiendo el criterio de corte de fuentes de emisiones menores al 3%, la unidad de calentamiento es la única unidad que genera un impacto significativo en el proceso.

Los flujos que entran a la unidad de calentamiento son la sal térmica de nitrato, el flujo de salida de la unidad de precalentamiento y electricidad. En este sentido, la producción de la sal térmica contribuye en un 106,31 %, la unidad de precalentamiento en un -8,35 % y la electricidad en cantidades despreciables para el software

Cuadro 5.4. Resultados del análisis del inventario del proceso de licuefacción hidrotérmica, según OpenLCA.

| Unidad / Actividad | Porcentaje de contribución (%) | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------------|
| | Cambio climático | Acidificación | Eutroficación | Toxicidad humana |
| Total | 23,953 | 0,12063 | 0,00697 | 7,02068 |
| Lavado | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Cortado | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Transporte | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Extrusión | -400,50 | -400,50 | -400,50 | -400,50 |
| Presurización | -400,50 | -400,50 | -400,50 | -400,50 |
| Pre calentamiento | -8,35 | -8,35 | -8,34 | -8,35 |
| Calentamiento | 97,96 | 97,95 | 97,99 | 97,94 |
| Reacción | 98,04 | 98,04 | 98,04 | 98,04 |
| Enfriamiento | -33,38 | -33,38 | -33,38 | -33,38 |
| Producto | | | | |
| Separación de Sólidos | -133,52 | -133,53 | -133,52 | -133,53 |
| Separación Trifase | -400,57 | -401,58 | -400,55 | -401,60 |
| Purga Fase Acuosa | -400,57 | -401,58 | -400,55 | -401,60 |
| Producción Electricidad | 0.18 | 1.92 | 0.26 | 0.47 |

(0,08 %), dando como resultado el 97,96 % de la unidad de calentamiento. El alto impacto de la unidad de calentamiento se debe a que se utiliza gran cantidad de sal térmica para realizar el calentamiento del lodo biomásico. Según la base de datos utilizada, el almacenamiento de la sal térmica tiene el mayor impacto. Dentro de ese sistema, los principales procesos que generan impactos son la producción de la sal térmica, la producción de acero reforzado, el tratamiento de residuos peligrosos, producción de cobre y aleaciones, y quema de diesel. Los impactos de estas actividades se muestra en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5. Composición principal de los impactos provenientes de la sal térmica de nitratos, según OpenLCA y Ecoinvent 3.6.

| Corriente | Cambio climático | Porcentaje de contribución (%) | | |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------|---------------|------------------|
| | | Acidificación | Eutrofización | Toxicidad humana |
| Total Almacenamiento | 25,46367 | 0,12822 | 0,00741 | 7,46173 |
| Producción sales de nitrato | 48,59 | 45,47 | 36,95 | 40,30 |
| Tratamiento residuos peligrosos | 19,69 | 7,59 | 24,79 | 11,13 |
| Producción de acero reforzado | 10,37 | 6,78 | 16,17 | 16,60 |
| Producción de aleación Fe-Ni-Cr | - | 13,28 | - | - |
| Producción de cobre | - | - | 3,97 | 9,17 |
| Quema de diesel | 5,26 | - | - | - |

Por otro lado, la unidad de precalentamiento, cuyo flujo entra a la unidad de calentamiento, contribuye en -8,35 %. El signo negativo en la unidad de precalentamiento, así como de otras unidades del proceso, se explica debido a que estas están vinculadas a un reciclaje en el proceso, por lo que sus flujos de salida, en vez de llegar a impactar directamente al medio ambiente, se recirculan y aprovechan dentro del proceso productivo, por lo que su impacto se evita. De igual manera, en la unidad

de precalentamiento se aprovecha el calor del flujo del producto de reacción para calentar el lodo biomásico, por lo que no se introducen fuentes extra de calentamiento y se evitan estas cargas.

Entre las demás unidades de proceso con impactos al medio ambiente evitados, se aprecia que las que menos evitan cargas son el enfriamiento del producto de reacción y la unidad de separación de sólidos. Esto se debe a que la unidad de enfriamiento del producto utiliza mayor cantidad de agua para enfriamiento y en el separador de sólidos se desecha el biochar.

Para reducir los impactos identificados, se plantean una serie de recomendaciones. En cuanto a la sal de nitratos en la unidad de calentamiento, se recomienda explorar otros métodos de producción más amigables con el medio ambiente. Por ejemplo, utilizar electricidad proveniente de fuentes renovables; estudiar la posibilidad de usar otros materiales de construcción en lugar del acero, las aleaciones y el cobre; y explorar la posibilidad de realizar otro tratamiento a los residuos, diferente a la incineración que propone la base de datos. De igual manera, se recomienda explorar otras opciones de calentamiento industrial, como aceites térmicos y comparar si su impacto es menor que el de la sal seleccionada. Los sólidos generados, se podrían proponer como producto secundario del proceso y ser comercializado como abono, el cual se podría reincorporar al proceso si se envía a las plantaciones de piña.

El principal desafío en el proceso planteado es la necesidad de calentar los reactivos de 290 °C a 300 °C. En este estudio se utilizó una sal térmica de nitratos (60 % NaNO_3 y 40 % KNO_3), debido a que se requiere una utilidad que trabaje a altas temperaturas. En sus estudios Pandey *et al.* (2015a) y Castro Vega (2011) indican que los compuestos que dan origen al biocrudo son los derivados de hemicelulosa, lignina y celulosa; sin embargo, los anillos aromáticos presentes en las moléculas de lignina son químicamente muy estables y no reaccionan, por lo que se afecta el rendimiento del proceso y se requieren mayores cantidades de energía para llevar a cabo la reacción.

Con el fin de mejorar el rendimiento obtenido de la licuefacción hidrotérmica, se pueden realizar diversos pretratamientos a la biomasa. En estos se propone romper los enlaces más estables de la lignina para disminuir la cantidad de energía necesaria

en el proceso de LHT. Algunos pretratamientos que se recomiendan estudiar para degradar la lignina son la técnica de ultrasonido e hidrólisis enzimática (Hassan *et al.*, 2018); pretratamientos con ácido sulfúrico y ácido paracético, o utilizando líquidos iónicos Mood *et al.* (2013); el proceso oganosolv (utilizar solventes como etanol, metanol, acetona y etilenglicol) (Chaturvedi y Verma, 2013); o pretratamientos de oxidación con ozono (Sankarden *et al.*, 2012), este último pues los residuos de la reacción, principalmente oxígeno, no son tóxicos; y se puede generar fácilmente in situ, lo que reduce costos de transporte (Chuck *et al.*, 2013).

En esta misma línea, se recomienda el estudio en laboratorio con catalizadores de la reacción, con el fin de disminuir la energía de activación del proceso y, con esto, la temperatura de la reacción. En todos estos escenarios alternos, se debe evaluar si el proceso de pretratamiento o uso de catalizador resulta más económica y ambientalmente rentable que el uso de las sales térmicas para alcanzar la temperatura de reacción (Castro Vega, 2011).

5.5. Comparación en términos del ciclo de vida de proceso de producción de biocrudo

Con los datos obtenidos en la evaluación de impactos, es posible comparar los resultados del estudio de producción de biocrudo a partir de rastrojo de piña mediante licuefacción hidrotérmica con los reportados por otros estudios de licuefacción utilizando otras biomásas o de procesos productivos similares, como la pirólisis. En el Cuadro 5.6 se resumen los principales hallazgos.

A partir de la información anterior, es posible observar que los datos obtenidos en el presente análisis se mantienen, en su mayoría, dentro del ámbito de resultados encontrados. Cabe resaltar que para poder comparar los resultados en términos energéticos, tomando en cuenta una unidad de referencia de 1 MJ de biocrudo se utilizó el factor de conversión de 35,922 MJ/kg según Ulate Sancho (2020).

En su estudio, Chan *et al.* (2016) analiza el proceso de licuefacción hidrotérmica de los racimos de fruta vacíos (raquis) de la palma aceitera. El proceso incluye el transporte de la biomasa al sitio de procesamiento, la molienda de la biomasa, la

Cuadro 5.6. Resultados de otros estudios de análisis de ciclo de vida para la comparación del presente estudio.

| Estudio | Unidad funcional | Descripción | Resultado |
|---------------------------|------------------|---|---|
| Este estudio | 1 kg biocrudo | - | 23,953 kg CO ₂ -Eq / kg biocrudo 0,667 kg CO ₂ -Eq / MJ biocrudo |
| Chan <i>et al.</i> (2016) | 1 kg biocrudo | LHT de palma y extracción con tolueno. Calor con gas natural. | 3,82 kg CO ₂ -Eq / kg biocrudo |
| Chan <i>et al.</i> (2018) | 1 kg biocrudo | T=390 °C, P=25 MPa, t=1 h, tolueno como solvente | 30,27 kg CO ₂ -Eq / kg biocrudo |
| Fan <i>et al.</i> (2011) | 1 MJ biocrudo | Pirólisis sauce | 8,59 kg CO ₂ -Eq / MJ biocrudo |
| Nie y Bi (2018) | 1 MJ biocrudo | Preprocesamiento de costrado de biomasa | 0,012 kg CO ₂ -Eq / MJ biocrudo |

licuefacción hidrotérmica y el uso de tolueno como solvente para extraer el biocrudo. El calor requerido en el proceso se suple con una caldera de gas natural. Las condiciones de reacción fueron 390 °C, 25 MPa y 4 horas. Bajo dichas condiciones estudiadas, se obtuvo que el proceso genera 3,82 kg CO₂-Eq / kg biocrudo. De igual manera, se muestran otras categorías de impacto, como la acidificación con 0,62 kg SO₂-Eq / kg biocrudo, eutrofización con 0,006 kg P₂-Eq / kg biocrudo y toxicidad humana con 0,009 kg 1,4-DCB-Eq / kg biocrudo.

Según los resultados reportados en el presente estudio, estos se encuentran en rangos similares a los reportados por Chan *et al.* (2016), inclusive con valores menores en la categoría de acidificación. Los valores mayores para la categoría de cambio climático y toxicidad humana se podrían explicar debido a la amplia cantidad de unidades analizada en este estudio, ya que el autor de referencia sólo toma en cuenta el proceso de molienda y la reacción de licuefacción hidrotérmica.

