

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Diseño de una planta de escalamiento modular para el
procesamiento de biomasa lignocelulósica en la Universidad San
Francisco de Quito**

**Martín Adrián Guanín Meneses - Jair Esteban Torres
Alba
Ingeniería Química**

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

Quito, día 01 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Diseño de una planta de escalamiento modular para el
procesamiento de biomasa lignocelulósica**

**Martín Adrián Guanín Meneses –
Jair Esteban Torres Alba**

José Álvarez Barreto, PhD. Ingeniería Química, Biológica y de Materiales

Quito, día 1 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: Martín Adrián Guanín Meneses

Código: 00322138

Cédula de identidad: 1720964996

Lugar y fecha: Quito, día 1 de diciembre de 2024

Nombres y apellidos: Jair Esteban Torres Alba

Código: 00322540

Cédula de identidad: 1500843741

Lugar y fecha: Quito, día 1 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UNPUBLISHED DOCUMENT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 USFQ, como un centro importante de investigación e innovación, se generan regularmente productos y/o procesos con un alto potencial de aplicación industrial. Particularmente, en diferentes áreas de la universidad existe interés en la valorización de biomasa residual, destacando la importancia de procesos sostenibles. Sin embargo, este potencial no puede ser demostrado sin pasar por un proceso de pilotaje. El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un laboratorio modular para el procesamiento de biomasa a nivel piloto en la Universidad San Francisco de Quito (USFQ). A través de una matriz de decisión y levantamiento de información de diferentes líneas de investigación, se definió un enfoque modular que proporciona flexibilidad para evaluar diferentes tecnologías de conversión de biomasa, como la pirólisis, la síntesis de biopolímeros y la transesterificación, con el fin de maximizar la eficiencia, sostenibilidad y gestión de recursos. Se ha establecido diagramas de bloque de los diferentes procesos, y un layout de la planta, acompañados de la definición de caudales de producción de los diferentes productos. Se diseñó los equipos que se implementarían y se simuló los procesos de producción de biochar y biodiésel. Por último, un análisis económico que determinó la viabilidad financiera del proyecto, al considerar varios escenarios: costo de renta por hora, horas de renta al año, y posibles financiamientos. El laboratorio también servirá como plataforma educativa, permitiendo a los estudiantes adquirir experiencia práctica en el desarrollo y evaluación de tecnologías limpias y sostenibles. La implementación de un laboratorio con estas características potenciaría el ecosistema de innovación de la universidad, y, a futuro, podría servir como una plataforma de autogestión a través de servicios externos de escalamiento.

Palabras clave: Biomasa Lignocelulósica, Planta, Escalamiento, Modular, Celulosa, Biopolímeros, Biochar, Hidrochar, Biodiésel.

ABSTRACT

At USFQ, as an important research and innovation center, products and/or processes with a high potential for industrial application are regularly generated. Particularly, in different areas of the university there is interest in the valorization of residual biomass, highlighting the importance of sustainable processes. However, this potential cannot be demonstrated without going through a pilot process. The present work aims to design a modular laboratory for biomass processing at a pilot level at the Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Through a decision matrix and information gathering from different lines of research, a modular approach was defined that provides flexibility to evaluate different biomass conversion technologies, such as pyrolysis, biopolymer synthesis and transesterification, in order to maximize efficiency, sustainability and resource management. Block diagrams of the different processes have been established, as well as a layout of the plant, accompanied by the definition of production flows for the different products. The equipment to be implemented was designed and the biochar and biodiesel production processes were simulated. Finally, an economic analysis determined the financial viability of the project, considering several scenarios: rental cost per hour, rental hours per year, and possible financing. The laboratory will also serve as an educational platform, allowing students to gain practical experience in the development and evaluation of clean and sustainable technologies. The implementation of a laboratory with these characteristics would strengthen the university's innovation ecosystem, and, in the future, could serve as a self-management platform through external scaling services.

Key words: Lignocellulosic Biomass, Plant, Scaling, Modular, Cellulose, Biopolymers, Biochar, Hydrochar, Biodiesel.

TABLA DE CONTENIDO

1. Bases de Diseño.....	11
1.2 Descripción del producto	13
1.2.1 Biodiesel	13
1.2.2 Celulosa y Biopolímeros	15
1.2.3 Biochar	17
1.2.4 Hidrochar	18
1.3 Descripción de materias primas	19
1.4 Selección de proceso	19
1.5 Justificación del proyecto	19
1.6 Impacto esperado de la implementación del proyecto	21
1.7 Limitaciones	22
1.8 Terminología especializada	23
1.9 Ubicación	25
2. Objetivos y metodología del Proyecto.....	26
2.1 Objetivo general	25
2.2 Objetivos específicos	25
2.3 Actividades y metodología	26
3. Diseño del proceso	29
3.1 Balance de materia y energía	27
3.1.1 Balance de materia del biodiesel	28
3.1.2 Balance de materia de biopolímeros	28
3.1.3 Balance de materia del biochar	28
3.1.4 Balance de materia del hidrochar	29
3.2 Balance de energía	29
3.3 Condiciones de operación	30
4. Diseño de la planta.....	33
4.1 Selección y dimensionamiento de equipos	31
4.1.1 Selección de equipos	31
4.1.2 Dimensionamiento de equipos	31
4.1.2.1 Dimensionamiento de equipos de biodiesel	31
4.1.2.2 Dimensionamiento de equipos de biochar	33
4.1.2.3 Dimensionamiento de equipos para hidrochar y biopolímeros	34
4.2 Layout de la planta	34
4.3 Seguridad y ambiente	36
4.3.1 Seguridad	36
4.3.1.1 Seguridad en la producción de biodiesel	36
4.3.1.2 Seguridad en la producción de hidrochar	37
4.3.2 Ambiente	37
5. Evaluación económica	41
5.1 Estimación de costos	38
5.2 Evaluación económica del proyecto	39
5.3 Análisis de flexibilidad	42
6. Conclusiones.....	45

