

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Análisis tecno-económico y ambiental de la producción de bio-jet fuel a partir de biomasa residual lignocelulósica.

Jorge Antonio Gutierrez Aguirre

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de INGENIERO QUÍMICO

Quito, 10 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Análisis tecno-económico y ambiental de la producción de bio-
jet fuel a partir de biomasa residual lignocelulósica.**

Jorge Antonio Gutierrez Aguirre

Nombre del profesor, Título académico

Fernando Nicolás Vela, Ph. D

Quito, 10 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Jorge Antonio Gutierrez Aguirre

Código: 00215175

Cédula de identidad: 1721061560

Lugar y fecha: Quito, 10 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En la actualidad, la industria de la aviación es responsable del 2.5% del total de las emisiones de CO₂ a nivel mundial, lo que equivale a más de un billón de toneladas métricas por año. Debido a las limitaciones asociadas con el uso de alternativas eléctricas en las aeronaves, este estudio se centró en la producción de combustibles sostenibles para aviación (SAF). Los SAF representan una alternativa viable debido a que poseen propiedades físico-químicas y termodinámicas similares a las del Jet A1 convencional. Además, estos combustibles provienen de residuos lignocelulósicos y carecen de compuestos sulfurados y aromáticos, lo que evita la emisión de estos contaminantes a la atmósfera durante la combustión. Por tal motivo, este estudio escogió la ruta de conversión Alcohol-to-Jet (ATJ) para la simulación de una biorrefinería de SAF en el Ecuador; evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental. La biomasa lignocelulósica se seleccionó en base a tasas de producción de cultivos, generación de residuos y su composición fisicoquímica. Para el modelo de simulación se empleó el software Aspen Plus® con una alimentación de 77 t/h. En base a los resultados se realizó un análisis tecno-económico y de ciclo de vida en base a factores de emisión. La producción final del Biojet Fuel superó las 7.5 t/h y alcanzó una densidad a 15°C de 0.735 g/cm³. En cuanto a la arista económica se consideró la venta de los co-productos como la lignina y el diésel verde, mientras que para la sostenibilidad del proceso se realizó un análisis de emisiones y se comparó con la producción convencional del Jet A1. La producción de biocombustibles representa una oportunidad única para abordar desafíos como las emisiones de GHG, la seguridad e independencia energética y el desarrollo económico rural, y este estudio abre las puertas hacia la optimización de procesos de biorrefinación de biomasa en el Ecuador.

Palabras clave: Alcohol-to-Jet, Biojet fuel, biorrefinería, residuos lignocelulósicos, análisis tecno-económico.

ABSTRACT

Currently, the aviation industry is responsible for 2.5% of total global CO₂ emissions, amounting to more than one trillion metric tons per year. Due to the limitations associated with using electric alternatives in aircraft, this study focused on the production of Sustainable Aviation Fuels (SAF). SAFs represent a viable alternative since they have similar physicochemical and thermodynamic properties to conventional Jet A1 fuel. Furthermore, these fuels are derived from lignocellulosic residues and do not contain sulfur or aromatic compounds, thereby preventing their emission into the atmosphere during combustion. For this reason, this study selected the Alcohol-to-Jet (ATJ) conversion route to simulate an SAF biorefinery in Ecuador and to assess its technical, economic, and environmental viability. The lignocellulosic biomass was chosen based on crop production rates, residue generation, and its physicochemical composition. Aspen Plus® software was used to model the process, with a feed rate of 77 t/h. Based on the results, a techno-economic analysis and a life cycle assessment using emission factors were conducted. The final production of Biojet Fuel exceeded 7.5 t/h and achieved a density at 15°C of 0.735 g/cm³. From an economic standpoint, the sale of co-products, including reconditioned lignin and green diesel, was considered, while for process sustainability an emissions analysis was performed and compared with conventional Jet A1 production (94 kgCO₂eq/MJ). The production of biofuels represents a unique opportunity to address challenges such as GHG emissions, energy security and independence, and rural economic development. This study opens the door to optimizing biomass biorefining processes in Ecuador.

Key words: Alcohol-to-Jet, Biojet fuel, biorefinery, lignocellulosic residues, techno-economic analysis.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. ANTECEDENTES	12
<i>1.1.1. Sector de la aviación</i>	<i>12</i>
<i>1.1.2. Jet Fuel</i>	<i>12</i>
<i>1.1.3. Biocombustibles de aviación</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4. Sector agrícola en Ecuador</i>	<i>14</i>
<i>1.1.5. Métodos para la producción de Bio-jet Fuel</i>	<i>14</i>
1.2. JUSTIFICACIÓN	16
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. GENERAL	17
1.3.2. ESPECÍFICOS	17
2. BASES DE DISEÑO	18
2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS	18
<i>2.1.1. Bio-jet Fuel</i>	<i>18</i>
2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	18
<i>2.2.1. Definición del residuo lignocelulósico</i>	<i>18</i>
2.3. UBICACIÓN DE LA PLANTA	21
2.4. LIMITACIONES	21
<i>2.4.1. Limitaciones de estándares de calidad</i>	<i>21</i>
<i>2.4.2. Limitaciones de materia prima</i>	<i>22</i>
<i>2.4.3. Limitaciones del proceso</i>	<i>22</i>

3. DISEÑO DEL PROCESO	23
3.1. DISEÑO DE LA RUTA DE CONVERSIÓN ALCOHOL-TO-JET (ATJ).....	23
3.1.1. Diagrama de bloques	23
3.1.2. Pretratamiento	24
3.1.3. Fermentación.....	25
3.1.4. Purificación del etanol	26
3.1.5. Deshidratación.....	26
3.1.6. Oligomerización.....	27
3.1.7. Electrólisis de la mezcla etanol-agua.....	28
3.1.8. Hidrogenación	28
4. DISEÑO DE LA PLANTA	29
4.1. CAUDAL DE PRODUCCIÓN	29
4.2. BALANCES DE MASA	29
4.3. BALANCE DE ENERGÍA	31
5. ANÁLISIS ECONÓMICO	33
5.1. ESTIMACIÓN DE COSTOS	33
5.1.1. Inversión de capital fijo.....	33
5.1.2. Costos de producción.....	34
5.2. ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE CAJA E INGRESOS.....	35
6. ANÁLISIS DE EMISIONES DE GHG	36
7. ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD	39
8. CONCLUSIONES	42

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXO A: REACCIONES DE OLIGOMERIZACIÓN E HIDROGENACIÓN.....	53
ANEXO B: DESGLOSE ANÁLISIS ECONÓMICO	55

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1. Producción de cultivos y generación de residuos agrícolas en Ecuador (Ipiales & Cuichán, 2024).</u>	19
<u>Tabla 2. Composición de residuos lignocelulósicos (Tayyab et al., 2017)</u>	20
<u>Tabla 3. Resumen del balance de masa de la biorrefinería.</u>	31
<u>Tabla 4. Estimación de la inversión de capital fijo.</u>	34
<u>Tabla 5. Estimación de los costos de producción.</u>	35
<u>Tabla 6. Ingresos generados en un año laboral.</u>	35
<u>Tabla 7. Huella de carbono de la biorrefinería por etapa.</u>	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <u>Diagrama de bloques de la biorrefinería</u>	24
Figura 2. <u>Modelo computacional de la biorrefinería</u>	30
Figura 3. <u>Modelo computacional de la recuperación de hidrógeno in situ</u>	30
Figura 4. <u>Resumen del consumo energético por etapas</u>	32
Figura 5. <u>Costos fijos de equipos por etapa del proceso</u>	34
Figura 6. <u>Variación del precio de venta mínimo del Biojet Fuel en función del precio de venta y refinación de los coproductos</u>	39
Figura 7. <u>Variación del precio de venta mínimo del Biojet Fuel en función de la capacidad de procesamiento de la planta</u>	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Sector de la aviación

La industria de la aviación juega un papel fundamental en el transporte mundial, facilitando el comercio internacional y el turismo. En los últimos diez años, la demanda de vuelos comerciales ha aumentado de manera significativa a un ritmo de 4.2% anual impulsado por la globalización y el éxito de las aerolíneas “low cost” (Boeing Co., 2024). El crecimiento de esta industria ha tenido un efecto proporcional en el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG), representando un 2.5% del total de las emisiones liberadas a la atmósfera por el sector del transporte, lo que equivale a más de un billón de toneladas métricas (Zhao et al., 2024) (Andrew & Peters, 2023). Se prevé que estas cifras aumenten exponencialmente, dado que los vuelos comerciales ya han superado los niveles de prepandemia. En este sentido, se estima que, para 2050, el tráfico aéreo se habrá duplicado.(Airbus, 2023).

1.1.2. Jet Fuel

El combustible para aviones, también conocido como Jet-A (principalmente usado en la industria aérea militar) o Jet A-1 (para uso comercial), está elaborado a base de queroseno que se obtiene mediante la refinación de crudo de petróleo. Se diferencia del combustible regular por su estabilidad, resistencia a la autoignición y gelificación a bajas temperaturas y presiones a las que está expuesto durante un vuelo (Poursadegh et al., 2023). Sin embargo, al ser un derivado de petróleo, su combustión genera emisiones de carbono, óxidos de nitrógeno (NO_x) y materiales particulados, que contribuyen a la acumulación de GHG y por

ende al cambio climático (Nguyen et al., 2023). En este sentido, la industria de la aviación representa un desafío en materia de descarbonización, debido a los altos requerimientos energéticos para completar los vuelos y propiedades físico-químicas y termodinámicas que deben cumplir los combustibles alternativos para su uso comercial (Gonzalez-Garay et al., 2022). La densidad energética requerida por el sector de la aviación, para impulsar vuelos de corto y largo alcance, es la principal barrera que tiene este sector, a diferencia de otros tipos de transporte como el terrestre donde la transición a la electrificación se evidencia cada vez mas (Crownhart, 2022). Como resultado, existe la necesidad imperativa de desarrollar alternativas sostenibles, con una alta densidad energética, que no comprometan la seguridad ni el rendimiento de este sector.