Por otro lado, Chan *et al.* (2018) analiza el ciclo de vida del proceso de licuefacción hidrotérmica de cáscara de almendra de palma. El proceso incluye la molienda de la biomasa, la licuefacción hidrotérmica y el uso de tolueno como solvente para

extraer el biocrudo. Las condiciones de reacción fueron 390 °C, 25 MPa y 1 hora. En este caso, los resultados obtenidos fueron 30,27 kg CO₂-Eq / kg biocrudo. De igual manera, se muestran otras categorías de impacto, como la acidificación con 0,25 kg SO₂-Eq / kg biocrudo, eutrofización con 0,012 kg P₂-Eq / kg biocrudo y toxicidad humana con 4,53 kg 1,4-DCB-Eq / kg biocrudo.

A partir de la referencia anterior, es posible observar que los resultados obtenidos en el presente estudio para cambio climático, eutrofización y acidificación son todos menores a los incluidos en la referencia, aún considerando las otras unidades del proceso, lo cual permite concluir que el proceso planteado es adecuado según estándares encontrados.

Por su parte, Fan *et al.* (2011) estudia la producción de electricidad a partir de la pirólisis de sauce. Los autores consideran las etapas de cultivo, recolección y transporte, pirólisis y combustión para la producción de energía. Sin embargo, para la comparación de resultados, no se toma en cuenta los impactos generados por la producción de electricidad. El proceso de pirólisis reporta un valor de 8,59 kg CO₂-Eq / MJ biocrudo, mientras que el presente estudio muestra un valor de 0,667 kg CO₂-Eq / MJ biocrudo. Lo anterior indica que, respecto a esta referencia, el impacto del proceso propuesto es significativamente menor.

Por último, Nie y Bi (2018) realiza un análisis de ciclo de vida de la licuefacción hidrotérmica de residuos forestales. En primera instancia, los residuos son recolectados, transportados y cortados. La biomasa se mezcla con agua caliente que se recicla del proceso de reacción, utilizando un 8 % en masa de contenido sólido. Finalmente se da un proceso de conversión que incluye la licuefacción hidrotérmica, una digestión anaeróbica y un proceso de hidrotratamiento. En este caso, no se tomará en cuenta las emisiones producto del hidrotratamiento.

Los autores reportan como resultado 0,012 kg CO₂-Eq / MJ biocrudo. El valor obtenido en el presente estudio (0,667 kg CO₂-Eq / MJ biocrudo) corresponde a una cantidad significativamente mayor. Al igual que con los estudios anteriores, esta diferencia se puede deber a la consideración del resto de equipos propuestos, especialmente la unidad de calentamiento del lodo biomásico.

Según los datos obtenidos, los resultados en las distintas categorías de impacto

se encuentran dentro de magnitudes similares o incluso inferiores a los resultados reportados por otros procesos similares. Por otro lado, el presente estudio contempla un proceso más completo y con más equipos, por lo que los resultados pueden resultar ser mayores. Sin embargo, aún teniendo más unidades de proceso, el presente estudio llega a tener impactos menores a los reportados por otros autores. Debido a lo anterior, se concluye que el proceso de LHT planteado en este estudio es competitivo en términos de análisis de ciclo de vida con otros procesos productivos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Del dimensionamiento propuesto a partir del reactor, se concluye que en Costa Rica hay suficiente biomasa disponible para suplir la demanda de esta actividad industrial (5 000 ton anuales) e incluso una futura expansión, pues en este proceso sólo se estaría captando el 0,3 % del rastrojo de piña disponible en el país.
- A partir del rendimiento alcanzado en el proceso batch de laboratorio se calculó que la planta industrial podría producir 484 ton anuales de biocrudo; sin embargo, a través de la simulación se obtuvo 510 ton anuales de biocrudo. Según lo anterior, se concluye que la recirculación de la fase acuosa al reactor, permite aumentar el rendimiento final de la reacción de LHT.
- A través de un análisis de ciclo de vida, se obtiene que para producir 1 kg de biocrudo mediante licuefacción hidrotérmica de rastrojo de piña se generan 23,953 kg CO₂ – Eq; 0,12063 kg SO₂ – Eq; 0,00697 kg P₂ – Eq y 7,02068 kg 1,4 – DCB – Eq. Al comparar estos resultados con los reportados por otros estudios, se concluye que el proceso planteado es competitivo en términos de ciclo de vida con otros procesos productivos.
- De la evaluación de impactos del ciclo de vida, se concluye que la producción y almacenamiento de sales térmicas provocan que la unidad de proceso con mayor contribución en cada categoría de impacto analizada sea la unidad de calentamiento, con un 97,95 % de contribución.
- A través de la evaluación de impactos del análisis de ciclo de vida del proceso, se concluye que el reciclaje de la fase acuosa es la acción que mayormente contribuye a disminuir los impactos del sistema, pues genera la mayor cantidad de impactos evitados (-400,57 %).

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda ampliar el sistema estudiado tomando en cuenta un proceso de refinamiento del biocrudo, con el fin de obtener resultados para la producción completa de combustibles.
- Se recomienda considerar el tratamiento de aguas del proceso y aprovechar el biogás producido en este, con el fin de evitar cargas en procesos de calentamiento de corrientes.
- Se recomienda ampliar el estudio considerando los sólidos producidos como subproducto del sistema para abono, realizando una asignación de cargas.
- Se recomienda estudiar pretratamientos o el uso de catalizadores para disminuir la cantidad de energía necesaria en la reacción de LHT, con el fin de disminuir o eliminar el requerimiento de un calentador antes del reactor, pues es la unidad con mayor impacto en el proceso.

NOMENCLATURA

| | | |
|--------|-----------------------|-----------------|
| ρ | Densidad, | g/cm^3 |
| τ | Tiempo de residencia, | h |

Mayúsculas

| | | |
|-----------|--|--------------|
| $\%H$ | Porcentaje de humedad, | % |
| $\%R$ | Porcentaje de rendimiento, | % |
| \dot{F} | Flujo, | t/d |
| \dot{V} | Flujo volumétrico, | L/h |
| AP | Potencial de acidificación, | adim |
| F | Fuerza, | N |
| GWP | Potencial de cambio climático para un horizonte de 100 años, | adim |
| HHV | Calor de combustión, | kJ/kg |
| HTP | Potencial de toxicidad humana, | adim |
| NP | Potencial de nutrificación, | adim |
| P | Potencia, | kW |
| V | Volumen, | m^3 |

Minúsculas

| | | |
|-----|--|------|
| f | Fracción de una sustancia que se transporta desde el lugar de emisión hasta el compartimiento ambiental, | adim |
| m | Masa, | kg |
| n | Comportamiento ambiental, | adim |
| v | Velocidad, | m/s |

Subíndices

- A* Se refiere a los datos masa de humedad
- acuoso* Se refiere a los datos de la fase acuosa
- agua* Se refiere a los datos del agua
- alim* Se refiere a los datos de la corriente de alimentación
- banda* Se refiere a la banda transportadora
- BC* Se refiere al biocrudo
- BM* Se refiere a la biomasa
- d* Se refiere a los datos diarios
- dis* Se refiere al diesel
- gln* Se refiere a la gasolina
- hojas* Se refiere a los datos de las hojas del rastrojo de piña
- i* Se refiere a una sustancia *i*
- proc* Se refiere a los datos de procesamiento
- r/p* Se refiere a los datos de reactivos o productos
- raiz* Se refiere a los datos de la raíz del rastrojo de piña
- react* Se refiere a los datos del reactor
- S* Se refiere a los datos de masa seca
- slido* Se refiere a los datos de la fase sólida
- T* Se refiere a la tensión de la banda transportadora
- tallo* Se refiere a los datos del tallo del rastrojo de piña
- teor* Se refiere a los datos teóricos
- TOT* Se refiere a la totalidad de los datos

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña Navarro, O. (2018). Desechos de la piña: un dolor de cabeza para productores. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/desechos-de-la-pina-un-dolor-de-cabeza-para-productores.html>. [Accesado el 8 de Febrero de 2021].
- Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A., y Watson, I. (2018). Biomass conversion technologies. En *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*, pp. 107–139. Elsevier.
- AmAr Equipment (2021). Continious flow technology. <https://amarequip.com/public/uploads/downloads/flow-reactor-catalog-1664884679.pdf>. [Accesado el 25 de Julio de 2021].
- Anastasakis, K., Biller, P., Madsen, R. B., Glasius, M., y Johannsen, I. (2018). Continuous hydrothermal liquefaction of biomass in a novel pilot plant with heat recovery and hydraulic oscillation. *Energies*, 11(10):2695.
- Antón Vallejo, M. A. (2004). *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Aspen Technology, I. (2000). Aspen plus user guide version 10.2.
- AspenTech (2001). Aspen physical property system - methods and models 11.1. http://web.ist.utl.pt/~ist11061/de/ASPEN/Physical_Property_Methods_and_Models.pdf. [Accesado el 06 de Diciembre de 2021].
- AspenTech (2013). Getting started modeling processes with solids. http://profsite.um.ac.ir/~fanaei/_private/Solids%208_4.pdf. [Accesado el 06 de Diciembre de 2021].
- Azqueta Oyarzún, D. y Delacámara, G. (2008). El costo ecológico de la extracción de petróleo: una simulación. *Revista de la CEPAL*.

- Balboa, C. H. y Somonte, M. D. (2014). Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3. *Informador técnico*, 78(1):82–90.
- Bauer, T., Pflieger, N., Laing, D., Steinmann, W.-D., Eck, M., y Kaesche, S. (2013). High-temperature molten salts for solar power application. En *Molten salts chemistry*, pp. 415–438. Elsevier.
- Bennion, E. P., Ginosar, D. M., Moses, J., Agblevor, F., y Quinn, J. C. (2015). Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: comparison of thermochemical processing pathways. *Applied Energy*, 154:1062–1071.
- Berglin, E. J., Enderlin, C. W., y Schmidt, A. J. (2012). Review and assessment of commercial vendors/options for feeding and pumping biomass slurries for hydrothermal liquefaction. Technical report, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- BERMAD (2021). Válvula reductora de presión. https://www.bermad.com/app/uploads/2016/06/ww-720_spanish.pdf. [Accesado el 21 de Agosto de 2021].
- Bonk, A. y Bauer, T. (2021). Report on thermo-physical properties of binary nano₃-kno₃ mixtures in a range of 59-61 wt % nano₃.
- CANAPEP (2017). Bioeconomía para aprovechar desechos orgánicos. <https://canapep.com/revistas/pina-de-cr-26.pdf>. [Accesado el 8 de Febrero de 2021].
- CANAPEP (2018). Revista piña de costa rica. https://issuu.com/revistapinadecostarica/docs/revista_pi_a_de_costa_rica__edici_n. [Accesado el 28 de Abril de 2021].
- CANAPEP (2020). Exportaciones de Piña Fresca – Cifras en Millones de Dólares. <https://canapep.com/estadisticas/>. [Accesado el 2 de Septiembre de 2020].
- Cao, L., Zhang, C., Chen, H., Tsang, D. C. W., Luo, G., Zhang, S., y Chen, J. (2017). Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects. *Bioresource Technology*, 245:1184–1193.