7. Referencias Bibliográficas.....	46
8. Anexos	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Energía necesaria para cada proceso	28
Tabla 2. Dimensiones de los equipos de la planta piloto modular	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primera etapa de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal	13
Figura 2. Segunda etapa de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal	13
Figura 3. Primera parte de la producción de biodiésel a partir a de aceite usado	14
Figura 4. Segunda parte de la producción de biodiésel a partir de aceite usado	14
Figura 5. Primera etapa de la producción de biopolímeros	15
Figura 6. Segunda etapa de la producción de biopolímeros	16
Figura 7. Diagrama de Bloques para la producción de Biochar	17
Figura 8. Diagrama de Bloques para la producción de Hidrochar	17
Figura 9. Vista general de la planta de producción de biodiésel	30
Figura 10. Simulación producción biochar en Aspen plus	32
Figura 11. Diagrama de flujo de caja con un costo de renta de \$100/h	38
Figura 12. Diagrama de flujo con un costo de renta de \$65/h	39
Figura 13. Diagrama de flujo con un costo de renta de \$65/h, por 1920h anuales y financiamiento del 20-50%	39
Figura 14. Diagrama de flujo con un costo de renta de \$65/h, por 1000h anuales y financiamiento del 20-50%	40

1. BASES DE DISEÑO

1.1 Antecedentes

El proyecto de diseño e implementación de una planta piloto para el escalamiento de procesos de biomasa responde a la necesidad de desarrollar, validar y optimizar tecnologías emergentes provenientes de la biomasa. Por lo tanto, la finalidad es el evaluar la factibilidad económica y técnica de los procesos derivados a pequeña escala, particularmente a nivel de laboratorio, lo cual permite una base para su posterior implementación a nivel industrial.

Cada vez es más urgente la transición hacia una economía basada en fuentes de energía renovables para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales generados por la industria actual. En este contexto, la biomasa, que se define como el material biológico de origen vegetal o animal (Bonechi et al., 2017), toma protagonismo como una fuente renovable de energía y productos químicos. Los productos provenientes de la biomasa, como biocombustibles, bioquímicos y otros materiales avanzados, han ganado importancia gracias a su capacidad de sustituir los materiales tradicionales derivados de fuentes fósiles, como el petróleo. Sin embargo, el desarrollo de procesos industriales a partir de la biomasa conlleva desafíos técnicos y económicos que deben ser abordados experimentalmente previo a su escalamiento, pues una implementación sin un análisis y validación adecuada puede llevar a complicaciones operativas, sobrecostos y fallas técnicas que comprometen la integridad y viabilidad del proyecto en gran escala (Tufvesson et al., 2010). Por ello, la construcción de una planta piloto se convierte en un paso intermedio vital para garantizar el éxito del escalamiento industrial. En esta etapa es posible identificar, optimizar y corregir aspectos críticos en los procesos, como la eficiencia en la conversión de materia prima, generación de subproductos no deseados, manejo de residuos, entre otros (Julián-Ricardo et al., 2018).

La implementación de una planta piloto en la Universidad San Francisco de Quito surge como respuesta a la creciente demanda de soluciones que permitan una producción más sostenible aprovechando los recursos locales como la biomasa residual generada en el país, específicamente la biomasa lignocelulósica. La biomasa lignocelulósica se define como el material orgánico derivado de plantas, compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Otoni et al., 2018). Estas estructuras poliméricas complejas forman la matriz estructural de las paredes celulares de las plantas y representan una de las fuentes de carbono renovable más abundantes en la naturaleza. En términos académicos, la biomasa lignocelulósica se considera una materia prima clave para la producción de biocombustibles, biopolímeros y productos químicos de alto valor agregado debido a su disponibilidad, bajo costo y carácter sostenible (Sun & Cheng, 2002).

La planta piloto permitirá a la comunidad académica y científica de la universidad llevar a cabo estudios de escalamiento detallados sobre el uso de biomasa en bioproductos utilizando técnicas innovadoras, optimizando condiciones operativas con el fin de alcanzar una mayor eficiencia y lograr un nivel para la implementación industrial. Este enfoque no contribuye únicamente a la investigación, ya que facilita la formación de personal altamente capacitado en el diseño y operación de procesos sostenibles, además, la planta piloto representa una oportunidad estratégica para posicionar a la universidad como referente en el ámbito de la investigación aplicada a bioproductos. Probar nuevas tecnologías a escala permite reducir los riesgos asociados a nivel industrial lo que incrementa las posibilidades de éxito económico y operativo (Wood-Black, 2014), así, el laboratorio servirá como centro para la validación de conceptos técnicos, así como para la investigación y desarrollo de tecnologías listas para ser transferidas al sector productivo.

A nivel internacional la planta piloto de la universidad ofrece una plataforma para la colaboración con empresas tecnológicas interesadas en el desarrollo de procesos basados en biomasa lo cual permitiría fortalecer los vínculos de colaboración academia-industria.

1.2 Descripción del producto

Al ser una planta piloto modular, no se contempla un único producto, sino que es posible producir diferentes productos según la necesidad o demanda. Los productos en los que se centra el presente trabajo son celulosa, biodiésel, biopolímeros y biochar, por lo cual nos centraremos en la descripción detallada de cada uno de ellos. Sin embargo, al ser una planta piloto modular, su diseño podrá adaptarse fácilmente a otros procesos, de acuerdo con las necesidades eventualmente emergentes.

1.2.1 Biodiésel.

El biodiésel es un combustible renovable producido a partir de aceites vegetales o grasas animales. En el contexto de Ecuador, el biodiésel puede suplir la creciente demanda de combustibles alternativos para el transporte, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles mitigando las emisiones de carbono (Knothe & Razon, 2017).

El biodiésel está compuesto principalmente por ésteres metílicos de ácidos grasos conocidos por sus siglas como FAME, posee propiedades similares al diésel convencional con la diferencia de tener un contenido de azufre significativamente más bajo (Hoekman et al., 2012). La materia prima para su producción principalmente es el aceite de palma y grasas vegetales, que son abundantes en Ecuador.