1.1.3. Biocombustibles de aviación

La alternativa más prometedora y sostenible actualmente es el biojet fuel, obtenido a partir de fuentes renovables como la biomasa de residuos agrícolas o el hidro-procesamiento de lípidos. Este biocombustible puede disminuir las emisiones de GHG durante su ciclo de vida hasta en un 80% en comparación con el combustible derivado de petróleo (Emmanouilidou et al., 2023). Esta disminución en las emisiones se evidencia durante su procesamiento además de, la fijación de carbono producido durante la combustión por parte de los cultivos lignocelulósicos, resultando en una huella neta de carbono considerablemente menor (Gonzalez-Garay et al., 2022). Adicionalmente, la combustión de bio-jet fuel resulta en una disminución de hasta el 50% en las emisiones de material particulado y óxidos de azufre (SO_x) en comparación con el combustible tradicional (Riley et al., 2021), teniendo un impacto positivo en la calidad del aire de zonas urbanas y aledañas a aeropuertos.

1.1.4. Sector agrícola en Ecuador

Por otra parte, el sector agrícola en el país es uno de los ejes determinantes de la economía nacional. Según datos del Banco Central, este sector representa un 8% del producto interno bruto (PIB) con un crecimiento anual reportado de más del 1.5% (Banco Central del Ecuador, 2023). En el año 2023, se cosecharon aproximadamente 20 millones de toneladas métricas (Mt) de cultivos, entre los que más destacan están: el banano (7.2 Mt), la caña de azúcar (6.3 Mt), palma africana (2 Mt), arroz (1.6 Mt), maíz duro seco (1.4 Mt), entre otros (Ipiates & Cuichán, 2024). En el país casi 6 millones de hectáreas son ocupadas para estas actividades, representando alrededor del 24% del territorio nacional (Banco Central del Ecuador, 2023). En cuanto a emisiones, el sector agrícola es responsable de casi 21% del total de GHG que produce el país, esto por la degradación de la materia orgánica y los sistemas industriales para procesar las cosechas (Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero, 2022).

1.1.5. Métodos para la producción de Bio-jet Fuel

1.1.5.1. Rutas termoquímicas tradicionales

Debido a la necesidad creciente de combustibles renovables en todo el espectro de las industrias de transporte, se han realizado importantes avances en el desarrollo de métodos de conversión a partir de biomasa residual. Dentro de los métodos termoquímicos tradicionales se incluyen la gasificación de la biomasa en gas de síntesis (CO y H_2), seguida de una síntesis de Fischer-Tropsch (FT) en donde se polimerizan los hidrocarburos ligeros para obtener los combustibles deseados (Arias et al., 2023). Sin embargo, los altos requerimientos energéticos asociados a las temperaturas de operación de los reactores de gasificación (entre 800 a 1000°C), y la baja conversión de la síntesis FT (25%), hacen que el combustible producido

tenga un precio de venta considerablemente superior al derivado de petróleo (Yang et al., 2020). Por otro lado, la descomposición térmica controlada de la biomasa en ambientes anaerobios o pirólisis es otra vía de conversión para obtener diversos tipos de hidrocarburos a partir de bio-oil (Tawalbeh et al., 2021). Si bien esta ruta es relativamente simple y escalable, rectificar el combustible producido para cumplir con las especificaciones requiere de procesos catalíticos extensos con altos costos energéticos y monetarios.

1.1.5.2. Rutas termoquímicas modernas

En los últimos años, la pirólisis rápida ha ido cobrando relevancia por su alta eficiencia en procesos de conversión térmica, con un 75% en peso de producción de bio-oil (Douvartzides et al., 2022). La conversión de biomasa leñosa en Bio-jet Fuel ha sido estudiada mediante el método de rectificación de bio-oil in situ con vapor, para después someterse a un hidro procesamiento, en donde se obtiene el combustible deseado y adicionalmente gasolina como producto secundario. Con este método se reportó un Bio-jet Fuel que es competitivo en términos de costos con respecto al convencional, con una disminución del 95% en la emisión de GHG en su ciclo de vida, siendo de los resultados más alentadores en materia de conversiones termoquímicas (Fitriasari et al., 2023).

1.1.5.3. Rutas bioquímicas

No obstante, además de las rutas termoquímicas, las vías de conversión bioquímica han surgido como una alternativa prometedora en el panorama de los biocombustibles. La ruta Alcohol-to-Jet (ATJ), implica la fermentación de la biomasa lignocelulósica para la producción de etanol, que después de una deshidratación, oligomerización e hidrogenación, va a ser reformado en Bio-jet Fuel (Goh et al., 2022). Estudios recientes sobre esta ruta han demostrado que se puede obtener un combustible con un precio competitivo en el mercado y

con un mejor rendimiento que otros generados a partir de un hidro-procesamiento termoquímico (Vela-García et al., 2021). Otros múltiples estudios de intensificación muestran que la sacarificación integrada disminuye los costos operativos y aumenta los rendimientos de producción de etanol. Al igual que el desarrollo de una columna de destilación reactiva que conecta la oligomerización, hidrogenación y separación en una sola operación, disminuyendo en casi 25% los requerimientos energéticos de estos procesos (Romero-Izquierdo et al., 2021) (Huerta-Rosas et al., 2024).

1.2. Justificación

Ecuador genera anualmente más de 10 millones de toneladas de biomasa residual (Loor et al., 2017). Se estima que, en Latinoamérica, solo 15% de los residuos agrícolas son utilizados por los productores para alimento de ganado, 4.5% es reincorporado al suelo sin una descomposición previa y solo el 0.5% es reutilizado como materia prima para su revalorización en productos de consumo. Por otro lado, el 80% de los remanentes, generalmente ricos en lignina, son quemados o aglomerados para su descomposición (Riera et al., 2019). Si bien este alto porcentaje de biomasa podría ser quemado para la producción de energía calorífica, los gases producidos a partir de esta quema liberan una basta cantidad de gases tóxicos como óxidos de nitrógeno (NO_x), sulfatos y amonio. Adicionalmente a estos compuestos, también material particulado es liberado y transportado por el aire a las comunidades urbanas aledañas (Yadav & Devi, 2019). Estas emisiones, además de ser perjudiciales para el medio ambiente, son sumamente lesivos para el aparato respiratorio animal y humano, causando enfermedades cardiovasculares y respiratorias crónicas (Jiang et al., 2024). La fracción final que es aglomerada y descompuesta, generalmente en rellenos sanitarios, tampoco se queda atrás en la emisión de gases de efecto invernadero, pues es

conocido que la concentración de gases como CO₂, CH₄ y N₂O son considerablemente mayores en zonas donde se da la aglomeración de biomasa residual (Geronimo et al., 2022).

Dada la alta cantidad de desechos agrícolas, ricos en material lignocelulósico, producidos en Ecuador y por sus evidentes impactos medioambientales y sociales negativos, es necesaria la definición de una ruta bioquímica rentable para la valorización de estos desechos.

En conclusión, la investigación propuesta tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnico-económica y ambiental de establecer una biorrefinería de Bio-jet fuel en Ecuador. Al evaluar los procesos técnicos, la viabilidad económica y los impactos ambientales, este estudio proporcionará información valiosa que puede guiar futuras inversiones y decisiones políticas relacionadas a combustibles sostenibles. La producción de biocombustibles en Ecuador representa una oportunidad única para abordar desafíos como las emisiones de GHG, la seguridad e independencia energética y el desarrollo económico rural.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar la factibilidad tecno-económica y ambiental de una biorrefinería de biojet fuel a partir de residuos lignocelulósicos de bagazo de caña.

1.3.2. Específicos

- Evaluar la factibilidad técnica de la ruta ATJ de conversión de biomasa a biojet fuel.
- Analizar la viabilidad económica del diseño de una biorrefinería de biojet fuel.
- Realizar un análisis de emisiones del proceso de obtención del combustible.

2. BASES DE DISEÑO

2.1. Descripción de los Productos

En el diseño de esta biorrefinería se propone la producción de Bio-jet Fuel. Este combustible se obtiene después de la transformación del etanol producido a partir de la fermentación de biomasa lignocelulósica mediante el proceso ATJ. El producto final se debe apegar a las características fisicoquímicas del Jet A1 tradicional para poder ser mezclado con este y utilizado en la industria aeronáutica.

2.1.1. Bio-jet Fuel

El Bio-jet Fuel, como se mencionó anteriormente, es el biocombustible aeronáutico con mejores prospectos para cambiar la matriz energética de esta industria. Las cadenas de hidrocarburos desde C9 a C16, se obtienen después de la oligomerización del etileno, que a su vez en un producto de la deshidratación del etanol. El mercado mundial de los combustibles de aviones se encuentra sobre los 230 billones de dólares en el 2023, y se estima que para el 2030, este será de casi 700 billones (Watson et al., 2024).

2.2. Descripción de las materias primas

2.2.1. Definición del residuo lignocelulósico

La materia prima necesaria para obtener el combustible de interés es la biomasa residual lignocelulósica. Para la definición del residuo lignocelulósico a utilizar, se extrajeron datos públicos del Ministerio de Agricultura y boletines técnicos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Se limitó la selección a las plantaciones con producción de residuos lignocelulósicos y se los comparó teniendo en cuenta tres parámetros: tasas de producción de cultivos, generación de residuos y composición bioquímica de los residuos.

Tabla 1. Producción de cultivos y generación de residuos agrícolas en Ecuador (Ipiales & Cuichán, 2024)

Cultivo	Producción en 2023 [t]	Generación de residuos 2023 [t]	Superficie sembrada [ha/año]
Banano	7 200 000	5 256 000	175 181
Arroz	1 600 000	320 000	343 050
Caña de azúcar	6 300 000	1 890 000	79 580
Maíz duro seco	1 400 000	336 000	321 229
Palma africana	2 000 000	500 000	137 678

Como se evidencia en la Tabla 1, los cultivos que mayor cantidad de desechos generan son banano y caña de azúcar, superando las 1.5 millones de toneladas en el año 2023. A pesar de la contracción del sector agrario en comparación al 2022, las plantaciones de banano y bagazo de caña se han mantenido como las menos afectadas por dicha reducción en la producción, lo que las asegura como una constante fuente de biomasa residual. La provincia del Guayas concentra la mayor cantidad de sembríos de caña con un 80% y se mantiene como la segunda en cuanto a banano con una participación del 32% (Ipiales & Cuichán, 2024).

En esa misma línea, se comparó las composiciones bioquímicas de los diferentes residuos lignocelulósicos con el fin de identificar los que tengan un mayor contenido de polisacáridos (celulosa y hemicelulosa). Estos compuestos son claves para la fermentación, pues son los utilizados por los microorganismos para la producción de etanol (Gírio et al., 2010). En la Tabla 2 se muestra una recopilación de las composiciones de dichos desechos.