- Capellán Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Carpintero, , Miguel, L. J., y Aguirre, L. (2014). Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socio-económicos: un enfoque integrado. *Energy*, 1:1–62.
- Çarazo, E., Aravena, J., Dubois, V., y others"(2016). Condiciones de producción, impactos humanos y ambientales en el sector piña en costa rica. *San José: Oxfam Germany*.
- Castello, D., Haider, M. S., y Rosendahl, L. A. (2019). Catalytic upgrading of hydrothermal liquefaction biocrudes: Different challenges for different feedstocks. *Renewable Energy*, 141:420–430.
- Castro Vega, A. (2011). *Estudio de la naturaleza química de biocrudos obtenidos mediante licuefacción hidrotérmica de biomasa lignocelulósica*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia.
- CCA (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas. Technical report, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.
- CENADA (2021). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Technical report, Centro Nacional de Abastecimiento y Distribución de Alimentos. [Accesado el 22 de Febrero de 2021].
- Chacón, L., Coto, O., Flores, O., y Ambiente, E. M. A. E. M. (2018). Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica.
- Chan, Y. H., Tan, R. R., Yusup, S., Lam, H. L., y Quitain, A. T. (2016). Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-oil production from fast pyrolysis and hydrothermal liquefaction of oil palm empty fruit bunch (EFB). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(6):1759–1768.
- Chan, Y. H., Tan, R. R., Yusup, S., Quitain, A. T., Loh, S. K., y Uemura, Y. (2018). Life cycle assessment (lca) of production and fractionation of bio-oil derived from palm kernel shell: a gate-to-gate case study. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2(4):343–351.

- Chaturvedi, V. y Verma, P. (2013). An overview of key pretreatment processes employed for bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value added products. *3 Biotech*, 3(5):415–431.
- Cheng, S., D'cruz, I., Wang, M., Leitch, M., y Xu, C. (2010). Highly efficient liquefaction of woody biomass in hot-compressed alcohol- water co-solvents. *Energy & Fuels*, 24(9):4659–4667.
- Christian, V., Cornellia, M., y Catalina, A. (2020). Informe: Monitoreo del estado de la piña en costa rica para el año 2018. <http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/7892>. [Accesado el 9 de Febrero de 2021].
- Chuck, C. J., Parker, H. J., Jenkins, R. W., y Donnelly, J. (2013). Renewable biofuel additives from the ozonolysis of lignin. *Bioresource technology*, 143:549–554.
- Colina Irezabal, M. L. (2016). Reducción de tamaño de sólidos. http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mlci/red_tam_solidos_intro.pdf. [Accesado el 23 de Febrero de 2021].
- Colón, J. y Arena, P. (2016). *Guías metodológicas: análisis de ciclo de vida y huella hídrica. Proyecto: MEJORA DE LAS ECONOMÍAS REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL. Cuaderno tecnológico N°32*.
- Coperion (2021). Cte plus extruders. <https://www.coperion.com/en/products-services/extruders-compounding-machines/cte-plus-extruders>. [Accesado el 18 de Agosto de 2021].
- Darojat, K., Hadi, W., y Rahayu, D. E. (2019). Life cycle assessment (lca) utilization of oil palm empty fruit bunches as bioenergy. En *AIP Conference Proceedings*, volumen 2194. AIP Publishing LLC.
- Dimitriadis, A. y Bezergianni, S. (2017). Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68:113–125.

- Ecochain (2020). Life Cycle Assessment Software Tools – Overview & Comparison. <https://ecochain.com/knowledge/life-cycle-assessment-software-overview-comparison/>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].
- EIA (2019). Annual energy outlook 2019. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>. [Accesado el 4 de Septiembre de 2019].
- Elumalai, S. y Pan, X. J. (2011). Chemistry and Reactions of Forest Biomass in Biorefining. En *Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Fibers from Forest Biomass*, volumen 1067 de *ACS Symposium Series*, pp. 109–144. American Chemical Society.
- Fan, J., Kalnes, T. N., Alward, M., Klinger, J., Sadehvandi, A., y Shonnard, D. R. (2011). Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil. *Renewable Energy*, 36(2):632–641.
- FAO (2020). Cultivos. <http://www.fao.org/faostat/es/{#}data/QC/visualize>. [Accesado el 2 de Septiembre de 2020].
- Fernandez, S. S. y Jusmet, J. R. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: Algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1):1–19.
- Fernández Fernández, C. (2018). Life Cycle Assessment and Costs. En *Basic Concepts in Ecodesign*, capítulo 04. Ecosign.
- Forbo Siegling GmbH (2014). Cálculo de la banda transportadora. https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-21_09-06-57105684.pdf. [Accesado el 11 de Noviembre de 2021].
- FORECH India Private Limited (s.f.). Chevron conveyor belts. <https://cdn.forech.com/fc/media/Chevon-Conveyor-Catalogue.pdf>. [Accesado el 15 de Septiembre de 2021].

- Forsta Filters Incorporation (2021). Filtro de agua lp180. <https://www.directindustry.es/prod/forsta-filters-incorporation/product-87615-2386081.html>. [Accesado el 22 de Septiembre de 2021].
- Frank, E. D., Elgowainy, A., Han, J., y Wang, Z. (2013). Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1):137–158.
- Gagliano, A., Nocera, F., Bruno, M., y Cardillo, G. (2017). Development of an equilibrium-based model of gasification of biomass by aspen plus. *Energy Procedia*, 111:1010–1019.
- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo Osorio, A., Velásquez Cock, J., Osorio, M., Montoya, , Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., y Molina, C. (2017). Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*, (11):1–4.
- Gollakota, A. R. K., Kishore, N., y Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1378–1392.
- González Alfaro, L. A. (2012). Manual técnico para el manejo de rastrojos en el cultivo de piña. Technical report.
- Goswami, G., Makut, B. B., y Das, D. (2019). Sustainable production of bio-crude oil via hydrothermal liquefaction of symbiotically grown biomass of microalgae-bacteria coupled with effective wastewater treatment. *Scientific reports*, 9(1):1–12.
- Guinée, J. B. y Lindeijer, E. (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*, volumen 7. Springer Science & Business Media.
- Gómez, E., Osorio, A., Ocampo, D., y Ríos, L. (2019). Optimización de la Producción de Biocrudo mediante Licuefacción Hidrotérmica Catalizada de Buchón de Agua. *Información tecnológica*, 30:147–160.
- Hassan, S. S., Williams, G. A., y Jaiswal, A. K. (2018). Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*.

- He, B., Zhang, Y., Yin, Y., Funk, T. L., y Riskowski, G. L. (2001). Effects of feedstock pH, initial CO addition, and total solids content on the thermochemical conversion process of swine manure. *Transactions of the ASAE*, 44(3):697.
- Herrera, M. L., WingChing-Jones, R., y Rojas-Bourrillón, A. (2009). Características fermentativas y nutricionales del ensilaje de rastrojo de piña (*Ananas comosus*). *Agronomía Costarricense*.
- Hmiel, B., Petrenko, V. V., Dyonisius, M. N., Buizert, C., Smith, A. M., Place, P. F., Harth, C., Beaudette, R., Hua, Q., y Yang, B. (2020). Preindustrial 14 CH₄ indicates greater anthropogenic fossil CH₄ emissions. *Nature*, 578(7795):409–412.
- Holladay, J. E., White, J. F., Bozell, J. J., y Johnson, D. (2007). Top value-added chemicals from biomass-Volume II—Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin. Technical report, Richland (WA) Estados Unidos.
- Hsu, D. D. (2012). Life cycle assessment of gasoline and diesel produced via fast pyrolysis and hydroprocessing. *Biomass and bioenergy*, 45:41–47.
- Hussain, Y. A. (s.f.). Annual energy outlook 2019. <https://www.just.edu.jo/~yahussain/files/reactors.pdf>. [Accesado el 18 de Marzo de 2021].
- IFU-Hamburg (2020). Umberto. <https://www.ifu.com/en/umberto/lca-software/{#}:{~}:text=Umbertoisoneofthe,SupportbyexperiencedLCAexperts>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].
- IMN (2020). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Technical report, Instituto Meteorológico Nacional. [Accesado el 19 de Septiembre de 2020].
- ISM (2020a). GaBi: Herramienta de ACV. <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/gabi-herramienta-de-acv/>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].
- ISM (2020b). SimaPro: Herramienta de ACV. <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/>

- simapro-herramienta-de-analisis-de-ciclo-de-vida/. [Accesado el 22 de octubre de 2020].
- ISO (2006). Environmental management— Life cycle assessment — Principles and framework.
- Jackson, R. B., Vengosh, A., Carey, J. W., Davies, R. J., Darrah, T. H., O’Sullivan, F., y Pétron, G. (2014). The Environmental Costs and Benefits of Fracking. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1):327–362.
- Jazrawi, C., Biller, P., Ross, A. B., Montoya, A., Maschmeyer, T., y Haynes, B. S. (2013). Pilot plant testing of continuous hydrothermal liquefaction of microalgae. *Algal Research*, 2(3):268–277.
- Jirón García, E. (2020). Piña: la novedosa fuente de fibras textiles. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2020/03/26/pina-la-novedosa-fuente-de-fibras-textiles.html>. [Accesado el 29 de Abril de 2021].
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2):37–40.
- Kozliak, E. I., Kubátová, A., Artemyeva, A. A., Nagel, E., Zhang, C., Rajappagowda, R. B., y Smirnova, A. L. (2016). Thermal Liquefaction of Lignin to Aromatics: Efficiency, Selectivity, and Product Analysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(10):5106–5122.
- Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P., y Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae.
- Leiva, E. H. (2016). Análisis de ciclo de vida. *Escuela de organización industrial, España*.
- Leng, S., Leng, L., Chen, L., Chen, J., Chen, J., y Zhou, W. (2020). The effect of aqueous phase recirculation on hydrothermal liquefaction/carbonization of biomass: A review. *Bioresource Technology*, 318:124081.