La producción de biodiésel puede beneficiarse significativamente mediante el uso de catalizadores derivados de biomasa, los cuales optimizan tanto el proceso de transesterificación como la calidad del producto obtenido. El enfoque de esta sección se centra en la fabricación

y empleo de estos catalizadores, destacando su contribución a un proceso más sostenible y eficiente. Ejemplos de catalizadores provenientes de biomasa incluyen biochar funcionalizado y óxidos metálicos obtenidos a partir de residuos agrícolas. Estos materiales no solo ofrecen una alternativa económica y renovable, sino que también disminuyen el impacto ambiental asociado al uso de catalizadores químicos tradicionales.

En comparación con el método convencional, que típicamente utiliza catalizadores homogéneos como hidróxido de sodio o metóxido de potasio, los catalizadores de biomasa presentan ventajas significativas. Estos incluyen la reutilización, una menor generación de residuos y un impacto ambiental reducido (Than et al., 2012). En consecuencia, el empleo de catalizadores de biomasa no solo mejora la sostenibilidad del proceso, sino que también abre oportunidades para valorizar residuos agrícolas y de otros orígenes, promoviendo la economía circular.

El proceso de producción de biodiesel se inicia con la recepción y acondicionamiento de materias primas. Antes de ingresar al proceso principal, los aceites usados son sometidos a una etapa de filtración para eliminar partículas sólidas y asegurar que el material cumpla con las especificaciones mínimas requeridas para el procesamiento (Arroyo, Fernández-Pereira, & Bermejo, 2015). Antes de ingresar al proceso de transesterificación los aceites son llevados a un calentamiento controlado para reducir los niveles de humedad. Este enfoque integral para la entrada de materia prima asegura que el proceso de producción de biodiesel no solo sea eficiente, sino que también cumpla con estándares ambientales de calidad industrial.

Su precio puede variar entre \$600 y \$800 por tonelada (Almeida-Naranjo et al., 2022). Con el proceso de transesterificación el biodiésel puede generarse a un costo de producción de aproximadamente \$0.90 a \$1.20 por litro.

Este biocombustible debe ser almacenado en tanques de acero inoxidable para evitar corrosión y puede ser transportado en camiones cisterna para combustibles líquidos. Su proceso

de producción se lo observa en las siguientes figuras, dónde el primero es a partir de aceite vegetal y el segundo a partir de aceite usado, respectivamente.

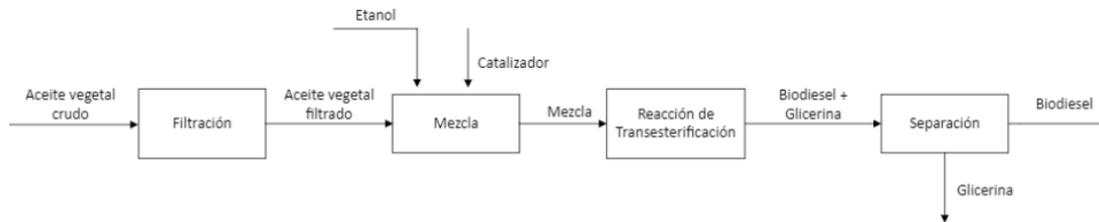


Figura 1. Primera etapa de la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal

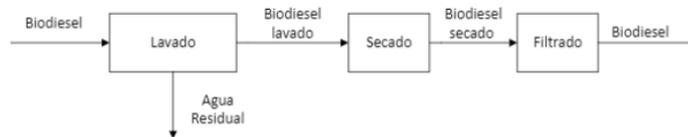


Figura 2. Segunda etapa de la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal

Por otro lado, tenemos la producción de biodiesel a partir de aceite usado.

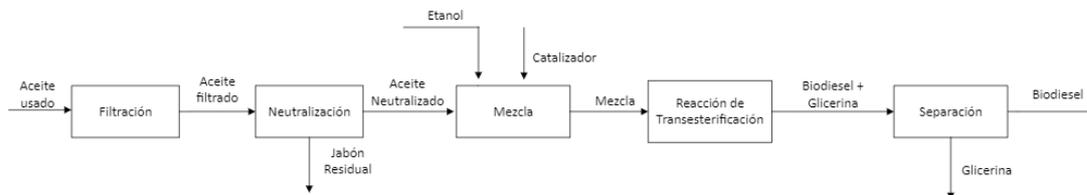


Figura 3. Primera parte de la producción de biodiesel a partir de aceite usado

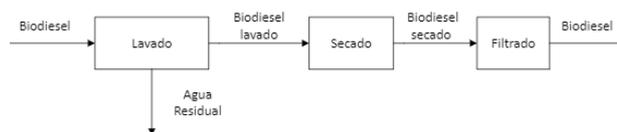


Figura 4. Segunda parte de la producción de biodiesel a partir de aceite usado

1.2.2 Biopolímeros (celulosa, quitina, pectina).

La celulosa y los biopolímeros son materiales naturales ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales como películas y bolsas biodegradables, dispositivos médicos biodegradables como suturas o clips quirúrgicos, fibras textiles biodegradables, entre otros; desempeñando un rol clave en la transición hacia alternativas más sostenibles y ecológicas (Niaounakis, 2015). La celulosa es un polímero natural presente en la biomasa vegetal, utilizado principalmente en la producción de papel, textiles y bioplásticos. Su extracción se realiza a partir de residuos agrícolas como el bagazo de caña o residuos madereros, lo que responde a la creciente demanda de insumos sostenibles y económicos, con un costo aproximado de \$40 a \$60 por tonelada. En presentaciones comerciales, este polímero tiene una pureza que oscila entre el 85% y el 95% y su estructura fibrosa de alta resistencia mecánica y biodegradabilidad la hacen apropiada para múltiples usos industriales (George et al., 2020). Además, puede almacenarse en estado seco o en gránulos, siempre cuidando de mantenerla libre de humedad para preservar su calidad.