Tabla 2. Composición de residuos lignocelulósicos (Tayyab et al., 2017)

Cultivo	Tipo de residuo	Lignina [% m/m]	Celulosa [% m/m]	Hemicelulosa [% m/m]
Banano	Pseudotallo	13.9	40.1	29.8
Arroz	Cascarilla	13.5	32.5	32
Caña de azúcar	Bagazo	31	22	45
Maíz duro seco	Bagazo	10	28	25
Palma africana	Cáscara	50	30	12

Según diferentes autores, la composición óptima que la biomasa lignocelulósica debe tener para la producción de bioetanol es de 30-50% celulosa, 20-40% hemicelulosa y 15-30% lignina (Beluhan et al., 2023). Estas composiciones son basadas en que la tasa de producción de etanol es proporcional a la cantidad de polisacáridos que hay en la biomasa por la degradación de estos por parte de los microorganismos (Malik et al., 2022).

El bagazo de caña es la fibra remanente que se obtiene después de la extracción del jugo de su fruta. Gracias al alto contenido de carbono que tiene esta fibra, es usualmente utilizado como fuente de generación de energía en plantas de quemado y compostaje (Wani et al., 2021). En el Ecuador, el bagazo es uno de los pocos residuos agrícolas aprovechados como materia prima para la producción de papel y cartón. Sin embargo, esto no representa más del 20% del total de residuos sobrantes después de la quema (Bravo et al., 2024). Por otro lado, otro de los residuos lignocelulósicos con una composición deseable es el pseudotallo de banano. El mismo que, además de la distribución anteriormente descrita, también tiene una alta cantidad de saponinas y fibra, lo que lo hace un buen candidato para la elaboración de

textiles (Karuppuchamy et al., 2024). A pesar de ello, en el país no existe una entidad o empresa que aproveche estas fibras con fines comerciales. Finalmente, se optó por el bagazo de caña como la materia prima para la biorrefinería frente a las demás opciones de residuo lignocelulósicos, gracias a su composición bioquímica ajustada a las necesidades de producción de etanol y a su bajo contenido de cenizas (Guimarães et al., 2009).

2.3. Ubicación de la planta

La ubicación de la biorrefinería de bagazo de caña fue definida en función de la cercanía y accesibilidad a la materia prima, además de la facilidad de distribución del producto y co-productos obtenidos. La producción de residuos agrarios en el Ecuador está claramente distribuida a lo largo de la región costa, se ha decidido enfocar en la provincia del Guayas debido a que concentra la mayor cantidad de plantaciones de bagazo de caña del país. Con el 80% de la producción nacional de esta plantación, los residuos sin aprovechar podrían satisfacer la demanda diaria de 77 toneladas de biomasa residual de alimentación al establecer una logística de recuperación y traslado del bagazo.

2.4. Limitaciones

Se ha decidido delimitar las limitaciones del proyecto en limitaciones de calidad, materia prima y las intrínsecas del proceso.

2.4.1. Limitaciones de estándares de calidad

Para que un biocombustible pueda ser mezclado con uno convencional, este debe cumplir con estrictos estándares de calidad. Este debe acoplarse a especificaciones internacionales como el ASTM D7566 y el DEF STAN 91-091, que aseguran el correcto rendimiento y compatibilidad del combustible con la mecánica de las turbinas. Estos estándares abarcan

parámetros fisicoquímicos críticos como la densidad energética, viscosidad, densidad, punto de congelación y estabilidad térmica (Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, 2019). Asegurar el cumplimiento de estos estándares es imperativo, puesto que el combustible no puede ser comercializado de no apegarse a ellos.

2.4.2. Limitaciones de materia prima

Una de las mayores problemáticas para poder suplir la biomasa necesaria en la biorrefinería, es la fluctuación en la producción agraria. El principal reto está asociado a la fluctuación en la producción de caña de azúcar dependiente del mercado y las estaciones climáticas del país. Se deberá establecer relaciones directas con los proveedores de biomasa para garantizar que los desechos producidos sean dirigidos hacia el proyecto y no terminen en botaderos de descomposición, compostaje o quemados.

Otra alternativa, frente a cualquier tipo de imprevistos jurídicos o sociales, es la importación de este desecho desde países aledaños como Colombia, que a su vez tienen también un problema con el tratamiento de desechos lignocelulósicos, quemando casi el 85% de su producción anual de bagazo de caña. Además de sus altos porcentajes de emisiones por la quema de este material, no existen iniciativas de proyectos industriales para la revalorización de este material.

2.4.3. Limitaciones del proceso

La ruta de conversión ATJ tiene procesos críticos que ocurren en condiciones extremas de temperatura y presión, siendo la deshidratación e isomerización los más delicados, llegando a 345°C y 40 bar y 280°C y 60 atm, respectivamente. Estas condiciones de operación representan un peligro inminente, que debe ser constantemente monitoreado para evitar cualquier tipo de accidente.

3. DISEÑO DEL PROCESO

3.1. Diseño de la ruta de conversión Alcohol-to-Jet (ATJ)

La ruta de conversión Alcohol-to-Jet (ATJ), fue diseñada y modelada en el software de simulación de procesos de Ingeniería Química Aspen Plus v.11[®] dada su versatilidad en cuanto al uso de compuestos orgánicos y su precisión en transformaciones termoquímicas (Teixeira et al., 2024). El método escogido para los cálculos de las propiedades termodinámicas y los equilibrios líquido-vapor de las especies en la simulación fue el NRTL (non-random two liquids). La biorrefinería fue diseñada teniendo en cuenta la producción ecuatoriana de bagazo de caña, el promedio de biomasa residual producida de dichas cosechas y teniendo en cuenta que un porcentaje es utilizado como compostaje por los agricultores (IpiALES & Cuicachán, 2024). Se definió este caudal en 77 t/h de biomasa procesada mecánicamente, con una operación continua de 350 días al año durante 24h.

3.1.1. Diagrama de bloques

Después de escoger el residuo lignocelulósico, se formuló el diagrama de bloques del proceso teniendo en consideración las respectivas entradas y salidas. La biorrefinería fue dividida en las siguientes etapas: pretratamiento, fermentación, electrólisis, deshidratación, oligomerización, hidrogenación e isomerización.

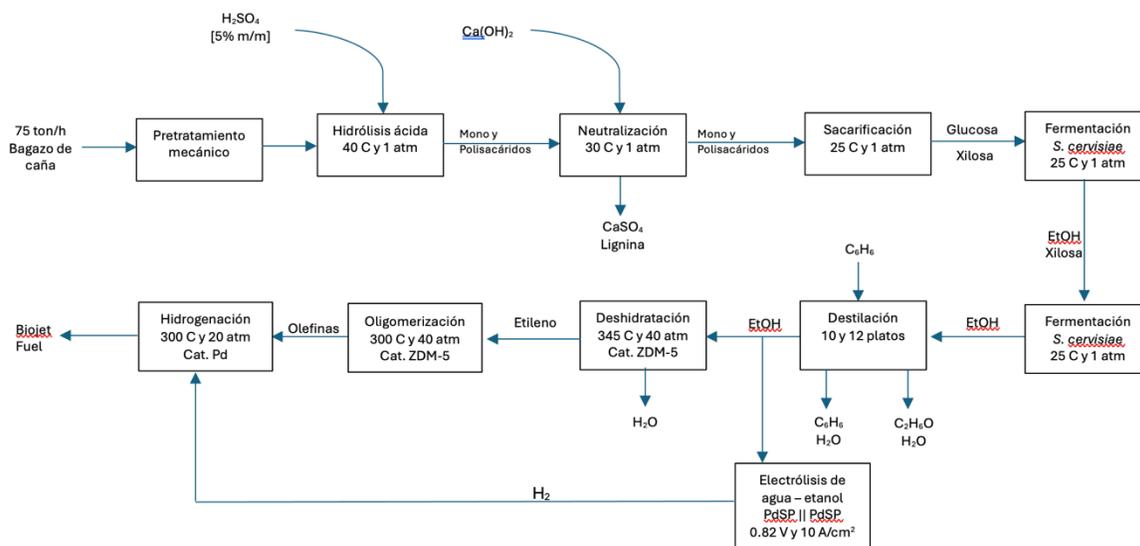


Figura 1. Diagrama de bloques de la biorrefinería

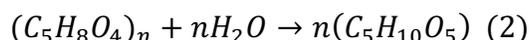
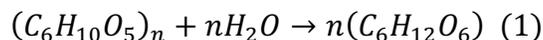
3.1.2. Pretratamiento

Esta primera etapa tiene como propósito la homogenización y disminución del tamaño de partícula de la biomasa (Saad & Gonçalves, 2024). El modelado en Aspen de estas operaciones no consta en este estudio, puesto que la maquinaria necesaria no forma parte de las librerías del software. Se asumió que toda la biomasa entrante ha sido ya pretratada y está lista para los tratamientos termo y bioquímicos.

El tratamiento termoquímico consiste en la separación de los polisacáridos de interés de la lignina. Se utilizan ácidos, bases y en algunos casos solventes orgánicos, que sean capaces de romper los enlaces intermoleculares de la biomasa y extraer los sólidos inertes como la lignina (Tofani et al., 2023). En este caso se realizó una hidrólisis ácida con una solución 5% en masa de H₂SO₄ en un reactor esteoico a una temperatura de 40 °C y 1 atm de presión durante 45 minutos, con una relación másica de agua-biomasa de 2.5 (Xie et al., 2024).

Una vez ajustado el pH después de la hidrólisis ácida mediante hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), se realizó la sacarificación de la celulosa y hemicelulosa mediante los compuestos

enzimáticos Celulasa NS5001 y Hemicelulasa NS22002. Las enzimas no fueron modeladas en la simulación, sin embargo, se consideraron como catalizadores heterogéneos en el reactor esteico a una temperatura de 25°C y 1 atm de presión. Con estas condiciones enzimáticas junto con la hidrólisis ácida se obtiene un rendimiento del 89% en la obtención de azúcares fermentables (Aghaei et al., 2022).

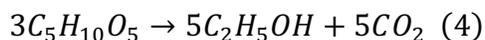
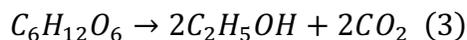


Si bien AspenPlus® es sumamente efectivo en la simulación de compuestos orgánicos y sus transformaciones, no cuenta con las propiedades fisicoquímicas del glucano, xilano, manano y arabiano en sus librerías de datos. Por lo que, las hexosas (C₆) y pentosas (C₅) fueron simuladas como el ácido levoglocusano (C₆H₁₀O₅) y el ácido glutárico (C₅H₈O₄), respectivamente. Esto ya que comparten propiedades fisicoquímicas y termodinámicas similares, además de ser intermediarios en la descomposición de los compuestos originales (Cecilio et al., 2023).