- Luoyang Runcheng Petrochemical Equipment (2021). Three-phase separator. <http://www.lyrcpe.com/product/showproduct.php?id=8&lang=en>. [Accesado el 23 de Agosto de 2021].
- Madsen, R., Bernberg, R., Biller, P., Becker, J., Iversen, B., y Glasius, M. (2017). Hydrothermal co-liquefaction of biomasses: quantitative analysis of bio-crude and aqueous phase composition. *Sustainable Energy & Fuels*, 1(4):789–805.
- Madsen, R. B., Biller, P., Jensen, M. M., Becker, J., Iversen, B. B., y Glasius, M. (2016). Predicting the chemical composition of aqueous phase from hydrothermal liquefaction of model compounds and biomasses. *Energy & Fuels*, 30(12):10470–10483.
- MAG (2020). Caracterización regional 2020: Región de desarrollo agropecuario huetar norte. http://www.mag.go.cr/regiones/huetar_norte/caracterizacion-regional.pdf. [Accesado el 9 de Febrero de 2021].
- Magdeldin, M., Kohl, T., y Järvinen, M. (2017). Techno-economic assessment of the by-products contribution from non-catalytic hydrothermal liquefaction of lignocellulose residues. *Energy*, 137:679–695.
- Mansor, A. M., Lim, J. S., Ani, F. N., Hashim, H., y Ho, W. S. (2018). Ultimate and proximate analysis of malaysia pineapple biomass from md2 cultivar for biofuel application. *Chemical Engineering Transactions*, 63:127–132.
- Martin Navarro, A. (2012). *Aplicación de las Técnicas ACV al Ámbito de la Impresión Offset*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla.
- Masoumi, S., Borugadda, V. B., Nanda, S., y Dalai, A. K. (2021). Hydrochar: a review on its production technologies and applications. *Catalysts*, 11(8):939.
- Mata Monge, O. J. (2019). Diseño, dimensionamiento y costeo de un reactor a escala de laboratorio para la obtención de hidrógeno a partir de la gasificación de biomasa húmeda en agua a condiciones supercríticas.

- Mathanker, A., Pudasainee, D., Kumar, A., y Gupta, R. (2020). Hydrothermal liquefaction of lignocellulosic biomass feedstock to produce biofuels: Parametric study and products characterization. *Fuel*, 271:117534.
- Mathew, M. (2017). *Optimum co-product utilization from hydrothermal liquefaction of microalgae*. Tesis doctoral, Arizona State University.
- Mathias, P. M. (1983). A versatile phase equilibrium equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 22(3):385–391.
- Maurer Gep Kft (2021). Lavadora agroalimentaria para verdura mdk 3000. <https://www.directindustry.es/prod/maurer-gep-kft/product-211011-2277280.html>. [Accesado el 18 de Agosto de 2021].
- Meijer, E. (2021). Getting started modeling processes with solids. <https://pre-sustainability.com/articles/consider-your-audience-when-doing-lca/>. [Accesado el 14 de Noviembre de 2022].
- Mood, S. H., Golfeshan, A. H., Tabatabaei, M., Jouzani, G. S., Najafi, G. H., Gholami, M., y Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27:77–93.
- MTSS (s.f.). Vacaciones. Technical report, Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. [Accesado el 22 de Febrero de 2021].
- Muppaneni, T. (2015). *Hydrothermal liquefaction of algae for the production of biofuels*. (Tesis doctoral). New Mexico State University.
- Méndez Masís, D. E. (2021). Entrevista de reuti-piña y bromé.
- Nie, Y. y Bi, X. (2018). Life-cycle assessment of transportation biofuels from hydrothermal liquefaction of forest residues in British Columbia. *Biotechnology for biofuels*, 11(1):23.

Nogués, F. S., García-Galindo, D., y Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)*. Colección de textos docentes: Serie Energías renovables. Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1 edición.

OpenLCA (2020). OpenLCA software. <https://www.openlca.org/>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].

Pandey, A., Bhaskar, T., Stöcker, M., y Sukumaran, R. K. (2015a). 10 Introduction. En *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, capítulo 10. Elsevier.

Pandey, A., Bhaskar, T., Stöcker, M., y Sukumaran, R. K. (2015b). 16 Hydrothermal Liquefaction. En *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, capítulo 16. Elsevier.

PCM (2021a). Bombas y sistemas industriales. https://www.pcm.eu/sites/default/files/br_industry_pumps_catalogue_esp_b_march2021.pdf. [Accesado el 21 de Agosto de 2021].

PCM (2021b). Ecomoineau m - la primera bomba de cavidad progresiva eco-design. https://www.pcm.eu/sites/default/files/pcm_catalogo_ecomoiner_m_1.pdf. [Accesado el 21 de Agosto de 2021].

Penagos (2021). Picadora para ensilaje pe-700. <https://www.penagos.com/productos/picadora-para-ensilaje-pe-700/>. [Accesado el 06 de Julio de 2021].

Peterson, G. (2018). The Effects of Integrated Chemical Catalysis and Reductive Pretreatment on Hydrothermal Liquefaction Derived Bio-oil Yield, Composition, and Stability.

Peña Bonilla, M. E. (2018). Ensilaje de rastrojo de pinya: una opción viable para productores. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/ensilaje-de-rastrojo-de-pina-una-opcion-viable-para-productores-agropecuarios.html>. [Accesado el 2 de Septiembre de 2020].

Programa País Carbono Neutralidad (2021). Inte b5:2020 e iso 14064-1:2019. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fcambioclimatico.go.cr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F06%2FCapacitaci%25C3%25B3n%2520INTE%2520B5%2520y%252014064-1%2520FINAL.pdf%3Fx80476>. [Accesado el 6 de Noviembre de 2021].

Pré Sustainability (2021). Recipe. <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>. [Accesado el 14 de Noviembre de 2022].

Pérez, G. (2013). Análisis del Ciclo de Vida comparativo de una mermelada de naranja ecológica y no ecológica. *Universidad de Valladolid*.

Quemada, J. M. M. y González, E. S. M. (2011). El futuro de los combustibles fésiles. *Carbón*, 27(21):34.

Quesada Solís, K., Alvarado Aguilar, P., Sibaja Ballester, R., y Vega Baudrit, J. (2005). Utilización de las fibras del rastrojo de piña (ananas comusus, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster.

Ramírez, J. A., Brown, R. J., y Rainey, T. J. (2015). A review of hydrothermal liquefaction bio-crude properties and prospects for upgrading to transportation fuels. *Energies*, 8(7):6765–6794.

RECOPE (s.f.). Poderes calóricos de algunos combustibles. <https://www.recope.go.cr/productos/sistema-de-calidad/poderes-caloricos-de-algunos-combustibles/>. [Accesado el 25 de Febrero de 2021].

Renon, H. y Prausnitz, J. M. (1968). Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures. *AIChE journal*, 14(1):135–144.

Reyes Plascencia, C. (2020). *Licuefacción hidrotérmica de madera de eucalipto y pino para la producción de biocombustibles*. Tesis doctoral, Universidad de la República Uruguay.

- Rodríguez, B. I. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IiE*, pp. 91–97.
- Ruíz López, E. (2016). El análisis del ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación.
- Sandoval, V. P., Jaca, C., y Ormazabal, M. (2017). Economía circular. *Memoria Investigaciones en Ingeniera*, (15):85–95.
- Sankarden, K., Islam, A., y Anderson, D. (2012). Ozonation. En *Methods in Lignin Chemistry*, pp. 387–406. Springer, Berlin.
- Sathre, R. (2014). Comparing the heat of combustion of fossil fuels to the heat accumulated by their lifecycle greenhouse gases. *Fuel*, 115:674–677.
- Saunio, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregon, A., Ciais, P., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Etiope, G., Bastviken, D., y Houweling, S. (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*, 8(2):697–751.
- SEPSE (2019). Balances Energéticos. <https://sepse.go.cr/ciena/balances-energeticos/>. [Accesado el 5 de Enero de 2021].
- Sigma Thermal (2021). Hc2 heater thermal fluid heating. <https://industrial.sigmathermal.com/hubfs/HC2-Pre-Engineered-Heater-Brochure.pdf?hsCtaTracking=fc326fe3-f61d-421a-8593-2ecaf238da5c%7C109bc484-993d-4e2a-8964-fb2f60511d31>. [Accesado el 21 de Agosto de 2021].
- SimaPro (2020). LCA software for fact-based sustainability. <https://simapro.com/>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].
- Sphera (2020). GaBi software. <http://www.gabi-software.com/international/index/>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].
- Spinozzi, D. (2020). ¿cómo calcular la velocidad lineal de una cinta transportadora? <https://www.spinozziargentina.com/post/c%C3%>

B3mo-calcular-la-velocidad-lineal-de-una-cinta-transportadora.

[Accesado el 16 de Agosto de 2021].

Sun, P., Heng, M., Sun, S., y Chen, J. (2010). Direct liquefaction of paulownia in hot compressed water: Influence of catalysts. *Energy*, 35(12):5421–5429.

SUNKAIER (s.f.). Sk3020 twin shaft kneader reactors. <http://www.sunkaier.com/products/kneaders%20and%20system/sk3020%20twin%20shaft%20reactors/sk3020%20twin%20shaft%20kneader%20reactors/>. [Accesado el 15 de Septiembre de 2021].

TECPA (2015). Software para elaborar analisis de ciclo de vida (ACV). <https://www.tecpa.es/software-para-elaborar-analisis-de-ciclo-de-vida-acv/>. [Accesado el 22 de octubre de 2020].

Trelleborgs (s.f.). Bandas transportadoras de alta calidad, fabricadas de conformidad con los requisitos de las normas internacionales. https://www.trelleborgslovenija.com/images/products-trans/catalogues/ESP-katalog_conveyor-belts_2020.pdf. [Accesado el 18 de Agosto de 2021].

Ulate Sancho, R. (2020). Evaluación del tratamiento por licuefacción hidrotérmica del rastrojo de piña para la obtención de un biocrudo. B.S. thesis, Universidad de Costa Rica.

UNEP (2006). *Handbook for the Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer*. UNEP/Earthprint.

Vargas, M. V., Chaverri, R. H., y Silva, A. J. (2019). Caracterización de la biomasa de piña (ananas comosus) y su valoración en la propagación micelial del hongo shiitake (leninula edodes). *Yulök Revista de Innovación Académica*, 3(1):13–27.

Villadsen, S. R., Dithmer, L., Forsberg, R., Becker, J., Rudolf, A., Iversen, S. B., Iversen, B. B., y Glasius, M. (2012). Development and application of chemical analysis methods for investigation of bio-oils and aqueous phase from hydrothermal liquefaction of biomass. *Energy & fuels*, 26(11):6988–6998.