Por otro lado, los biopolímeros como los derivados del almidón, la celulosa, la pectina y la quitina, representan alternativas innovadoras y sostenibles con el medio ambiente en comparación con los polímeros sintéticos convencionales (Rodríguez Sepúlveda & Orrego Alzate, 2016). Estos biopolímeros pueden emplearse en la fabricación de empaques, textiles, productos plásticos y en aplicaciones farmacéuticas. La pectina, obtenida de las paredes celulares de frutas como cítricos y manzanas, es utilizada como agente gelificante y estabilizador en alimentos y productos cosméticos (Sahana & Rekha, 2018). Por su parte, la quitina, derivada de los exoesqueletos de crustáceos y algunas fuentes fúngicas, se transforma en quitosano, un biopolímero empleado en tratamientos agrícolas, médicos y en la purificación de aguas (Gertenbach & Cooper, 2009). Todos estos biopolímeros se obtienen a partir de

materias primas renovables, como cultivos de maíz, papa o residuos agrícolas y marinos, que son accesibles y relativamente económicos.

Estos biopolímeros presentan propiedades mecánicas similares a las de los polímeros sintéticos, con la ventaja de ser completamente biodegradables en entornos naturales. El costo de producción varía según la fuente de carbono utilizada, pero en general se mantiene en rangos competitivos para favorecer su implementación a mayor escala (Piccino et al. 2016). Al igual que la celulosa, los biopolímeros como la pectina y el quitosano se almacenan en forma de gránulos y se transportan en sacos o contenedores a granel, asegurando un ambiente seco para evitar la absorción de humedad que pueda comprometer su calidad. Su proceso de extracción/producción se lo observa en la figura 5 y 6.

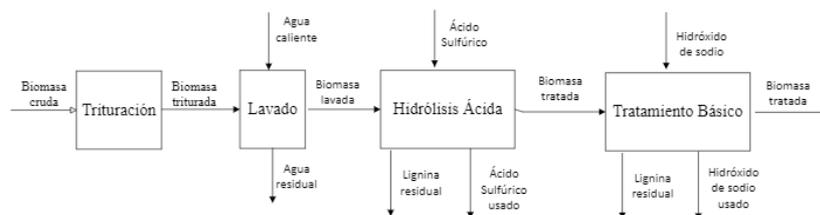


Figura 5. Primera etapa de la producción de biopolímeros

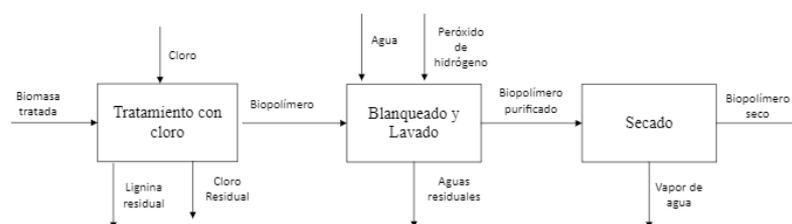


Figura 6. Segunda etapa de la producción de biopolímeros

1.2.3 Biochar.

El biochar es material carbonoso obtenido a partir de la pirolisis de biomasa bajo condiciones controladas de temperatura y en ausencia o limitación de oxígeno, es utilizado para

mejorar la calidad de suelo y como sumidero de carbono (Alabi et al. 2019). En el contexto del país, puede ayudar a prácticas de agricultura sostenibles y a la restauración de tierras degradadas ya que tiene aplicaciones específicas en la mejora de suelos agrícolas, la captura de carbono, la remediación ambiental y como precursor para otros productos industriales debido a su alta porosidad, estabilidad química y capacidad de adsorción (Verheijen et al. 2010).

Su composición principal es el carbono, que puede estar presente en un rango de 60-90%, con propiedades como alta porosidad, alta capacidad de retención de agua y nutrientes, y estabilidad química (Arroyo et al. 2015). El costo de materia prima para biochar varía, siendo los residuos agrícolas los más económicos con un costo aproximado de \$20 a \$50 por tonelada de biomasa. El proceso de producción de biochar se lo observa en la figura 7.

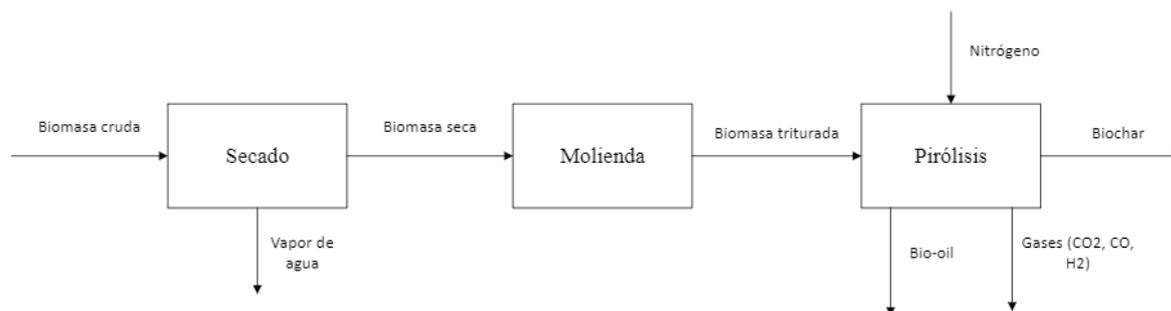


Figura 7. Diagrama de Bloques para la producción de Biochar

1.2.4 Hidrochar.

El hidrochar es un material carbonoso producido a través de la hidro termólisis de biomasa en condiciones de alta presión y temperatura, generalmente en un rango de 180-250°C, utilizando agua como medio de reacción (Libra et al., 2011). Se caracteriza por ser un material con aplicaciones potenciales en el mejoramiento de suelos, la adsorción de contaminantes y como fuente de energía renovable.

Su composición principal es mayoritariamente carbono, pero con una mayor presencia de oxígeno y grupos funcionales que el biochar, lo que le otorga una estructura más polar y una superficie modificada con grupos oxigenados (Sevilla & Fuertes, 2009). Presenta una capacidad de retención de agua similar al biochar, pero su estructura y porosidad dependen del tiempo de reacción y las condiciones de la hidrotermólisis (Wood-Black, 2014). A diferencia de la producción de biochar, en la producción de hidrochar no se emplea un secado previo a la carbonización, este proceso se observa en la figura 8.