3.1.3. Fermentación

La fermentación consiste en la transformación de los azúcares obtenidos después de la ruptura de los polisacáridos en etanol y dióxido de carbono. *Saccharomyces cerevisiae* es la levadura más utilizada a nivel industrial para llevar a cabo la fermentación de hexosas, sin embargo, no tiene la capacidad de procesar pentosas (Mitchell et al., 2019). La levadura *Pichia stipitis* es capaz de procesar estos azúcares, no obstante, necesita de condiciones especiales como la ausencia de hexosas y bajas concentraciones de etanol (Ruchala et al., 2020). Por ello se decidió implementar un diseño de dos reactores esteicos de fermentación seguidos, a 30°C y 1 bar. En el primero se planteó la transformación de hexosas por medio

de la enzima *S.cerevisae*, con un 98% de conversión, mientras que el segundo reactor se llevó a cabo la fermentación de las pentosas con *P.stipitis* con una conversión total del 81% (Santosh et al., 2017). Las reacciones introducidas en cada uno de los reactores se presentan a continuación:



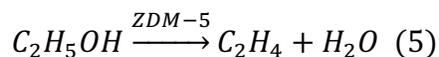
3.1.4. Purificación del etanol

Para la purificación del etanol obtenido después de la fermentación, se preparó una separación mecánica de los sólidos por medio de un decantador para la obtención de una mezcla líquida de etanol-agua. Después, se optó por un proceso de destilación, en el cual se aprovechan las diferencias en la volatilidad de los líquidos en solución para así separarlos (Belessiotis et al., 2016). Para esto se modeló una columna DSTW en una simulación independiente para la definición de sus parámetros de diseño en 59 platos, una tasa de reflujo molar de 1.93 y una fracción molar de destilado sobre entrada de 0.259. A pesar de que la mezcla entre etanol y agua genera un azeótropo a un 93% de etanol, diferentes autores sugieren que esta concentración es suficiente para el proceso ATJ (Frosi et al., 2021), aliviando así costos energéticos e impactos ambientales por la utilización de solventes orgánicos como el benceno.

3.1.5. Deshidratación

El etanol a un 93% es llevado a un proceso de deshidratación catalítica para la conversión de este en etileno a altas temperaturas y con el soporte de un catalizador. Para completar esta reacción, basándonos en el estudio de Frosi *et al* (2021), se utilizó un reactor isotérmico a 345°C y 40 bar, con un catalizador de zeolita ZDM-5 con una densidad de partícula de 0.36

g/cm³ y un diámetro promedio de 55 micrones. El mecanismo de reacción directa para una deshidratación completa se presenta a continuación:



Una vez finalizada la reacción el flujo saliente se enfrió para separar el agua en fase líquida y purificar el etileno obtenido. Ya que existe una gran liberación de energía en este cambio de fase, la función de Aspen Energy Analyzer, planteó la implementación de un intercambiador de calor que aprovecha la temperatura de salida del flujo del reactor para calentar la de su entrada, y disminuir el consumo energético hasta en un 20%. A pesar de ser una función integrada en el software, se analizó que no exista ninguna inconsistencia en cuanto al máximo de transferencia de calor.

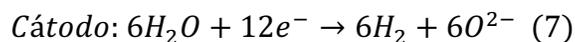
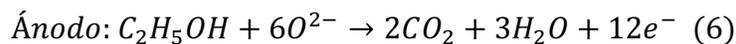
3.1.6. Oligomerización

La oligomerización es el proceso por el cual uno o varios monómeros se unen para formar cadenas de pocas unidades repetidas (Saleh, 2021). Se implementó una oligomerización en dos etapas para favorecer la formación de cadenas más largas de alquenos. Para la primera oligomerización se utilizó un reactor estoico operando a 235°C y 71 bar, en donde se produjeron los oligómeros más livianos hasta el octeno. Posteriormente, se utilizó un reactor RYield con las mismas condiciones para la oligomerización completa hasta el C₂₀ con una distribución de rendimientos del producto en masa basada en el estudio de (Vela-García et al., 2021), la misma que es descrita de manera detallada en la Tabla A1 de la sección Anexos. Una vez obtenida la distribución requerida de alquenos, se implementó una columna de fraccionamiento para la obtención de tres grupos de alquenos (livianos, medios y pesados). Los componentes livianos (C₄-C₈) son reciclados para su aprovechamiento en la primera oligomerización, mientras que los componentes pesados o Green diésel (C₁₇-C₂₀) son

aprovechados como un subproducto. Finalmente, los componentes medios (C₉-C₁₆) son transferidos a la hidrogenación.

3.1.7. Electrólisis de la mezcla etanol-agua

La mezcla de etanol-agua que sale de la segunda torre de destilación es sometida a una electrólisis para la producción de gas hidrógeno (H₂) para ser posteriormente utilizado en la etapa de hidrogenación. Esta etapa se simuló en un reactor estoico a una temperatura de xx°C y xx atm, con un rendimiento del 55% en la ecuación general. Estas condiciones fueron basadas en un proceso sobre celdas de óxido sólido (SOEC) descritas por Liu et al., (2022) teniendo en cuenta las siguientes reacciones de oxidación electroquímica del etanol en el ánodo para asistir la electrólisis del agua en el cátodo:



3.1.8. Hidrogenación

La hidrogenación consiste en la saturación de los alquenos producidos a partir del proceso de oligomerización bajo la presencia de un catalizador, rompiendo los doble enlaces y uniendo cada carbono a un átomo de hidrógeno (Chen et al., 2021). Este proceso se llevó a cabo en un reactor estoico a 185°C y 34 atm, considerando una saturación completa con una relación molar 2:1 entre hidrógeno y molécula de compuesto insaturado (Xie et al., 2024). Las reacciones de saturación están descritas en su totalidad en la Tabla A2 de la sección de Anexos. Finalmente, el biojet fuel obtenido fue isomerizado en su totalidad en un reactor estoico a 280°C y 60 atm para cumplir con los estándares fisicoquímicos del Jet A1.

4. DISEÑO DE LA PLANTA

Todas las tecnologías de procesamiento de la biomasa para su fermentación, reformado y separación de los productos se establecieron en la Sección 3.1 del apartado anterior. Una vez que todas las operaciones unitarias fueron definidas, junto con las correspondientes reacciones químicas, es necesario determinar el funcionamiento de cada una de las operaciones. Esta sección se enfoca en determinar el caudal de producción consecuente a partir de la biomasa residual disponible en la región azucarera del país. Una vez que los balances de materia y energía fueron determinados, se utilizaron las funciones computacionales del software Aspen para el dimensionamiento de los equipos para el posterior análisis económico de la planta.

4.1. Caudal de producción

La principal limitante está dada por la disponibilidad de materia prima en el país, en este caso el bagazo de caña. La producción total de este residuo en el país es de 1.89 millones de toneladas métricas por año, con una focalización del 80% en la provincia del Guayas. Se estableció que se quiere abarcar una revalorización por sobre el 50% de la producción de esta provincia, lo que equivale a 77 toneladas/h. Adicionalmente, para el proceso de hidrólisis e hidrogenación es necesario una relación de 15:1 en masa y 2:1 molar, respectivamente de cada reactivo, por lo que estas cantidades también fueron tomadas en cuenta para los respectivos balances en los equipos.

4.2. Balances de masa

A partir de la cantidad de materia prima determinada anteriormente, se diseñó el modelo computacional en Aspen Plus®, en el cual se consiguió una producción de Biojet-Fuel de

7610.5 kg/h, es decir 9.88% del bagazo previo al pretratamiento mecánico (77000 kg/h). el modelo final se observa a continuación en la Figura 3 y 4.

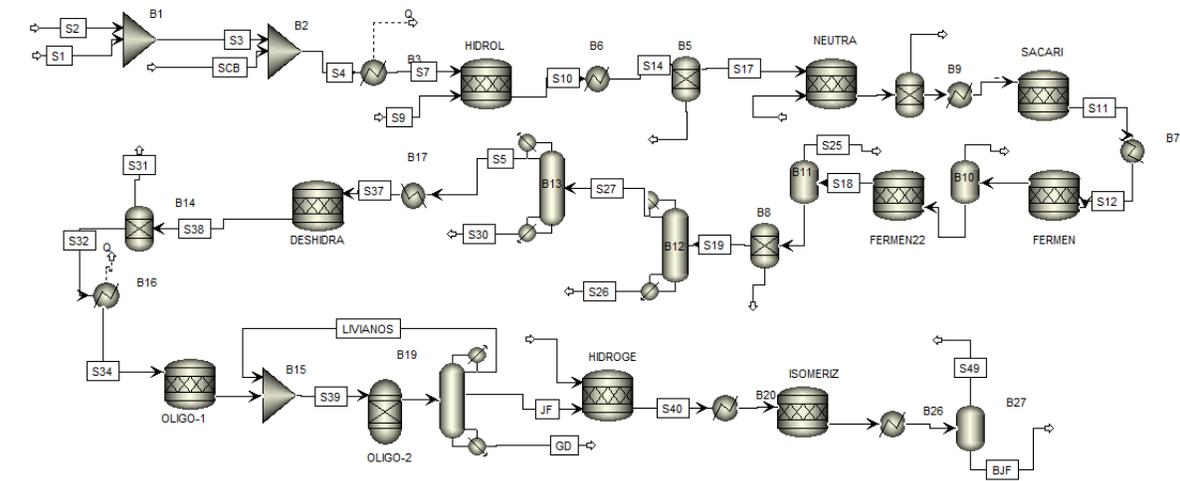


Figura 2. Modelo computacional de la biorrefinería.