- Vivancos Bono, J. L., Collado Ruíz, D., Bastante Ceca, M. J., Gómez Navarro, T., y Capuz Rizo, S. (2005). Análisis de Diversas Metodologías de Evaluación del Impactos del Ciclo de Vida. pp. 963–978, Valencia.
- Viquez-Zamora, M. D. (2014). Determinación de la factibilidad ambiental del co-procesamiento de llantas en hornos cementeros de va seca mediante el análisis de impactos ambientales utilizando el software SIMAPRO 7.3. 3.
- Watson, J., Wang, T., Si, B., Chen, W.-T., Aierzhati, A., y Zhang, Y. (2020). Valorization of hydrothermal liquefaction aqueous phase: pathways towards commercial viability. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77:100819.
- Xiu, S. y Shahbazi, A. (2012). Bio-oil production and upgrading research: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7):4406–4414.
- "Yang, L., Nazari, L., Yuan, Z., Corscadden, K., Xu, C. C., y others"(2016). Hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds in water medium for bio-oil production. *Biomass and Bioenergy*, 86:191–198.
- Yin, S. y Tan, Z. (2012). Hydrothermal liquefaction of cellulose to bio-oil under acidic, neutral and alkaline conditions. *Applied Energy*, 92:234–239.
- Yin, S., Zhang, N., Tian, C., Yi, W., Yuan, Q., Fu, P., Zhang, Y., y Li, Z. (2021). Effect of accumulative recycling of aqueous phase on the properties of hydrothermal degradation of dry biomass and bio-crude oil formation. *Energies*, 14(2):285.

APÉNDICES

A. DATOS EXPERIMENTALES

Cuadro A.1. Datos de humedad, cantidad de rastrojo de piña y rendimiento del proceso de LHT para el cálculo de la cantidad de biocrudo a producir en la planta.

| Dato | Valor |
|--|-------|
| Porcentaje de humedad, $\%H$ / % | 77,73 |
| Masa de rastrojo de piña a procesar, m_{rastrojo} / ton | 4 838 |
| Masa de humedad en el rastrojo de piña, m_A / ton | 3 891 |
| Masa seca de rastrojo de piña, m_S / ton | 1 115 |
| Porcentaje de rendimiento de biocrudo, $\%R$ / % | 43,4 |
| Masa de biocrudo a producir, m_{BC} / ton | 484 |

Cuadro A.2. Datos masas de reactivos y productos de la reacción de licuefacción hidrotérmica experimental para el cálculo del rendimiento del reactor introducido al simulador Aspen Plus.

| Dato | Valor |
|--|-------|
| Masa de rastrojo de piña, m_{BM} / g | 30 |
| Masa de agua, m_{agua} / g | 170 |
| Masa total de alimentación, m_{TOT} / g | 200 |
| Masa de biocrudo, m_{BC} / g | 2,9 |
| Masa de fase acuosa, m_{acuoso} / g | 178 |
| Masa de sólido, $m_{\text{sólido}}$ / g | 2,4 |

Cuadro A.3. Datos de calor de combustión y oferta interna nacional en TJ/año de gasolina y diesel para el cálculo de la oferta interna en ton/año (RECOPE, sf), (SEPSE, 2019).

| Dato | Valor |
|--|-----------------|
| Calor de combustión gasolinas, HHV_{gln} / kJ/kg | 43 500 - 47 700 |
| Calor de combustión diesel, HHV_{dis} / kJ/kg | 42 600 - 43 200 |
| Oferta interna de gasolinas, Of_{gln} / TJ/a | 44 407 |
| Oferta interna de diesel, Of_{dis} / TJ/a | 45 052 |
| Oferta interna de gasolinas, Of_{gln} / ton/a | 973 838 |
| Oferta interna de diesel, Of_{dis} / ton/a | 1 050 163 |

Cuadro A.4. Datos de las corrientes auxiliares utilizadas por el calentador y los enfriadores.

| Dato | Calentador | Enfriador |
|------------------------------------|-------------|-----------|
| Fluido | Sal térmica | Agua |
| Temperatura de entrada, T_i (°C) | 500 | 15 |
| Temperatura de salida, T_o (°C) | 400 | 20 |
| Flujo del servicio, F (t/d) | 77,5338 | 8610,57 |
| Flujo de energía, \dot{E} (kW) | 101,404 | 2082,19 |

Cuadro A.5. Flujos másicos y condiciones físicas de los compuestos introducidos en la simulación de Aspen Plus.

| Compuesto | Flujo másico de corriente, F_m (t/d) | | | | | |
|---------------------------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Rastrojo | Reciclo | S1 | S2 | S3 | S4 |
| Rastrojo | 14,9 | 0 | 14,9 | 14,9 | 14,9 | 14,9 |
| Agua | 0 | 114,427 | 114,427 | 114,427 | 114,427 | 114,427 |
| Ácido acético | 0 | 0,6282 | 0,6282 | 0,6282 | 0,6282 | 0,6282 |
| Ácido glicólico | 0 | 1,977 | 1,977 | 1,977 | 1,977 | 1,977 |
| Metanol | 0 | 0,2392 | 0,2392 | 0,2392 | 0,2392 | 0,2392 |
| Ácido succínico | 0 | 0,1676 | 0,1676 | 0,1676 | 0,1676 | 0,1676 |
| Carbón | 0 | 0,0108 | 0,0108 | 0,0108 | 0,0108 | 0,0108 |
| Ceniza | 0 | 0,0051 | 0,0051 | 0,0051 | 0,0051 | 0,0051 |
| Temperatura, T (°C) | 25 | 78,81 | 76,44 | 81,06 | 290 | 300 |
| Presión, P (psi) | 15 | 15 | 15 | 1251 | 1251 | 1251 |
| Entalpía másica, H (MJ/kg) | -7,169 | -15,44 | -14,73 | -14,71 | -13,47 | -13,45 |
| Flujo de entalpía, \dot{H} (MW) | -1,236 | -22,01 | -22,57 | -22,53 | -20,64 | -20,61 |
| Densidad, ρ (g/cm ³) | 1,2868 | 0,9439 | 1,0238 | 1,0195 | 0,6946 | 0,6879 |

Cuadro A.5. Continuación. Flujos máxicos y condiciones físicas de los compuestos introducidos en la simulación de Aspen Plus.

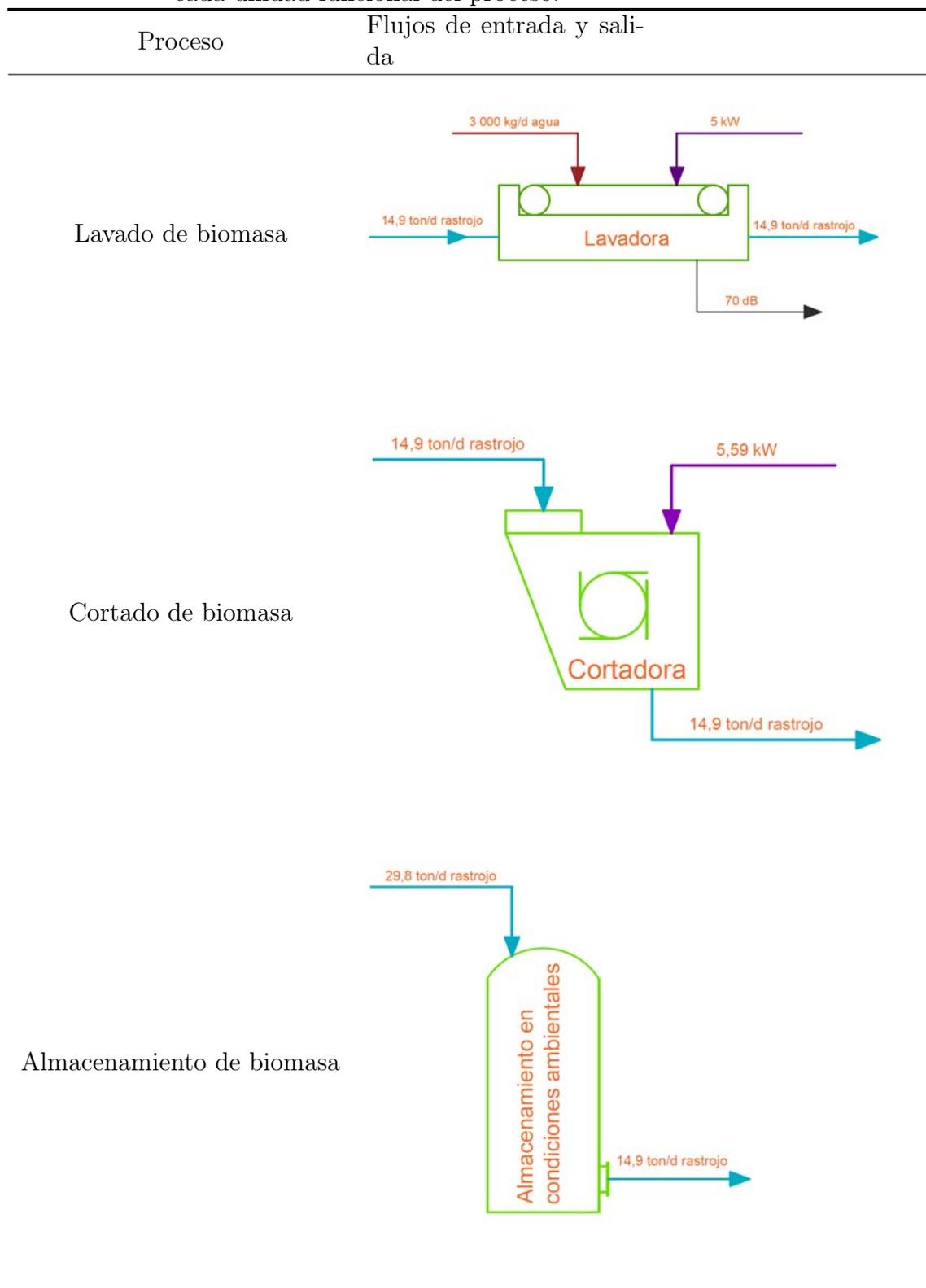
| Compuesto | Flujo máxico de corriente, F_m (t/d) | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | Producto | S5 | S6 | Sólidos | S7 | S8 | Gases |
| Fase Gaseosa: 11,5988 t/d | | | | | | | |
| CO ₂ | 9,2802 | 9,2802 | 9,2802 | 0 | 9,2802 | 9,2802 | 9,2802 |
| H ₂ | 1,3892 | 1,3892 | 1,3892 | 0 | 1,3892 | 1,3892 | 1,3892 |
| CO | 0,8335 | 0,8335 | 0,8335 | 0 | 0,8335 | 0,8335 | 0,8335 |
| CH ₂ | 0,0956 | 0,0956 | 0,0956 | 0 | 0,0956 | 0,0956 | 0,0956 |
| Fase Sólida: 1,6504 t/d | | | | | | | |
| Carbono | 1,1336 | 1,1336 | 1,1336 | 1,1336 | 0,0113 | 0,0113 | 0 |
| Ceniza | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,5335 | 0,0053 | 0,0053 | 0 |
| Fase Acuosa: 123,2590 t/d | | | | | | | |
| Agua | 120,08 | 120,08 | 120,08 | 0 | 120,08 | 120,08 | 0 |
| Ácido acético | 0,6592 | 0,6592 | 0,6592 | 0 | 0,6592 | 0,6592 | 0 |
| Ácido glicólico | 2,0747 | 2,0747 | 2,0747 | 0 | 2,0747 | 2,0747 | 0 |
| Metanol | 0,2510 | 0,2510 | 0,2510 | 0 | 0,2510 | 0,2510 | 0 |
| Ácido succínico | 0,1758 | 0,1758 | 0,1758 | 0 | 0,1758 | 0,1758 | 0 |
| Biocrudo: 1,5173 t/d | | | | | | | |
| p-etilfenol | 0,1450 | 0,1450 | 0,1450 | 0 | 0,1450 | 0,1450 | 0 |
| Fenol | 0,1571 | 0,1571 | 0,1571 | 0 | 0,1571 | 0,1571 | 0 |
| Siringol | 0,0423 | 0,0423 | 0,0423 | 0 | 0,0423 | 0,0423 | 0 |
| Ácido n-hexánico | 0,4050 | 0,4050 | 0,4050 | 0 | 0,4050 | 0,4050 | 0 |
| Ácido linoléico | 0,2800 | 0,2800 | 0,2800 | 0 | 0,2800 | 0,2800 | 0 |
| Dietilftalato | 0,0604 | 0,0604 | 0,0604 | 0 | 0,0604 | 0,0604 | 0 |
| Vainillina | 0,0262 | 0,0262 | 0,0262 | 0 | 0,0262 | 0,0262 | 0 |
| p-xileno | 0,0142 | 0,0142 | 0,0142 | 0 | 0,0142 | 0,0142 | 0 |
| Ciclotridecano | 0,0585 | 0,0585 | 0,0585 | 0 | 0,0585 | 0,0585 | 0 |
| 2,5-hexanodiona | 0,1088 | 0,1088 | 0,1088 | 0 | 0,1088 | 0,1088 | 0 |
| 2-acetilfurano | 0,1028 | 0,1028 | 0,1028 | 0 | 0,1028 | 0,1028 | 0 |
| 2-metil-2-ciclo penten-1-ona | 0,1088 | 0,1088 | 0,1088 | 0 | 0,1088 | 0,1088 | 0 |
| Estearonitrilo | 0,0081 | 0,0081 | 0,0081 | 0 | 0,0081 | 0,0081 | 0 |
| Temperatura, T (°C) | 300 | 272 | 90 | 90 | | 79 | 79 |
| Presión, P (psi) | 1251 | 1251 | 1251 | 90 | 1251 | 45 | 45 |
| Entalpía máxica, H (MJ/kg) | -12,10 | -13,28 | -14,57 | -0,206 | -14,57 | -14,57 | -7,341 |
| Flujo de entalpía, \dot{H} (MW) | -1,401 | -21,22 | -22,83 | -0,004 | -23,00 | -23,00 | -1,048 |
| Densidad, ρ (g/cm ³) | 0,0392 | 0,1136 | 0,7934 | 2,5381 | 0,3320 | 0,0139 | 0,0017 |