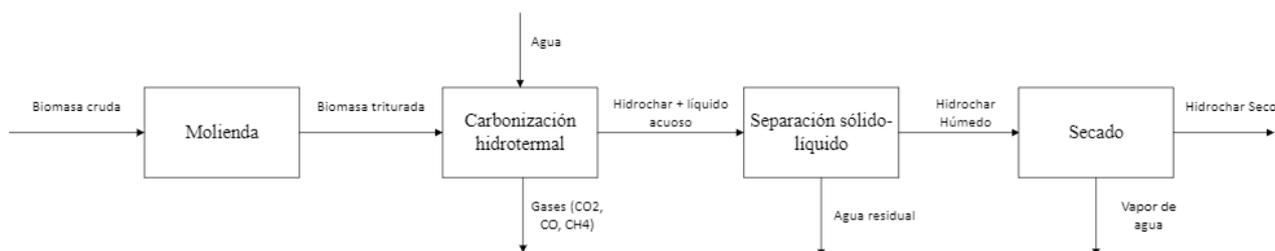


Figura 8. Diagrama de Bloques para la producción de Hidrochar

1.3 Descripción de materias primas

Las materias primas incluyen en su mayoría biomasa lignocelulósica, la cual será obtenida a partir de los desechos generados por plantaciones agrícolas de maíz, caña y cacao, entre otros. Estas serán traídas de provincias aledañas como Chimborazo, Cotopaxi e Imbabura. Con este tipo de materias primas no hay que tener un cuidado en específico; lo contrario sucede con las otras materias primas, como lo son reactivos corrosivos o peligrosos como el ácido sulfúrico o el hidróxido de sodio. Este tipo de reactivos serán transportados y almacenados con un mayor cuidado para prevenir posibles accidentes o altercados por su naturaleza reactiva. En la tabla 2 de la sección Anexos, se encuentra el listado de todas las materias primas, incluido su origen, proveedores, costos, consideraciones de seguridad, manejo y transporte, y su función en el proceso.

1.4 Selección de proceso

Para determinar los procesos que se realizarían dentro de la planta piloto, se realizó una matriz de decisiones, en la cual se compararon 3 procesos en general: Procesamiento de biomasa, Alimentos (bebidas) y Farmacéutica. Para comparar estas 3 opciones nos basamos en 6 criterios (Costos, Complejidad, Regulaciones, Mercado, Materia prima, e Impacto Ambiental), los cuales eran evaluados en una escala del 1 al 10, donde 1 es lo peor y 10 lo mejor. Al realizar esta matriz que se encuentra en la sección Anexos, se determinó, al obtener una mayor puntuación, que la mejor opción era procesamiento de biomasa ya que abarca una gran cantidad de procesos, y, en general, es superior en base a los criterios evaluados.

1.5 Justificación del proyecto

Se busca generar beneficios económicos a corto y largo plazo, gracias a una estrategia que combina el aprovechamiento de recursos naturales, la optimización de procesos y la reducción de costos. Un factor clave para asegurar su rentabilidad es la utilización de biomasa lignocelulósica, un recurso abundante que proviene de residuos agrícolas y forestales. Al tratarse de un material accesible y de bajo costo, no solo se reducirá significativamente el gasto en materias primas, sino que también se promoverá el uso sostenible de los recursos naturales. Además, el hecho de que el proyecto se enfoque en la valorización de biomasa y en el desarrollo de productos sostenibles y de alto valor añadido, como biodiésel, biochar, hidrochar y biopolímeros, podría abrir la puerta a incentivos fiscales y subvenciones gubernamentales, impulsando aún más su viabilidad económica.

Por otro lado, la construcción de una planta piloto en la USFQ será crucial para experimentar y optimizar los procesos de producción antes de llevarlos a una escala mayor. A través de tecnologías como la pirólisis y la transesterificación, se transformará la biomasa en biocombustibles de alta calidad, maximizando la eficiencia y reduciendo el desperdicio. Este

paso permitirá asegurar que, cuando el proyecto crezca, lo haga de manera controlada y rentable, evitando problemas técnicos y financieros en fases posteriores.

Esta planta promete ser de utilidad para la USFQ y empresas externas al mismo tiempo, ya que podrán rentarla durante un determinado periodo de tiempo, para evaluar la factibilidad de sus productos, y así poder escalarlos industrialmente con mayor garantía, después de haber probado y asegurado que a escala piloto son funcionales y técnicamente viables. Por lo general, se espera que en su mayoría sean empresas pequeñas o investigadores que deseen escalar y probar un nuevo producto, siempre y cuando este alineado con procesamiento de biomasa lignocelulósica, los que rentarían este espacio.

Dependiendo del tiempo de renta de la planta, y del tipo de proceso a realizarse se podría establecer una tarifa mensual. Sin embargo, el precio aun no es estimado, pero se busca que se pueda cubrir la inversión inicial en menos de 5 años. Esto será considerado en el análisis económico dentro del presente proyecto.

Todo esto es importante para la Universidad San Francisco de Quito y para el fortalecimiento de su sistema de innovación el poder testear la factibilidad de las tecnologías mencionadas a nivel industrial, por ello, nada mejor que hacerlo a través de procesos a nivel piloto. Por esta razón, con este proyecto no se busca crear un sistema piloto para cada producto sino tener un laboratorio de escalamiento modular, donde se pueda crear diferentes procesos pilotos para diferentes tipos de productos (biopolímeros, biodiésel, biochar e hidrochar, entre otros).

1.6 Impacto esperado de la implementación del proyecto

Al implementar una planta piloto de escalamiento para el procesamiento de biomasa en la Universidad San Francisco de Quito, se abrirán nuevas posibilidades para la investigación aplicada y la transferencia tecnológica hacia procesos industriales de gran escala. Este proyecto

permitirá optimizar y validar técnicas sostenibles de conversión de biomasa, facilitando el desarrollo de biocombustibles, biochar, bioplásticos, hidrochar y otros productos químicos de alto valor derivados de residuos agroindustriales y forestales. Así, se contribuye a la creación de alternativas locales que reducen la dependencia de importaciones de combustibles fósiles y productos químicos derivados del petróleo.