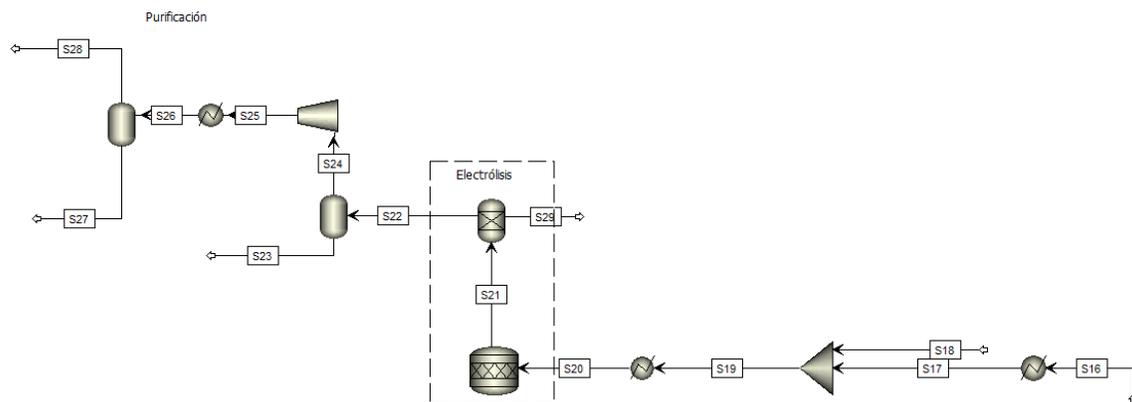


Figura 3. Modelo computacional de la recuperación de hidrógeno *in situ*.

Los métodos termoquímicos tradicionales para la revalorización de biomasa lignocelulósica en Biojet-Fuel, como la pirólisis y la gasificación de Fischer-Tropsch, tienen un porcentaje de conversión total de biomasa menor al 4% y 7%, respectivamente (Rogachuk & Okolie, 2024). Por otro lado, otra ruta bioquímica que utiliza aceites vegetales (HEFA) como materia

prima, puede llegar a una conversión total de biomasa de hasta un 75% (Vela-García et al., 2021).

Las propiedades fisicoquímicas del biocombustible, calculadas por el software en estado líquido, indican una densidad de 748.87 kg/m³ a 15°C. El Jet A1 convencional derivado de petróleo, oscila entre los 730 a 800 kg/m³. Por otro lado, el punto de inflamabilidad ordinario está entre los 30 a 40°C, mientras que el combustible obtenido se encuentra en 35°C. En la Tabla 3 se muestran las cantidades de producto y co-productos obtenidos en un año de producción de 350 días.

Tabla 3. Resumen del balance de masa de la biorrefinería.

	Biomasa	Bio-jet Fuel	Bioetanol	Green diesel	Lignina
kg/h	77000	7610.48	16114.50	1642.59	9243
Ton/año	674520	63928.07	5640.08	574.91	3235.05
Rendimiento	-	9.88%	20.93%	2.13%	12.00%

4.3. Balance de energía

Para el balance de energía global de la biorrefinería se consideró el consumo energético de todos los equipos en las condiciones propuestas en la simulación. En la Figura 5 se puede observar un resumen de la energía necesaria por la planta distribuida por operación. En estas utilidades energéticas ya se consideran los requerimientos de los agitadores y chaquetas para el caso de los reactores, así como los calores que los condensadores y rehervidores de cada columna necesitan. En la misma figura mencionada anteriormente se puede observar como la etapa que mayor consumo energético provienen del proceso de purificación del etanol e

hidrólisis de la biomasa seca. Esta distribución en los requerimientos energéticos no es extraña en biorrefinerías de este tipo, la purificación de etanol mediante una destilación es uno de los principales focos de estudio e intensificación, puesto que llegan a ser responsables de más del 60% de los requerimientos energéticos de plantas como esta (Huerta-Rosas et al., 2024).

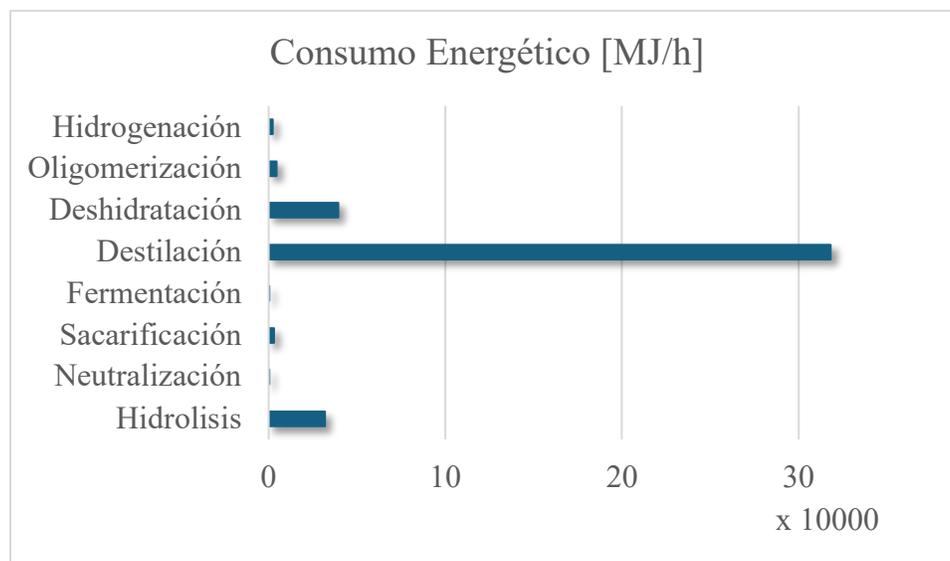


Figura 4. Resumen del consumo energético por etapas.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Mediante un análisis económico del proyecto es posible determinar si la propuesta de la biorrefinería es viable financieramente, y encontrar áreas de optimización para hacer que futuros proyectos tengan una mayor rentabilidad. Para este análisis se realizó una estimación de costos directos e indirectos asociados a la planta, así como una proyección sobre la inversión inicial para comenzar el proyecto. Con estas estimaciones se planteó un posible flujo de caja para encontrar indicadores económicos como el VAN, TIR y el precio de venta mínimo del combustible obtenido. El desglose completo de los cálculos se encuentra adjunto en el Anexo B.

5.1. Estimación de costos

5.1.1. Inversión de capital fijo

La estimación de costos para la inversión de capital fijo consiste en calcular los costos Inside Battery Limits (ISBL), Outside Battery Limits (OSBL), costos de diseño y construcción de equipos y tener en cuenta un capital de contingencia para la puesta en marcha del proyecto. Los ISBL son costos asociados directamente a la compra y puesta en marcha de los equipos, mismos que fueron anteriormente definidos en el diseño de la planta. Esta estimación se realizó, a excepción de los equipos de pretratamiento mecánico, por medio de correlaciones y el índice CEPSI de 2020, lo que requirió de parámetros de diseño de cada uno de los equipos para estimar su costo de adquisición. Adicionalmente, se calculó el OSBL, los costos de construcción y el capital de contingencia en función del primer parámetro. Finalmente, para la inversión total de capital fijo se utilizó el factor de Lang y el método factorial detallado de Miller. A partir de estos cálculos se obtuvo una inversión total de capital fijo de

aproximadamente 24 millones USD. El resumen de estos valores se puede observar a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación de la inversión de capital fijo.

	ISBL	OSBL	Imprevistos	Costo Inversión Fijo
Detallado	\$13,951,890.35	\$ 8,371,134.21	\$1,813,745.75	\$24,136,770.31

Adicionalmente, se muestra a continuación en la Figura 6 la distribución de los costos fijos de los equipos por etapas.



Figura 5. Costos fijos de equipos por etapa del proceso.

5.1.2. Costos de producción

Los costos de producción se dividen en variables y fijos, los primeros son asociados directamente a la capacidad productiva de la planta, por lo que son dependientes de la cantidad de materias primas utilizadas. Por otro lado, los costos fijos son independientes del caudal de producción, y permanecen constantes a lo largo de la vida útil de la planta, como sueldos, mantenimiento, terreno físico, entre otros. A continuación, en la Tabla 5, se puede observar un desglose de los costos de producción.

Tabla 5. Estimación de los costos de producción.

Costos Variables	\$66,657,306.18
Costos Fijos	\$7,362,734.41
Total Costos de Producción	\$74,020,040.58

5.2. Estimación del flujo de caja e ingresos

El ingreso principal del proyecto proviene de la venta de Biojet Fuel, cuyo valor de venta en el mercado de \$0.75 por litro. Se determinó un precio de venta mínimo para el combustible producido de \$0.747 por litro. Adicionalmente, como coproductos del proceso se generan lignina y biodiesel, mismos que también son cotizados en el mercado, por lo que se tomaron como de interés para aumentar los ingresos totales. Sin embargo, la pureza de estos dos compuestos no es comparable a la comercializada en el mercado, por lo que se tomaron precios de venta disminuidos para los fines pertinentes.

Tabla 6. Ingresos generados en un año laboral.

	Precio [USD/kg]	Producción [kg/año]	Ingresos [USD/año]
Biojet Fuel	1	63928072.68	63807927.91
Coproductos	0.23	63752154.04	14662995.43

El cálculo del flujo de caja se realizó con una proyección a 25 años de duración del proyecto, con un sistema de amortización de deuda alemán con un interés anual de 9%. Con un precio de venta mínimo que no considera ningún tipo de incentivo o subsidio gubernamental de \$1 por kilogramo de combustible con una tasa interna de retorno del 9%, el proyecto deja de tener un flujo negativo para el décimo año de operación. Si bien el precio de venta mínimo del combustible es levemente menor al derivado de petróleo, el proyecto no genera ningún porcentaje de ganancias, solo recupera la inversión inicial al cabo de 10 años.

6. ANÁLISIS DE EMISIONES DE GHG

Para cuantificar la huella de carbono, se calcularon los consumos energéticos totales de cada equipo en cada etapa del proceso. Posteriormente, asumiendo que la fuente principal de energía térmica en la planta proviene del gas natural, se aplicaron los factores correspondientes para estimar las emisiones de GHG asociadas a dicho consumo. Estos factores de emisión fueron seleccionados siguiendo las recomendaciones del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) y el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol), quienes proporcionaron valores basados en mediciones representativas de procesos industriales típicos y condiciones operacionales estándar. La ecuación 9, emplea estos factores de emisión y la metodología señalada, asegurando así que el cálculo de las emisiones resultantes se apegue a las mejores prácticas.

$$E = \frac{A \times FE}{BJF \times PCI} \quad (9)$$

Donde A es la actividad del insumo, FE el factor de emisión, BJF el flujo de combustible producido y PCI el poder calorífico inferior del Jet A1 (43.5 MJ/kg). La estimación de emisiones fue determinada con una unidad funcional de 1 MJ, esto ya que la densidad y el volumen son dependientes de la temperatura. Las utilidades energéticas de la planta van a ser suplidas mediante la combustión de gas natural, el factor de emisión fue obtenido del Ministerio de Energía y Minas de Ecuador (2022) y, asumiendo la implementación de un sistema de intercambiadores de calor para aprovechar la energía desprendida por las reacciones exotérmicas, los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Huella de carbono de la biorrefinería por etapa.