Cuadro A.5. Continuación. Flujos másicos y condiciones físicas de los compuestos introducidos en la simulación de Aspen Plus.

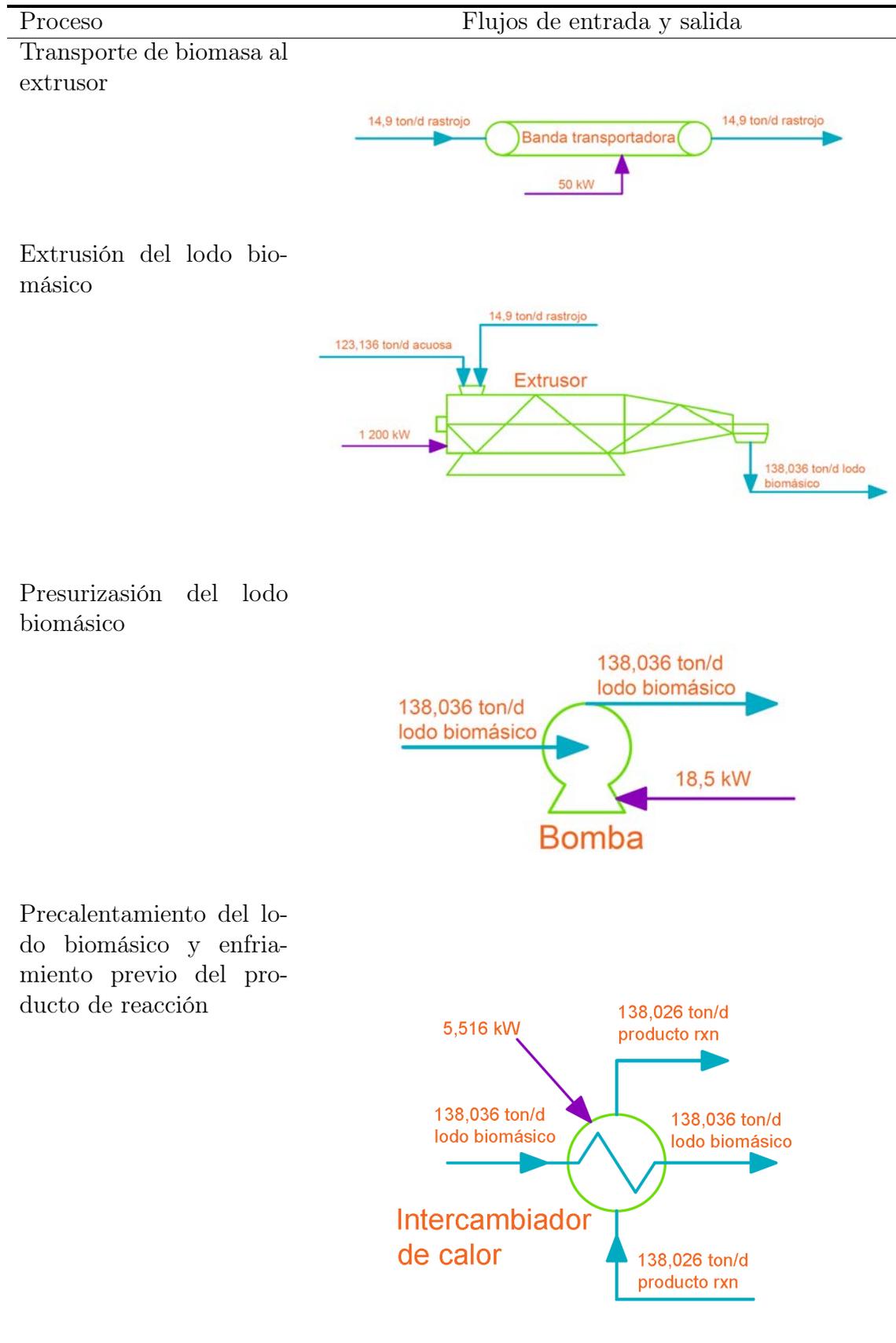
| Compuesto | Flujo másico de corriente, F_m (t/d) | | | |
|---------------------------------------|--|----------|--------|--------|
| | S9 | Biocrudo | Acuoso | Purga |
| Fase Sólida: 1,6504 t/d | | | | |
| Carbono | 0,0113 | 0,0113 | 0,0113 | 0 |
| Ceniza | 0,0053 | 0,0053 | 0,0053 | 0 |
| Fase Acuosa: 123,2590 t/d | | | | |
| Agua | 120,08 | 0 | 120,08 | 0,120 |
| Ácido acético | 0,6592 | 0 | 0,6592 | 0,0007 |
| Ácido glicólico | 2,0747 | 0 | 2,0747 | 0,0021 |
| Metanol | 0,2510 | 0 | 0,2510 | 0,0002 |
| Ácido succínico | 0,1758 | 0 | 0,1758 | 0,0002 |
| Biocrudo: 1,5173 t/d | | | | |
| p-etilfenol | 0,1450 | 0,1450 | 0 | 0 |
| Fenol | 0,1571 | 0,1571 | 0 | 0 |
| Siringol | 0,0423 | 0,0423 | 0 | 0 |
| Ácido n-hexánico | 0,4050 | 0,4050 | 0 | 0 |
| Ácido linoléico | 0,2800 | 0,2800 | 0 | 0 |
| Dietilftalato | 0,0604 | 0,0604 | 0 | 0 |
| Vainillina | 0,0262 | 0,0262 | 0 | 0 |
| p-xileno | 0,0142 | 0,0142 | 0 | 0 |
| Ciclotridecano | 0,0585 | 0,0585 | 0 | 0 |
| 2,5-hexanodiona | 0,1088 | 0,1088 | 0 | 0 |
| 2-acetilfurano | 0,1028 | 0,1028 | 0 | 0 |
| 2-metil-2-ciclo penten-1-ona | 0,1088 | 0,1088 | 0 | 0 |
| Estearonitrilo | 0,0081 | 0,0081 | 0 | 0 |
| Temperatura, T (°C) | 79 | 79 | 79 | 79 |
| Presión, P (psi) | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Entalpía másica, H (MJ/kg) | -15,29 | -2,912 | -15,44 | -15,44 |
| Flujo de entalpía, \dot{H} (MW) | -22,08 | -0,0514 | -22,03 | -22,03 |
| -22,01 | | | | |
| Densidad, ρ (g/cm ³) | 0,9426 | 0,8894 | 0,9439 | 0,9439 |
| 0,9439 | | | | |