Además, esta iniciativa tendrá un impacto transversal en los sectores académico, industrial y social. Académicamente, será un espacio de formación práctica y desarrollo de capacidades en ingeniería química, biotecnología y manejo de procesos industriales. En el ámbito industrial, la planta piloto actuará como una plataforma para la experimentación y optimización de procesos que, una vez escalados, incrementarán la competitividad de las empresas locales en mercados sostenibles.

Desde una perspectiva social y económica, la implementación de la planta piloto fomentará la creación de empleos calificados en áreas como investigación, operación, mantenimiento y logística asociadas al procesamiento de biomasa. También se estimulará la colaboración entre la universidad, empresas y comunidades rurales, integrando a pequeños productores en cadenas de valor más sostenibles y diversificadas.

Finalmente, este proyecto tiene un impacto ambiental positivo al aprovechar residuos de biomasa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover prácticas más limpias. Asimismo, contribuye al desarrollo de una economía circular, al transformar residuos agroindustriales en productos valiosos, incrementando la conciencia sobre la gestión sostenible de recursos y el uso de energías más limpias.

1.7 Limitaciones

Dentro de las limitaciones analizadas, internas y externas, se destacan las siguientes:

- Limitación económica y financiamiento:

Los costos de importación de equipos especializados para plantas piloto son altos, además de que se necesitaría el financiamiento de empresas externas, privadas o de la misma universidad para llevar a cabo este proyecto.

- Disponibilidad de espacio en la USFQ:

La disponibilidad de espacio para la implementación de la planta piloto dentro de la universidad es limitada debido a que el campus se encuentra ya ocupado por áreas académicas, administrativas y recreativas, lo que deja un margen mínimo para nuevas construcciones o ampliaciones. Así mismo, el crecimiento constante de estudiantes requiere de más aulas, laboratorios y espacios de convivencia, lo que compite directamente con posibles áreas destinadas a la planta piloto.

- Limitaciones de representatividad:

Aunque el proyecto simulará una planta piloto, el alcance en términos de escalabilidad puede verse limitado, ya que ciertos comportamientos de los procesos solo se revelan a escalas mayores, por ejemplo, la acumulación de impurezas o la eficiencia de los subprocesos, no se aprecian hasta el escalamiento completo.

- Disponibilidad de datos para la simulación:

Las propiedades de algunas materias primas como el bagazo de caña, o el aceite usado pueden no estar disponibles, lo cual afectaría en cierto modo la simulación y a los resultados para establecer la viabilidad de los procesos.

- Normativas:

Existen normativas y regulaciones ambientales establecidas en Ecuador para la producción de biocombustibles, biopolímeros y biochar (ISO 14000, INEN 2841, COA); en las cuales se detallan límites de emisión, generación de residuos, manejo de residuos, entre otros. Por lo tanto, es fundamental determinar que, dentro de los procesos a realizarse en la planta se cumplan con los estándares.

1.8 Terminología especializada

Biomasa lignocelulósica: Materia vegetal que está compuesto principalmente por tres polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. Es utilizada para producir biocombustibles debido a su abundancia y potencial energético (Demirbaş, 2009).

Planta piloto: Instalación experimental a pequeña escala que reproduce los procesos industriales de una planta de producción a gran escala, con el objetivo de probar y optimizar los procesos antes de aplicarlos a nivel comercial (Vega & Navarrete, 2019).

Pirólisis: Proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. A través de la pirólisis, la biomasa se convierte en carbón, bioaceite y gas (Bridgwater, 2012).

Carbonización: Proceso de conversión de biomasa en carbono o carbón mediante calentamiento en ausencia de oxígeno. Se utiliza para producir carbón vegetal (Lehmann & Joseph, 2015).

Pellets: Cilindros pequeños de biomasa comprimida, generalmente madera, utilizados como combustible por su alta eficiencia energética y bajo impacto ambiental (Oberberger & Thek, 2010).

Transesterificación: Reacción química que transforma triglicéridos en biodiésel mediante la adición de un alcohol, como metanol o etanol. Este proceso es fundamental en la producción de biocombustibles (García & Sánchez, 2022).

Pectinas: Polisacáridos que se encuentran en las paredes celulares de las plantas, especialmente en frutas. Son utilizados como agentes gelificantes en la industria alimentaria y farmacéutica (Salazar Iribe & Gamboa de Buen, 2013).

Quitosano: Polisacárido derivado de la quitina, con propiedades biocompatibles y biodegradables, utilizado en agricultura, medicina y tratamiento de aguas (Morin-Crini et al., 2019).

Biochar: Carbón vegetal producido mediante la pirólisis de biomasa. Se utiliza para mejorar la calidad del suelo y para capturar carbono (Zhang & Gao, 2013).

Hidrochar: Material carbonoso producido mediante carbonización hidrotérmica (HTC) de biomasa húmeda a temperaturas de 180-250 °C y alta presión en un ambiente acuoso. Se utiliza principalmente como enmienda del suelo y en aplicaciones de remediación ambiental, aprovechando su capacidad para retener nutrientes y agua (Funke & Ziegler, 2010).

Carbonización Hidrotérmica: Proceso térmico en el que biomasa húmeda se transforma en un material carbonoso (hidrochar), al ser calentada a temperaturas de 180-250 °C bajo alta presión en un medio acuoso y sin oxígeno. Este método es eficiente para tratar residuos orgánicos con alto contenido de humedad sin necesidad de secado previo, produciendo materiales útiles para aplicaciones agrícolas y ambientales (Funke & Ziegler, 2010).

1.9 Ubicación

La planta idealmente se planteó estar ubicada en el Campus Cumbayá de la USFQ, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el espacio es limitado dentro del campus por lo que su implementación requeriría una ampliación de espacio como se ha hecho con nuevos edificios como el Hannah Arendt. Por otro lado, se plantea la alternativa de llevar a cabo la planta piloto en el mismo sector de Cumbayá pero no dentro de la universidad. La compra de un terreno en una zona alejada del sector urbano donde el funcionamiento de la planta no afecte a la población puede ser utilizado para llevar a cabo la planta piloto. A pesar de ser un gasto extra, esto asegura su construcción sin afectar al ambiente actual del Campus Cumbayá de la universidad.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL PROYECTO

2.1 Objetivo general

Diseñar una planta piloto modular en la Universidad San Francisco de Quito para el escalamiento de procesos de transformación de biomasa lignocelulósica para la producción de, biopolímeros, biodiésel, biochar e hidrochar.