Etapa	Porcentaje (%)	Emisión (gCO ₂ -eq/MJ)
Hidrolisis	7.96%	5.39
Neutralización	0.00%	0.00
Sacarificación	0.75%	0.50
Fermentación	0.05%	0.03
Destilación	79.59%	53.90
Deshidratación	9.90%	6.71
Oligomerización	1.15%	0.78
Hidrogenación	0.60%	0.41
Total	100.00%	67.72

Como se observa en la Tabla 7, la huella de carbono del proceso es de 67.72 gCO₂-eq/MJ. Esta cifra se encuentra dentro de rangos reportados previamente en literatura especializada para sistemas de biorrefinería, donde la intensidad energética de ciertas etapas es determinante en el resultado final (Cherubini et al., 2009; IPCC, 2006; Slade et al., 2010). La etapa que mayor contribución tiene a estas emisiones es la destilación con casi 80% de la huella total debido principalmente a su alto requerimiento energético (Zhu et al., 2011). A esta etapa le siguen la hidrólisis y deshidratación con un 7.96% y 9.90% del total de emisiones, respectivamente.

Adicionalmente del consumo de gas natural, la biorrefinería produce una considerable cantidad de dióxido de carbono de origen biogénico, por lo que la implementación de sistemas de captura de este gas se plantea como una recomendación para expandir el alcance de este estudio (Budzianowski, 2017; IPCC, 2005). Por otra parte, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA), estableció en 2024 un estándar de para el uso de combustible Jet A1 para el transporte aéreo de 89 gCO₂-eq/MJ, el cual es mayor al estimado en este estudio. Sin embargo, las reducciones en los GHG no se apegan a las directrices de

la Directiva de Energía Renovables (RED II) de la Unión Europea. Mismo que establece una disminución del 65% en comparación con las emisiones del combustible tradicional derivado de petróleo. A pesar de que la reducción en emisiones de GHG no llega al alcance requerido por la Unión Europea, este valor se puede llegar a disminuir con la implementación de plantas de autogeneración de energía con mejores eficiencias energéticas que el gas natural.

7. ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD

Una vez realizada la estimación económica del proyecto con los parámetros de diseño iniciales, se ejecutó un análisis de flexibilidad con el objetivo de plantear diferentes escenarios que puedan mejorar su viabilidad económica. El primer análisis se centró en los coproductos, específicamente en su refinamiento y purificación previa a su venta. Como se mencionó anteriormente, existe una producción considerable tanto de biodiesel como lignina, sin embargo, estos no son refinados y se tomó un precio de venta considerablemente menor al del mercado para justificar estas falencias en su calidad. Se planteó una intensificación en el proceso de tratamiento de los coproductos para evaluar el impacto que la venta de estos tendría sobre el precio de venta mínimo del combustible principal.

En la Figura 7 se puede observar las fluctuaciones que llega a tener el precio de venta mínimo del Biojet Fuel cuando los coproductos son refinados. A pesar de llegar a un precio de venta competitivo y atractivo, la implementación de sistemas de procesamiento de lignina y biodiesel conllevan un costo considerable tanto de infraestructura como un aumento en la dificultad logística del proyecto.

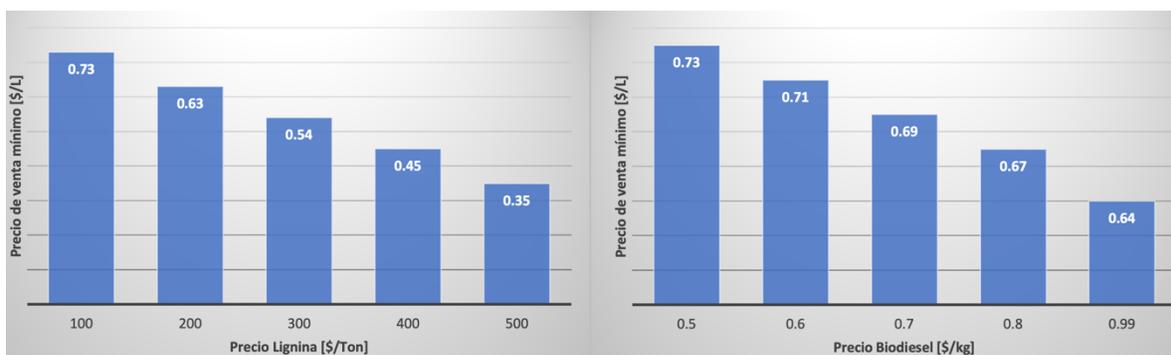


Figura 6. Variación del precio de venta mínimo del Biojet Fuel en función del precio de venta y refinación de los coproductos.

Como se puede observar en la figura, el tratamiento de lignina para su venta como coproducto tiene un impacto significativamente mayor en el precio de venta mínima del producto. Llegando a disminuir este precio en casi la mitad de lo que llega un procesamiento completo del biodiesel si se trata con la misma exhaustividad a este polímero orgánico. Ya que el procesamiento de lignina conlleva una menor dificultad técnica, en comparación con el refinamiento de diésel, esta ruta sería óptima para hacer más atractivo económicamente el proyecto.

Por otro lado, se realizó un análisis del mismo parámetro económico al variar la capacidad de procesamiento de biomasa en la planta. Para esto se estableció un escenario donde el 100% de la biomasa producida en el país es revalorizada en el proyecto. Como se puede observar en la Figura 8, el precio de venta mínimo disminuye a medida que la cantidad de procesamiento aumenta. Sin embargo, esta tendencia no es lineal, puesto que el precio se va estabilizando, y los equipos dejan de tener la capacidad productiva requerida, lo que puede desencadenar aumentos en los costos de mantenimiento y afectar también la vida útil de la planta.

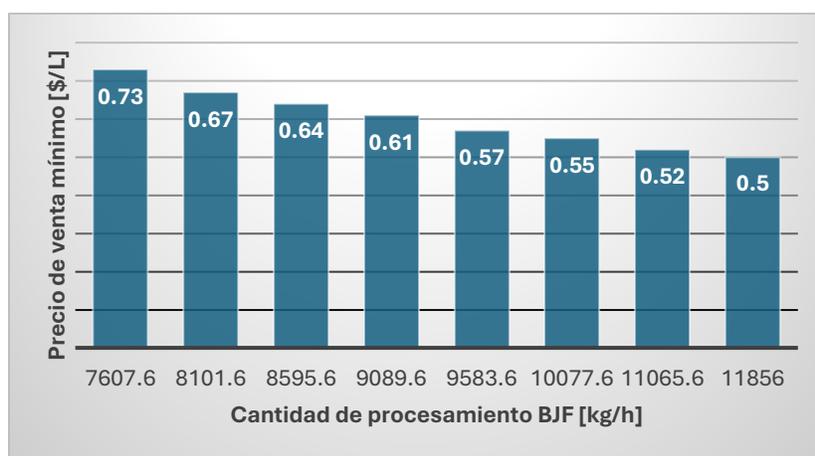


Figura 7. Variación del precio de venta mínimo del Biojet Fuel en función de la capacidad de procesamiento de la planta.

Finalmente, después de analizar posibles escenarios tanto con el tratamiento de los coproductos como con la capacidad de procesamiento de la planta, se determinó que el escenario ideal es donde la lignina es vendida en su máxima pureza. Para lograr este nivel de recuperación del biopolímero es necesaria la implementación de una serie de operaciones descritas por (Servaes et al., 2017). Una vez que el licor con altas concentraciones de lignina es recuperado es necesario extraer el producto con la menor cantidad de contaminantes posibles, el autor recomienda la precipitación ácida como la alternativa más viable económicamente. Una vez que la lignina extraída es lavada es necesario el fraccionamiento de estructuras con pesos moleculares similares, esto es llevado a cabo por medio de una membrana de separación. Finalmente, para llegar a las condiciones requeridas en el mercado es necesario hacer una despolimerización catalítica para la obtención de monómeros u oligómeros con un alto valor agregado.

8. CONCLUSIONES

En este proyecto se pudo realizar un análisis tecno-económico y ambiental de la construcción de una biorrefinería de bagazo de caña para la producción de Biojet Fuel. El proyecto buscaba afrontar la problemática asociada a la gran cantidad de desechos orgánicos agrícolas que existen en el país y no son aprovechados y terminan quemándose o en vertederos. En primer lugar, se seleccionó la fermentación como método de aprovechamiento del residuo lignocelulósico para la producción de etanol. Teniendo en cuenta la presencia de esta molécula intermedia, se decidió la implementación de una ruta de reformación de etanol Alcohol-to-Jet para obtener el Biojet Fuel y biodiesel, siendo el primero el producto de interés. El diseño de la planta se realizó en Aspen Plus®, en la que se obtuvo una conversión del 9.88% de bagazo seco a combustible de avión, superando los porcentajes de conversión de otros métodos termoquímicos tradicionales como la gasificación y la pirólisis.

A partir del dimensionamiento del modelo computacional se realizó un análisis económico detallado con la metodología de los ISBL y OSBL, para una planta de 25 años de vida útil. El precio de venta mínimo en el equilibrio del combustible obtenido fue de \$0.73/L, con una tasa interna de retorno de 9%, con el último año en rojo siendo el noveno, lo que indica la factibilidad económica del proyecto. Adicionalmente, se realizó un análisis de flexibilidad en donde se evaluó la refinación de los coproductos (lignina y biodiesel) para ser vendidos en el mayor precio posible de mercado. Mediante el tratamiento de la lignina se lograría disminuir el precio de venta mínimo a casi la mitad del calculado actualmente, haciendo el proyecto no solo factible sino atractivo económicamente.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghaei, S., Karimi Alavijeh, M., Shafiei, M., & Karimi, K. (2022). A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: Worldwide potential, environmental importance, and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, *161*, 106447. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106447>
- Airbus. (2023). 2024 Global Market Forecast. *Airbus Global Services Forecast (GSF)*.
- Andrew, R. M., & Peters, G. P. (2023). *The Global Carbon Project's fossil CO₂ emissions dataset: 2023 release*.
- Ankathi, S., Lu, Z., Zaimes, G. G., Hawkins, T., Gan, Y., & Wang, M. (2022). Greenhouse gas emissions from the global transportation of crude oil: Current status and mitigation potential. *Journal of Industrial Ecology*, *26*(6), 2045–2056. <https://doi.org/10.1111/jiec.13262>
- Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2023). Biorefineries as a driver for sustainability: Key aspects, actual development and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, *418*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137925>
- Banco Central del Ecuador. (2023). *BOLETÍN DEL ÍNDICE DE ACTIVIDAD ECONÓMICA COYUNTURAL*.
- Belessiotis, V., Kalogirou, S., & Delyannis, E. (2016). Desalination Methods and Technologies—Water and Energy. In *Thermal Solar Desalination* (pp. 1–19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809656-7.00001-5>