B. RESULTADOS INTERMEDIOS

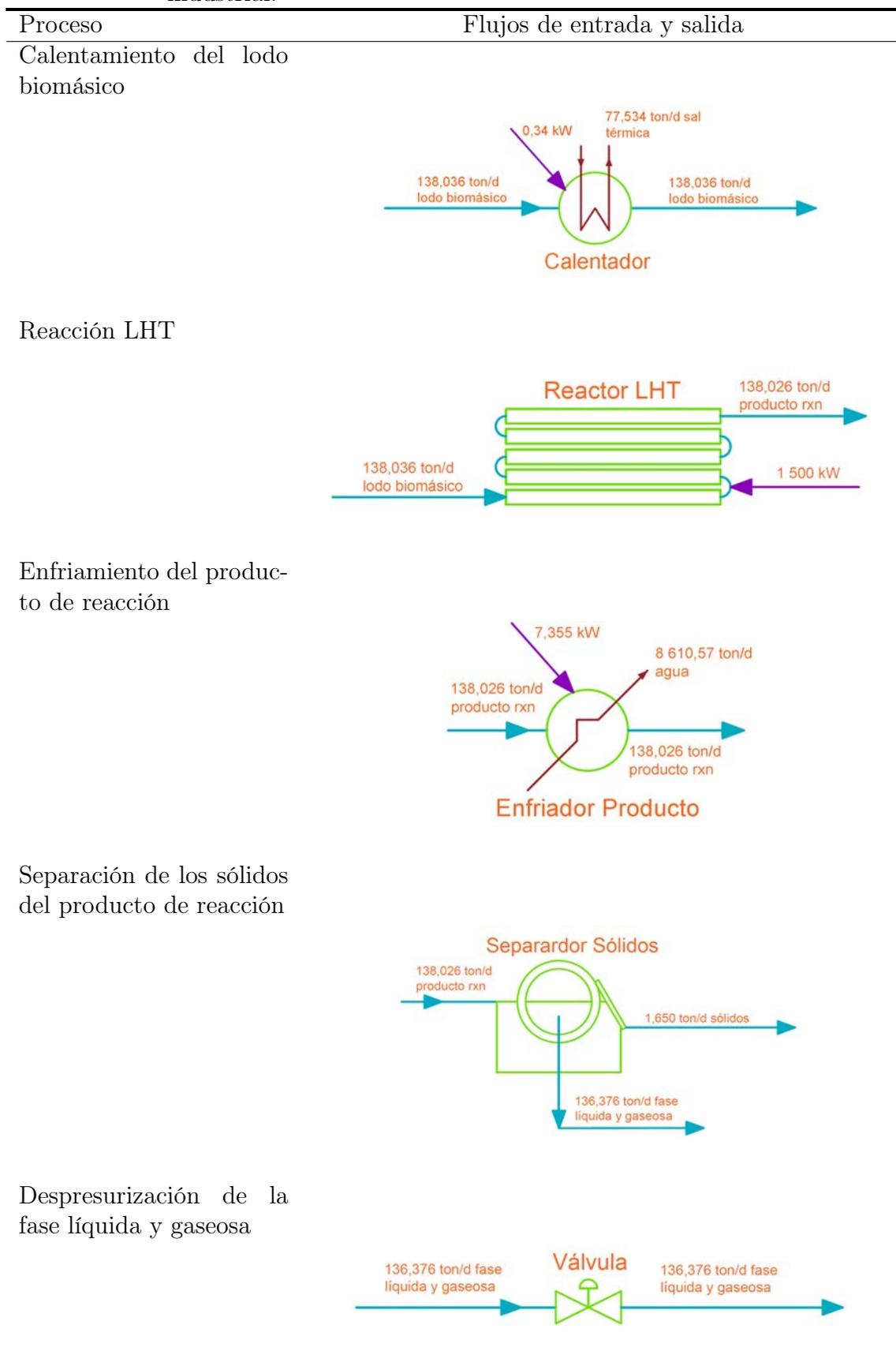
Cuadro B.1. Flujos másicos y energéticos de las corrientes de entrada y salida de cada unidad funcional del proceso.



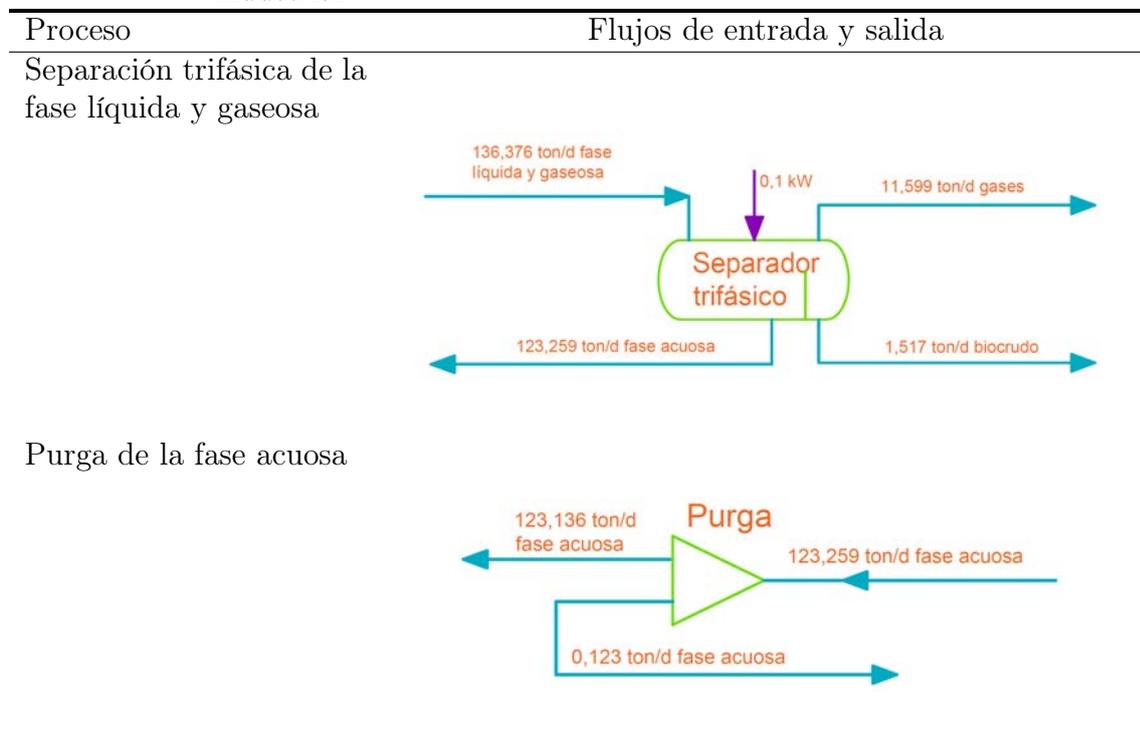
Cuadro B.1. Continuación. Flujos másicos de las corrientes de entrada y salida y requerimientos energéticos de cada unidad funcional del proceso industrial.



Cuadro B.1. Continuación. Flujos másicos de las corrientes de entrada y salida y requerimientos energéticos de cada unidad funcional del proceso industrial.



Cuadro B.1. Continuación. Flujos másicos de las corrientes de entrada y salida y requerimientos energéticos de cada unidad funcional del proceso industrial.



C. MUESTRA DE CÁLCULO

■ Cálculos utilizados para la caracterización de la biomasa

C.1. Cálculo para la determinación del flujo volumétrico de procesamiento:

Para el cálculo del flujo volumétrico de procesamiento se utiliza la fórmula:

$$\dot{V}_{TOT} = \frac{V_{react}}{\tau_{react}} \quad (C.2)$$

dónde:

\dot{V}_{TOT} : Flujo de volumétrico total de procesamiento, L/h

V_{react} : Volumen del reactor, L

τ_{react} : Tiempo de residencia del reactor, h

Utilizando los datos del Cuadro 4.1, fila 2; columna 2 y del Cuadro 3.6, fila 6; columna 3:

$$\dot{V}_{TOT} = \frac{2\,550\text{ L}}{0,793\text{ h}} = 3\,216,42\text{ L/h}$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro 4.1, fila 4, columna 2.

C.2. Cálculo para la determinación del flujo de procesamiento de rastrojo de piña:

Para el cálculo del flujo de procesamiento de rastrojo de piña se utiliza la fórmula:

$$\dot{F}_{BM} = \dot{V}_{TOT} \cdot 15\% \cdot \rho \cdot \frac{1\text{ ton}}{1\,000\,000\text{ g}} \cdot \frac{24\text{ h}}{1\text{ d}} \quad (C.3)$$

dónde:

\dot{F}_{BM} : Flujo de de procesamiento de rastrojo de piña, ton/d

ρ : Densidad del rastrojo de piña, g/L

Utilizando los datos del Cuadro 4.1, fila 4; columna 2 y del Cuadro B.1, fila 14; columna 2:

$$\dot{F}_{BM} = 3\,216,42 \text{ L/h} \cdot 15\% \cdot 1\,286,83 \text{ g/L} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1\,000\,000 \text{ g}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 14,9 \text{ ton/d}$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro 4.2, fila 2, columna 2.

C.3. Cálculo para la determinación del rendimiento del reactor en la simulación de Aspen Plus:

Para el cálculo del rendimiento del reactor se utiliza la fórmula:

$$\%R = \frac{m_{r/p}}{m_{TOT,alim}} \cdot 100\% \quad (\text{C.4})$$

dónde:

$\%R$: Porcentaje de rendimiento, %

$m_{r/p}$: Masa de reactivo o producto, g

$m_{TOT,alim}$: Masa total de la corriente de alimentación, g

Utilizando los datos del Cuadro A.2, filas 3 y 4; columna 2:

$$\%R = \frac{2,9 \text{ g}}{200 \text{ g}} \cdot 100\% = 1,45\%$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro 3.11, fila 1, columna 2.

C.4. Cálculo para la determinación del rendimiento de cada compuesto en el reactor en la simulación de Aspen Plus:

Para el cálculo del rendimiento de cada compuesto en el reactor se utiliza la

fórmula:

$$\%R = \frac{\%i \cdot m_{r/p}}{m_{TOT,alim}} \quad (C.5)$$

dónde:

$\%i$: Porcentaje del compuesto i presente en la fase, %

Utilizando los datos del Cuadro 3.3, fila 2; columna 2 y el Cuadro A.2, fila 4; columna 2:

$$\%R = \frac{7,2\% \cdot 2,9 \text{ g}}{200 \text{ g}} = 0,001044 \%$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro 3.12, fila 1, columna 2.

C.5. Cálculo para la determinación de la masa de humedad presente en la biomasa:

Para el cálculo de la masa de humedad presente en la biomasa se utiliza la fórmula:

$$\%H = \frac{m_A}{m_S + m_A} \cdot 100 \% \quad (C.6)$$

dónde:

$\%H$: Porcentaje de humedad de la biomasa, %

m_S : Masa seca de la biomasa, ton

m_A : Masa de humedad en la biomasa, ton

Utilizando los datos del Cuadro A.1, filas 1 y 2; columna 2:

$$m_A = 5\,006,4 \text{ ton} \cdot \frac{77,73\%}{100\%} = 3\,891,47 \text{ ton}$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro A.1, fila 3, columna 2.