2.2 Objetivos específicos

- Definir los tipos de procesos y tecnologías disponibles para la transformación de biomasa lignocelulósica.
- Diseñar el layout de la planta piloto identificando los equipos y sistemas necesarios a partir de balances de masa para los diferentes productos.
- Dimensionar los equipos seleccionados para la planta determinando su ubicación en la misma.
- Realizar un análisis de prefactibilidad técnica y económica, considerando costos de inversión, operación y mantenimiento, además de posibles fuentes de financiamiento.

2.3 Actividades y Metodología

Para llevar a cabo el proyecto, se realizaron entrevistas a docentes de distintas áreas del Politécnico de la USFQ, seleccionando a aquellos con conocimientos que aportaran al diseño y análisis de la planta piloto. Con base en la información recopilada, se elaboró una matriz de decisiones (ver Anexo A) para identificar los procesos más viables, priorizando aquellos que se adaptaran a las necesidades y capacidades del proyecto. Una vez determinados los procesos principales, se desarrolló un diagrama de bloques para cada uno, el cual fue revisado y corroborado junto a los docentes expertos en cada área, garantizando así su precisión y viabilidad.

La determinación de las bases de cálculo para los procesos de la planta piloto fue un paso fundamental en el diseño del proyecto, garantizando que las simulaciones y dimensionamientos fueran consistentes con los objetivos académicos y los requerimientos técnicos. Esta sección se realizó a través de dos enfoques principales: investigación bibliográfica exhaustiva y consultas con expertos en el campo de la biomasa y procesos químicos.

Para la revisión bibliográfica se revisaron diversas fuentes académicas y técnicas que ofrecen información detallada sobre el diseño y la operación de plantas piloto. "From Laboratory to Industrial Scale: A Scale-Up Framework for Chemical Processes" de Piccinno et al. (2016) fue una referencia clave para diferenciar las etapas de laboratorio, piloto e industrial. El trabajo abordó específicamente las metodologías de cálculo para la transferencia de calor y dimensionamiento de reactores a pequeña escala. Arroyo et al. (2015), en el artículo "Demonstration Plant Equipment Design and Scale-Up from Pilot Plant of a Leaching and Solvent Extraction Process", proporcionaron guías prácticas para determinar tiempos de residencia y relaciones de flujo en sistemas de extracción, fundamentales para la escalabilidad de procesos. De esta manera y con otros artículos, se definieron los niveles de producción esperados, y, a partir de ellos, se realizó un balance de masa inverso que permitió identificar la cantidad de materia prima necesaria. Posteriormente, cada proceso fue simulado con el software Aspen Plus para obtener las dimensiones adecuadas de los equipos y definir su ubicación óptima en el layout de la planta.

Para el análisis financiero, se investigaron y costearon los precios de los equipos y materias primas involucrados, recopilando esta información en fuentes como distribuidores especializados, entre ellos proveedores locales especializados en construcción de equipos o Alibaba. Con estos datos, se calcularon los costos de inversión dentro y fuera de la batería de procesos (ISBL y OSBL). Finalmente, se determinó el tiempo estimado de recuperación de la

inversión, así como la viabilidad financiera del proyecto mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

3. DISEÑO DEL PROCESO

3.1 Balance de materia y energía

Realizar un balance de materia resulta esencial al momento de diseñar una planta piloto ya que es un paso crítico para asegurar la eficiencia y control del proceso a medida que se escala hacia niveles industriales (Smith, 2016). Este balance permite evaluar entradas y salidas de cada etapa de los diferentes procesos, lo que resulta fundamental para identificar el consumo de recursos, generación de productos y subproductos, y flujos de residuos. A su vez, permite identificar si las condiciones y parámetros obtenidos se comportarán de manera similar en la planta piloto ya que se consideran las variaciones de volumen, tiempos de residencia y otras variables operativas.

En todos los casos se realizó un balance de materia inverso, el cual es utilizado cuando el caudal de producción final es el parámetro crítico a cumplir, lo que asegura tener un valor realista que se puede procesar a escala piloto. El balance de materia se realizó de forma independiente para cada proceso, de esta manera, se tienen cuatro diferentes balances de materia.

3.1.1 Balance de materia del biodiésel.

En la figura 2 se observa el diagrama de bloques para la producción de biodiésel, se planteó un caudal de producción de 150 L/día de biodiésel al 99% de pureza basándonos en literatura acerca de plantas piloto similares, sin embargo, este valor de producción fue ajustado a uno menor debido a las capacidades que se van a tener dentro de esta planta piloto, tomando como factor el 10% del caudal de producción original. A partir de dicho valor se calcularon los distintos valores de manera inversa analizando cada etapa. Es importante recalcar que cada etapa pasa por una serie de consideraciones como eficiencia de cada unidad, así como la

variación en los caudales de producción debido a las pérdidas. Se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en la Tabla 9 en la sección F de Anexos.

3.1.2 Balance de materia de biopolímeros.

En la figura 3 se observa el proceso para la producción de biopolímeros; para hacerlo se estableció un caudal de producción de 20 kg/h el cual es el 10% del caudal de una producción de biopolímeros en una planta industrial. En base a esto se calculó que se necesita de 99,04 kg/h de biomasa para alcanzar la producción deseada. Los caudales de cada etapa son presentados en la Tabla 8 de la sección F Anexos.

3.1.3 Balance de materia del biochar.

El diagrama de bloques presentado en la Figura 4 se puede apreciar el procedimiento para la obtención de biochar. Se planteó una producción de 1.5 kg/h de biochar, caudal que igualmente fue modificado al considerar solo el 10% del caudal planteado originalmente. En base al balance inverso realizado se determinó que la materia prima que debe entrar es 12.35 kg/h de biomasa cruda. Una tabla resumen de los resultados obtenidos es presentada en la Tabla 6 en la sección F de Anexos.