- Beluhan, S., Mihajlovski, K., Šantek, B., & Ivančić Šantek, M. (2023). The Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass: Pretreatment Methods, Fermentation, and Downstream Processing. *Energies*, *16*(19), 7003. <https://doi.org/10.3390/en16197003>
- Boeing Co. (2024, July 16). Boeing Forecasts Demand for Nearly 44,000 New Airplanes Through 2043 as Air Travel Surpasses Pre-Pandemic Levels. *PR Newswire*.
- Bravo, S., Espinoza, F., Albuja-Sánchez, J., Anaguano-Marcillo, M., & Morales, J. (2024). SUGARCANE BAGASSE ASH AS A PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT FOR PRODUCING COMPRESSED STABILIZED EARTH BLOCKS. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, *11*(1). [https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(1\).SUS-14](https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(1).SUS-14)
- Budzianowski, W. M. (2017). High-value low-volume bioproducts coupled to bioenergies with potential to enhance business development of sustainable biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 793–804. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.260>
- Cecílio, D. M., Gonçalves, J. R. M., Correia, M. J. N., & Mateus, M. M. (2023). Aspen Plus® Modeling and Simulation of an Industrial Biomass Direct Liquefaction Process. *Fuels*, *4*(2), 221–242. <https://doi.org/10.3390/fuels4020014>
- Chen, X., Shi, C., & Liang, C. (2021). Highly selective catalysts for the hydrogenation of alkynols: A review. *Chinese Journal of Catalysis*, *42*(12), 2105–2121. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(20\)63773-1](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63773-1)
- Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, *53*(8), 434–447. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013>

Crownhart, C. (2022, August 17). This is what's keeping electric planes from taking off.

MIT Technology Review.

Douvartzides, S., Charisiou, N. D., Wang, W., Papadakis, V. G., Polychronopoulou, K., & Goula, M. A. (2022). Catalytic fast pyrolysis of agricultural residues and dedicated energy crops for the production of high energy density transportation biofuels. Part II: Catalytic research. *Renewable Energy*, *189*, 315–338.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.106>

Emmanouilidou, E., Mitkidou, S., Agapiou, A., & Kokkinos, N. C. (2023). Solid waste biomass as a potential feedstock for producing sustainable aviation fuel: A systematic review. *Renewable Energy*, *206*, 897–907.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.113>

Fitriasari, E. I., Won, W., & Jay Liu, J. (2023). Sustainability assessment of biojet fuel produced from pyrolysis oil of woody biomass. *Sustainable Energy & Fuels*, *7*(15), 3625–3636. <https://doi.org/10.1039/D3SE00468F>

Frosi, M., Tripodi, A., Conte, F., Ramis, G., Mahinpey, N., & Rossetti, I. (2021). Ethylene from renewable ethanol: Process optimization and economic feasibility assessment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *104*, 272–285.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.08.026>

Geronimo, C., Vergara, S. E., Chamberlin, C., & Fingerman, K. (2022). Overlooked emissions: Influence of environmental variables on greenhouse gas generation from woody biomass storage. *Fuel*, *319*, 123839. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123839>

Girio, F. M., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L. C., Marques, S., & Bogel-Lukasik, R. (2010). Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. *Bioresource Technology*, *101*(13), 4775–4800. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.088>

- Goh, B. H. H., Chong, C. T., Ong, H. C., Seljak, T., Kutrašnik, T., Józsa, V., Ng, J. H., Tian, B., Karmarkar, S., & Ashokkumar, V. (2022). Recent advancements in catalytic conversion pathways for synthetic jet fuel produced from bioresources. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 251). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114974>
- Gonzalez-Garay, A., Heuberger-Austin, C., Fu, X., Klokkenburg, M., Zhang, D., van der Made, A., & Shah, N. (2022). Unravelling the potential of sustainable aviation fuels to decarbonise the aviation sector. *Energy and Environmental Science*, *15*(8), 3291–3309. <https://doi.org/10.1039/d1ee03437e>
- Guimarães, J. L., Frollini, E., da Silva, C. G., Wypych, F., & Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, *30*(3), 407–415.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.013>
- Huerta-Rosas, B., Sánchez-Ramírez, E., Contreras-Zarazua, G., Quíroz-Ramírez, J. J., Luevano-Rivas, O. A., & Segovia-Hernández, J. G. (2024). Design and optimization of an intensified sustainable plant to produce biojet fuel using the ATJ process. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *200*.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109774>
- IATA. (2024, January 31). Global Air Travel Demand Continued Its Bounce Back in 2023. *IATA Pressroom*. <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-01-31-02/>
- IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*.
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

Ipiales, O., & Cuicachán, M. (2024). *Boletín técnico*.

https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2023/Boletin_tecnico_ESPAC_2023.pdf

Ipiales, O., & Cuichán, M. (2024). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)*.

Jiang, K., Xing, R., Luo, Z., Huang, W., Yi, F., Men, Y., Zhao, N., Chang, Z., Zhao, J., Pan, B., & Shen, G. (2024). Pollutant emissions from biomass burning: A review on emission characteristics, environmental impacts, and research perspectives.

Particuology, 85, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.07.012>

Karuppuchamy, A., K., R., & R., S. (2024). Novel banana core stem fiber from agricultural biomass for lightweight textile applications. *Industrial Crops and Products*, 209, 117985. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117985>

Liu, F., Wang, T., Li, J., Wei, T., Ye, Z., Dong, D., Chen, B., Ling, Y., & Shao, Z. (2022). Elevated-temperature bio-ethanol-assisted water electrolysis for efficient hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 434.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134699>

Loor, M. C., Andrade, F., Lizarzaburu, L., & Masache, M. (2017). *Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/d80ae335-b3c9-41ae-90c6-ae426b167b67/content>

Malik, K., Sharma, P., Yang, Y., Zhang, P., Zhang, L., Xing, X., Yue, J., Song, Z., Nan, L., Yujun, S., El-Dalatony, M. M., Salama, E.-S., & Li, X. (2022). Lignocellulosic biomass for bioethanol: Insight into the advanced pretreatment and fermentation

approaches. *Industrial Crops and Products*, 188, 115569.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115569>

Ministerio de Energía y Minas de Ecuador. (2022). *Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador*.

Mitchell, D. A., Sugai-Guérios, M. H., & Krieger, N. (2019). Solid-State Fermentation. In *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*.

Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13922-8>

Nguyen, D., Kar, T., & Turner, J. W. G. (2023). Performance, Emissions, and Combustion Characteristics of a Hydrogen-Fueled Spark-Ignited Engine at Different Compression Ratios: Experimental and Numerical Investigation. *Energies*, 16(15).

<https://doi.org/10.3390/en16155730>

Poursadegh, F., Brear, M., Hayward, B., & Yang, Y. (2023). Autoignition, knock, detonation and the octane rating of hydrogen. *Fuel*, 332, 126201.

<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.126201>

Riera, M. A., Maldonado, S., & Palma, R. (2019). RESIDUOS AGROINDUSTRIALES GENERADOS EN ECUADOR PARA LA ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICOS. *Revista Ingeniería Industrial*, 17(3), 227–246.

<https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.13>

Riley, K., Cook, R., Carr, E., & Manning, B. (2021). A systematic review of the impact of commercial aircraft activity on air quality near airports. In *City and Environment Interactions* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100066>

Rogachuk, B. E., & Okolie, J. A. (2024). Comparative assessment of pyrolysis and Gasification-Fischer Tropsch for sustainable aviation fuel production from waste tires.

Energy Conversion and Management, 302, 118110.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118110>

Romero-Izquierdo, A. G., Gómez-Castro, F. I., Gutiérrez-Antonio, C., Hernández, S., & Errico, M. (2021). Intensification of the alcohol-to-jet process to produce renewable aviation fuel. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108270>

Ruchala, J., Kurylenko, O. O., Dmytruk, K. V., & Sibirny, A. A. (2020). Construction of advanced producers of first- and second-generation ethanol in *Saccharomyces cerevisiae* and selected species of non-conventional yeasts (*Scheffersomyces stipitis*, *Ogataea polymorpha*). *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 47(1), 109–132. <https://doi.org/10.1007/s10295-019-02242-x>

Saad, M. B. W., & Gonçalves, A. R. (2024). Industrial pretreatment of lignocellulosic biomass: A review of the early and recent efforts to scale-up pretreatment systems and the current challenges. *Biomass and Bioenergy*, 190, 107426. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107426>

Saleh, T. A. (2021). Polymer science and polymerization methods toward hybrid materials. In *Polymer Hybrid Materials and Nanocomposites* (pp. 59–103). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813294-4.00004-2>

Santosh, I., Ashtavinayak, P., Amol, D., & Sanjay, P. (2017). Enhanced bioethanol production from different sugarcane bagasse cultivars using co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Scheffersomyces (Pichia) stipitis*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2861–2868. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.045>

- Servaes, K., Varhimo, A., Dubreuil, M., Bulut, M., Vandezande, P., Siika-aho, M., Sirviö, J., Kruus, K., Porto-Carrero, W., & Bongers, B. (2017). Purification and concentration of lignin from the spent liquor of the alkaline oxidation of woody biomass through membrane separation technology. *Industrial Crops and Products*, *106*, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.005>
- Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero. (2022). *Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero - 2021*.
- Slade, R., Bauen, A., & Gross, R. (2010). *The UK bio-energy resource base to 2050: estimates, assumptions, and uncertainties*.
- Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, Pub. L. No. D7566 – 18a D7566 – 19, Designation: D7566 – 18a D7566 – 19 (2019).
- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Salamah, T., Alkasrawi, M., Martis, R., & El-Rub, Z. A. (2021). A critical review on metal-based catalysts used in the pyrolysis of lignocellulosic biomass materials. *Journal of Environmental Management*, *299*, 113597. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113597>
- Tayyab, M., Noman, A., Islam, W., Arafat, Y., Ali, F., Zaynab, M., Lin, S., Zhang, H., & Khan, D. (2017). Bioethanol production from lignocellulosic biomass by environment-friendly pretreatment methods: A review. *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH*, *16*. https://doi.org/10.15666/aeer/1601_225249
- Teixeira, A. T., da Silva, A. C. M., Cavalcante, R. M., & Young, A. F. (2024). Process simulation and economic evaluation of the Alcohol-to-Jet production of sustainable aviation fuel in the Brazilian context. *Energy Conversion and Management*, *319*, 118947. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118947>