C.6. Cálculo para la determinación de la masa seca de la biomasa:

Para el cálculo de la masa seca de la biomasa se utiliza la fórmula:

$$m_{TOT} = m_S + m_A \quad (C.7)$$

dónde:

m_{TOT} : Masa total de la biomasa, ton

Utilizando los datos del Cuadro A.1, filas 2 y 3; columna 2:

$$m_s = 5\,006,4 \text{ ton} - 3\,891,47 \text{ ton} = 1\,114,9 \text{ ton}$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro A.1, fila 4, columna 2.

C.7. Cálculo para la determinación de la cantidad de biocrudo a producir:

Para el cálculo de la cantidad de biocrudo a producir se utiliza la fórmula:

$$\%R = \frac{m_{BC}}{m_S} \cdot 100 \% \quad (C.8)$$

dónde:

m_{BC} : Masa del biocrudo, ton

$\%R$: Porcentaje de rendimiento del biocrudo, %

Utilizando los datos del Cuadro A.1, filas 4 y 5; columna 2:

$$m_{BC} = 1\,114,9 \text{ ton} \cdot \frac{43,4 \%}{100 \%} = 483,88 \text{ ton}$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro A.1, fila 6, columna 2.

C.8. Cálculo para la determinación de la oferta interna nacional de diesel:

Para el cálculo de la oferta interna de diesel se utiliza la fórmula:

$$Of_{dis} = Of_{dis}(TJ/a) \cdot \frac{1x10^9kJ}{1TJ} \cdot \frac{1}{HHV_{dis}} \cdot \frac{1ton}{1000kg} \quad (C.9)$$

dónde:

Of_{dis} : Oferta de diesel, ton/a

HHV_{dis} : Calor de combustión del diesel, kJ/kg

Utilizando los datos del Cuadro A.3, filas 1 y 3; columna 2:

$$Of_{dis} = 45\,052 \frac{TJ}{a} \cdot \frac{1x10^9kJ}{1TJ} \cdot \frac{1kg}{42\,900kJ} \cdot \frac{1ton}{1000kg} = 1\,050\,163 \text{ ton/a}$$

El resultado tabulado se encuentra en el Cuadro A.3, fila 6, columna 2.

ANEXOS

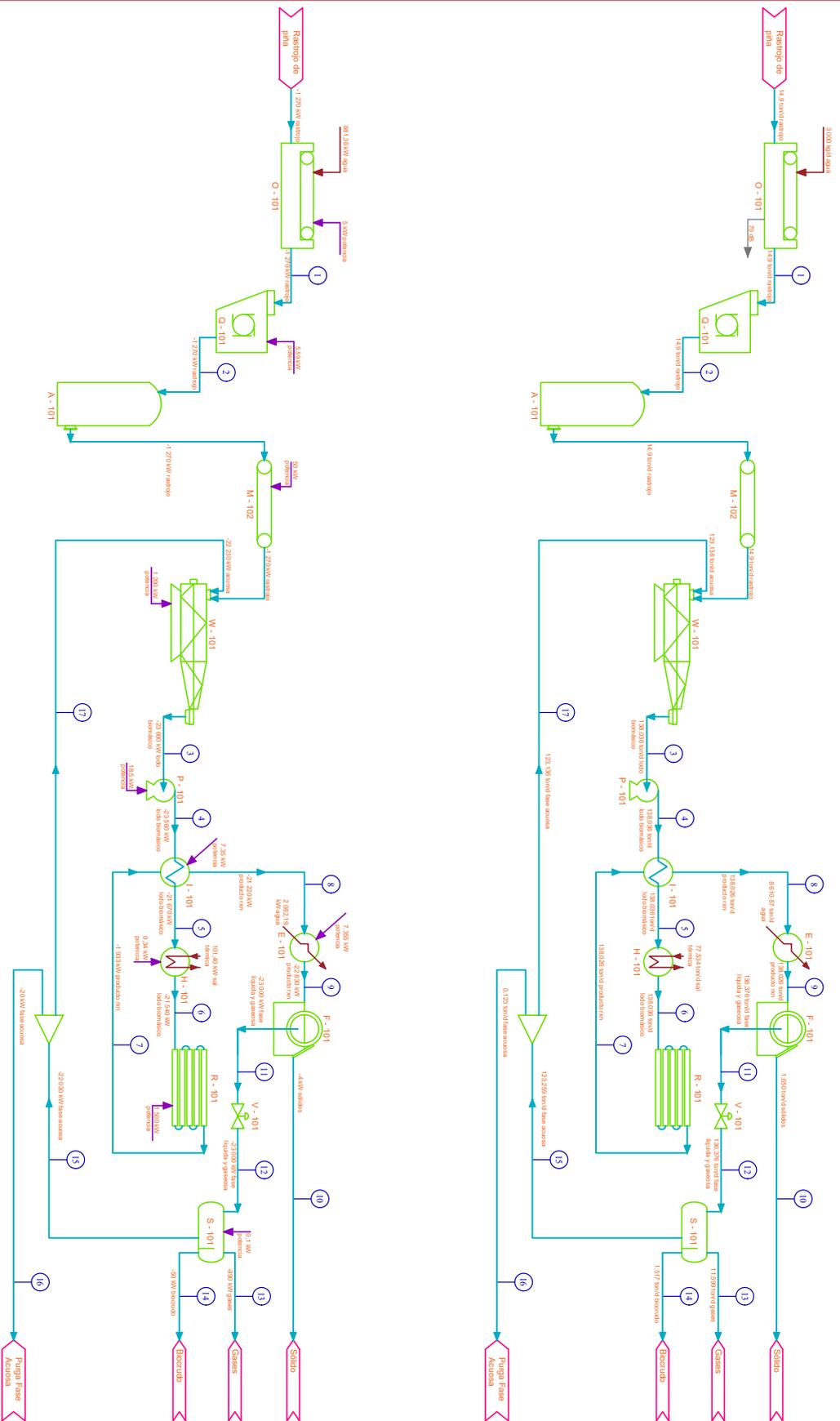
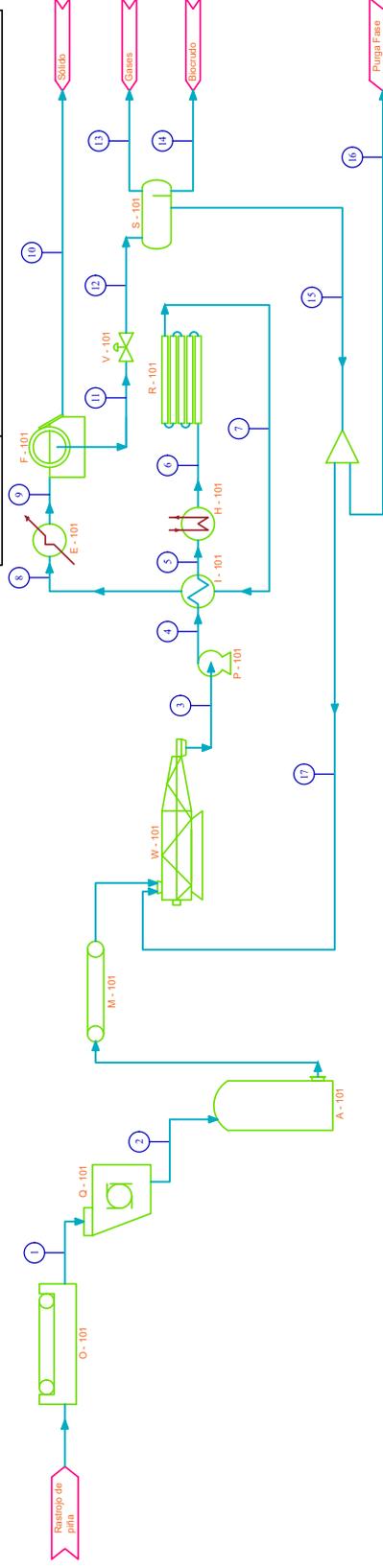


Figura 11.37. Flujos máxicos de entrada y salida y requerimientos energéticos de cada unidad funcional del proceso industrial.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOCRUDO A PARTIR DE LHT

| ITEM | DESCRIPCIÓN |
|-------|-----------------------------|
| A-101 | Almacenamiento de biomasa |
| E-102 | Enfriador de producto |
| F-101 | Filtro de sólidos |
| H-101 | Calentador |
| I-101 | Intercambiador de calor |
| M-101 | Banda transportadora |
| O-101 | Lavadora de biomasa |
| P-101 | Bomba |
| Q-101 | Triturador de sólidos |
| R-101 | Reactor LHT |
| S-101 | Separador trifásico |
| V-101 | Válvula de despresurización |
| W-101 | Extrusor |



| Número | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------|------------------------|--------------------------------------|--------|----------|-------------|-------------------|---------------------|
| Descripción | Rastrojo paja lavado | Rastrojo paja triturado | Lodo biomásico | Lodo biomásico presurizado | Lodo biomásico precalentado | Lodo biomásico caliente | Producto de reacción | Producto de reacción preenfriado | Producto de reacción enfriado | Sólidos | Fase líquida y gaseosa | Fase líquida y gaseosa depresurizada | Gases | Biocrudo | Fase acuosa | Purga fase acuosa | Reciclo Fase acuosa |
| Flujo (ton/día) | 14,900 | 14,900 | 138,036 | 138,036 | 138,036 | 138,036 | 138,026 | 138,026 | 138,026 | 1,650 | 136,376 | 136,376 | 11,599 | 1,517 | 123,259 | 0,123 | 123,136 |
| Temperatura (°C) | 25 | 25 | 76,44 | 81 | 290 | 300 | 90 | 272 | 90 | 90 | 90 | 78,81 | 78,81 | 78,81 | 78,81 | 78,81 | 78,81 |
| Presión (psi) | 15 | 15 | 15 | 1251 | 1251 | 1251 | 1251 | 1251 | 1251 | 1251 | 1251 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 15 |
| Entalpía mísica (MJ/kg) | -7,34 | -7,34 | -14,55 | -14,75 | -13,56 | -13,49 | -12,10 | -13,10 | -14,29 | -0,20 | -14,57 | -14,57 | -7,34 | -2,91 | -15,44 | -15,44 | -15,67 |
| Flujo de entalpía (MW) | -1,27 | -1,27 | -23,25 | -23,56 | -21,67 | -21,54 | -19,33 | -20,92 | -22,83 | -0,004 | -23,00 | -23,00 | -0,99 | -0,05 | -22,08 | -0,02 | -22,01 |

Figura 1.1.38. Diagrama de flujo de proceso para de producción de biocrudo a partir de licuefacción hidrotérmica.