- Tofani, G., Jasiukaitytė-Grojzdek, E., Grilc, M., & Likozar, B. (2023). Organosolv biorefinery: resource-based process optimisation, pilot technology scale-up and economics. In *Green Chemistry* (Vol. 26, Issue 1, pp. 186–201). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3gc03274d>
- Vela-García, N., Bolonio, D., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Almeida Streitwieser, D., & Canoira, L. (2021). Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermoeconomic, life cycle and flight performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114534>
- Wani, S. M., Mir, S. A., Khanday, F. A., & Masoodi, F. A. (2021). Advances in pullulan production from agro-based wastes by *Aureobasidium pullulans* and its applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102846>
- Watson, M. J., Machado, P. G., da Silva, A. V., Salter, Y., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 449). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>
- Xie, S., Li, Z., Luo, S., & Zhang, W. (2024). Bioethanol to jet fuel: Current status, challenges, and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114240>
- Yadav, I. C., & Devi, N. L. (2019). Biomass burning, regional air quality, and climate change. *Encyclopedia of Environmental Health*, 386–391. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11022-X>

- Yang, C., Wang, S., Yang, J., Xu, D., Li, Y., Li, J., & Zhang, Y. (2020). Hydrothermal liquefaction and gasification of biomass and model compounds: a review. *Green Chemistry*, 22(23), 8210–8232. <https://doi.org/10.1039/D0GC02802A>
- Zhao, Y., Zhu, M., Zhou, L., Gao, M., Xu, Z., Zhong, S., Pan, K., & Chen, L. (2024). Evaluating high-resolution aviation emissions using real-time flight data. *Science of The Total Environment*, 951, 175429. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.175429>
- Zhu, L., Jones, B., Anderson, D., Hallen, R., & Albrecht, K. (2011). Techno-economic analysis of alternative aviation fuels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(4).

ANEXO A: Reacciones de oligomerización e hidrogenación

Tabla A1. Distribución másica de compuestos para la oligomerización

Compuesto	Distribución másica (%)
Buteno	0,075
Penteno	0,021
Hexeno	0,014
Hepteno	0,052
Octeno	0,238
Noneno	0,163
Deceno	0,064
Undeceno	0,0715
Dodeceno	0,114
Trideceno	0,058
Tetradeceno	0,0345
Pentadeceno	0,0385
Hexadeceno	0,0265
Heptadeceno	0,0125
Octadeceno	0,0085
Nonadeceno	0,0055
Eicoseno	0,0035

Tabla A2. Reacciones de hidrogenación de los alquenos

Ecuación de la Reacción	Conversión
$C_4H_8 + H_2 \rightarrow C_4H_{10}$	0.99
$C_5H_{10} + H_2 \rightarrow C_5H_{12}$	0.99
$C_6H_{12} + H_2 \rightarrow C_6H_{14}$	0.99
$C_7H_{14} + H_2 \rightarrow C_7H_{16}$	0.99
$C_8H_{16} + H_2 \rightarrow C_8H_{18}$	0.99
$C_9H_{18} + H_2 \rightarrow C_9H_{20}$	0.99
$C_{10}H_{20} + H_2 \rightarrow C_{10}H_{22}$	0.99
$C_{11}H_{22} + H_2 \rightarrow C_{11}H_{24}$	0.99
$C_{12}H_{24} + H_2 \rightarrow C_{12}H_{26}$	0.99
$C_{13}H_{26} + H_2 \rightarrow C_{13}H_{28}$	0.99
$C_{14}H_{28} + H_2 \rightarrow C_{14}H_{30}$	0.99
$C_{15}H_{30} + H_2 \rightarrow C_{15}H_{32}$	0.99
$C_{16}H_{32} + H_2 \rightarrow C_{16}H_{34}$	0.99
$C_{17}H_{34} + H_2 \rightarrow C_{17}H_{36}$	0.99

$C_{18}H_{36} + H_2 \rightarrow C_{18}H_{38}$	0.99
$C_{19}H_{38} + H_2 \rightarrow C_{19}H_{40}$	0.99
$C_{20}H_{40} + H_2 \rightarrow C_{20}H_{42}$	0.99

ANEXO B: Desglose análisis económico

Tabla B1. Costos fijos de equipos.

Equipos	Dimension	Unidad	CAE 1987 (\$)	CAE Hoy (\$)	IT (\$)
Hidrolizador	4759.444391	gal	\$ 92,729.42	\$ 182,995.99	\$ 667,935.37
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Neutra	2082.256921	gal	\$ 63,396.82	\$ 125,109.85	\$ 456,650.93
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Sacari	2022.763869	gal	\$ 62,557.08	\$ 123,452.67	\$ 450,602.25
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Fermen	2022.763869	gal	\$ 62,557.08	\$ 123,452.67	\$ 450,602.25
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Fermen22	2022.763869	gal	\$ 62,557.08	\$ 123,452.67	\$ 450,602.25
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Oligo-1	661.0339409	gal	\$ 37,397.68	\$ 73,802.08	\$ 269,377.61
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Oligo-2	1043.699	gal	\$ 46,140.93	\$ 91,056.37	\$ 332,355.77
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Hidroge	440.6892942	gal	\$ 31,034.35	\$ 61,244.44	\$ 223,542.20
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
Isomeriz	661.0339409	gal	\$ 37,397.68	\$ 73,802.08	\$ 269,377.61
Agitador	30	hp	\$ 10,009.53	\$ 19,753.21	\$ 72,099.22
B7	713.4680595	sq ft	\$ 72,508.17	\$ 143,090.56	\$ 522,280.54
B3	789.7310197	sq ft	\$ 77,377.37	\$ 152,699.62	\$ 557,353.62
B17	4473.107	sq ft	\$ 234,756.29	\$ 463,277.54	\$ 1,690,963.01
B26	508.344	sq ft	\$ 58,367.08	\$ 115,183.96	\$ 420,421.47

B4	67.653	sq ft	\$ 16,055.06	\$ 31,683.69	\$ 115,645.48
B20	360.936	sq ft	\$ 46,879.45	\$ 92,513.80	\$ 337,675.38
B6	3630.908	sq ft	\$ 205,417.30	\$ 405,378.79	\$ 1,479,632.58
B16	254.447	sq ft	\$ 37,480.88	\$ 73,966.28	\$ 269,976.91
B8	2276.895	gal	\$ 66,057.09	\$ 130,359.73	\$ 475,813.02
B14	634.593	gal	\$ 36,701.97	\$ 72,429.15	\$ 264,366.40
B5	3701.790	gal	\$ 82,605.91	\$ 163,017.84	\$ 595,015.10
B11	2843.915	gal	\$ 73,171.73	\$ 144,400.05	\$ 527,060.18
B10	2843.915	gal	\$ 73,171.73	\$ 144,400.05	\$ 527,060.18
B27	1128.165	gal	\$ 47,822.58	\$ 94,375.02	\$ 344,468.81
B9	1175.171	gal	\$ 48,729.08	\$ 96,163.94	\$ 350,998.40
B12	122.944	gal	\$ 17,250.74	\$ 34,043.31	\$ 124,258.09
Trays (16)	10.000	ft	\$ 89,280.00	\$ 176,188.76	\$ 643,088.97
B13	2129.998	gal	\$ 64,061.36	\$ 126,421.27	\$ 461,437.64
Trays (59)	5.000	ft	\$ 43,660.00	\$ 86,160.41	\$ 314,485.49
Reboiler	1611.553	sq ft	\$ 122,141.66	\$ 241,039.29	\$ 879,793.39
Condensador	3597.837	sq ft	\$ 204,217.92	\$ 403,011.89	\$ 1,470,993.39
Bomba	305.628	gal/min	\$ 10,722.76	\$ 21,160.73	\$ 77,236.66
B19	2996.856	gal	\$ 74,956.28	\$ 147,921.74	\$ 539,914.36
Trays (10)	3.000	ft	\$ 2,340.00	\$ 4,617.85	\$ 16,855.15
Reboiler	876.850	sq ft	\$ 82,736.93	\$ 163,276.40	\$ 595,958.87
Condensador	647.060	sq ft	\$ 68,113.27	\$ 134,417.47	\$ 490,623.77
Bomba	127.624	gal/min	\$ 7,561.41	\$ 14,921.99	\$ 54,465.25
Moledora	77.000	tons/hr	\$ 338,715.01	\$ 190,000.00	\$ 693,500.00
Cortadora	77.000	tons/hr	\$ 252,528.40	\$ 190,000.00	\$ 693,500.00

Secadora	77.000	tons/hr		\$ 190,000.00	\$ 693,500.00
Total			\$ 3,141,241.31	\$ 5,602,268.85	\$ 20,448,281.31

Tabla B2. Flujo de caja con coproductos.

Años	0	10	20	25
Produccion anual (kg/año)		\$ 63,928,072.68	\$ 63,928,072.68	\$ 63,928,072.68
Ingresos por co-productos (\$/año)		\$ 14,662,995.43	\$ 14,662,995.43	\$ 14,662,995.43
Precio de venta minimo		\$ 1.00	\$ 1.00	\$ 1.00
Ingresos anuales producto (\$/año)		\$ 63,807,927.91	\$ 63,807,927.91	\$ 63,807,927.91
Ingresos totales (\$/año)		\$ 78,470,923.34	\$ 78,470,923.34	\$ 78,470,923.34
Costes variables (\$/año)		\$-66,657,306.18	\$-66,657,306.18	\$-66,657,306.18
Costes fijos (\$/año)		\$ -7,362,734.41	\$ -7,362,734.41	\$ -7,362,734.41
Gastos de amortización y provisiones 25 años		\$ -1,995,752.26	\$ -1,259,614.13	\$ -891,545.07
BAIT		\$ 2,455,130.50	\$ 3,191,268.63	\$ 3,559,337.69
Impuestos (IVA 15%)		\$ -368,269.58	\$ -478,690.29	\$ -533,900.65
BDI		\$ 2,086,860.93	\$ 2,712,578.34	\$ 3,025,437.04
Amortización en positivo		\$ 1,995,752.26	\$ 1,259,614.13	\$ 891,545.07
Flujos de caja	\$-20,448,281.31	\$ 2,086,860.93	\$ 2,712,578.34	\$ 3,025,437.04