3.1.4 Balance de materia del hidrochar.

En la Figura 5 se puede observar el diagrama de bloques de la producción de hidrochar, el caudal de producción que se estableció para este proceso fue de 1.5 kg/h de hidrochar. Al aplicar el balance de materia inverso se determinó que el caudal de entrada de materia prima debe ser de 2.53 kg/h de biomasa cruda. Los resultados para cada etapa del proceso son presentados en la Tabla 7 de la sección F de Anexos.

3.2 Balance de energía

Por otro lado, para el balance de energía se usó el dimensionamiento de los equipos para calcular la potencia necesaria para cada equipo; obteniendo así que la planta necesita de 105 a 140 KW/h (dependiendo del proceso) para operar; sin embargo, la siguiente tabla 1 se

muestra la cantidad de energía que requiere cada proceso, el cual fue calculado en base a las simulaciones realizadas y a la cantidad de energía necesaria para cada uno de los componentes de la planta.

Tabla 1. Energía necesaria para cada proceso

	Procesos de producción de			
	Biochar	Hidrochar	Biodiésel	Biopolímeros
Energía empleada KW/h	105,00	125,00	140,00	110,00

3.3 Condiciones de operación

Dependiendo del proceso, las condiciones de operación de los equipos empleados cambian. En la producción de biodiésel los mezcladores operan a 20 °C a presión atmosférica con un tiempo de residencia de 30 minutos y un flujo de entrada de 0.16 L/min. Siguiendo la línea, el reactor opera a 60 °C igualmente a presión atmosférica con un tiempo de residencia de 30 minutos y un flujo de materia de 3.024 L/min. Luego, la primera torre de destilación opera a 65.36 °C a una presión de 1.013 bar. La columna de separación líquido-líquido opera a 45 °C y tiene un tiempo de residencia de una hora. Finalmente, la segunda torre de destilación opera a 60 °C trabajando a presión atmosférica.

En la producción de biochar, el secador de lecho fluidizado opera a 130 °C, con una velocidad de 3 m/s; el molino de martillos a 3000 rpm, y el reactor de pirolisis a 500 °C y 1 atm. Por otro lado, en la producción de hidrochar, se mantiene la misma velocidad en el molino de martillos y temperatura en el secador, pero el reactor HTC opera a 250 °C y 3 MPa; con una relación 6:1 de agua:biomasa y un tiempo de residencia de 2 horas; por último, el filtro de prensa opera a 3 atm.

En la producción y extracción de biopolímeros el molino de martillos opera a una velocidad de 3000 rpm, el agua empleada para el lavado entra a 40 °C, mientras que el reactor CSTR, batch y tanque de mezclado operan a 100 °C, 70 °C, y 25 °C respectivamente, a 1 atm y a 300, 200 y 100 rpm respectivamente. Por último, el secador de lecho fluidizado opera a 150 °C.

Dentro de este proceso, se emplean las siguientes relaciones:

- 10:1 de agua:biomasa para el lavado
- 15:1 de solución ácida (H₂SO₄ al 5%):biomasa
- 20:1 de solución básica (NaOH al 5%):biomasa
- 50:1 de solución de cloro (al 2%):biomasa
- 10:1 de agua:peróxido al 10%

4. DISEÑO DE LA PLANTA

4.1. Selección y dimensionamiento de equipos

A partir de la simulación realizada en Aspen Plus y los resultados obtenidos es posible realizar el dimensionamiento de los diferentes equipos de la planta. La simulación fue realizada para los procesos de biodiesel y de biochar, por lo que se presenta el dimensionamiento de los equipos pertenecientes a estos procesos.

4.1.1 Selección de equipos.

Se definieron las operaciones unitarias a realizar en cada proceso en los diagramas de bloques presentados anteriormente, a partir de ello, se analizó qué equipos cumplen con la función que se necesita en cada proceso. De esta manera, se llega a los equipos necesarios que conforman la línea de producción de cada proceso. En la Tabla 3 es apreciable la información de los equipos que tendrá cada proceso, ubicada en la sección de Anexos C.

4.1.2 Dimensionamiento de equipos.

4.1.2.1 Dimensionamiento de equipos de biodiesel.

Se simuló el proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal en el software de simulación Aspen Plus, cabe resaltar que se utilizaron catalizadores provenientes de biomasa en la reacción de transesterificación, lo cual ayudó a obtener una alta pureza de biodiesel. La vista general de la planta es la siguiente:

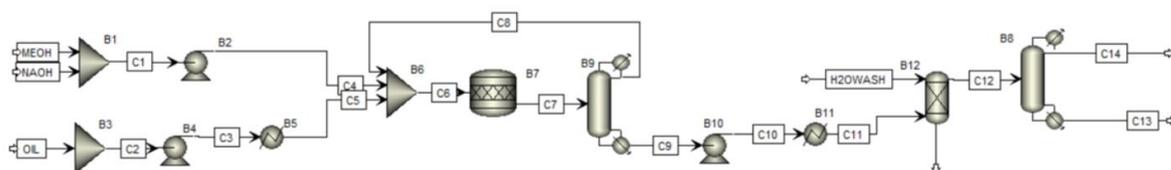


Figura 9. Vista general de la planta de producción de biodiésel

La planta consiste de mezcladores, bombas, un reactor Batch, dos torres de destilación y una columna de separación líquido-líquido. Las corrientes de entrada del proceso son metanol e hidróxido de sodio, por un lado, y por el otro, el aceite vegetal. Al final del proceso se obtienen dos corrientes, la primera una corriente de biodiesel con un 98.36% de pureza, y la segunda una corriente residual donde su composición es mayoritariamente glicerol y agua.

Al correr la simulación se obtienen los resultados de las diferentes corrientes, así como de los equipos. Se realizó el dimensionamiento del reactor Batch con agitación, de las dos torres de destilación y de la columna de extracción líquido-líquido. Además, se obtienen las potencias de las bombas.

Se seleccionó el paquete termodinámico UNIFAC (Universal Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficients) debido a su capacidad para predecir con precisión las propiedades termodinámicas de sistemas multicomponentes no ideales, como los involucrados en esta operación (Jirasek et al., 2022).

Durante la simulación del proceso de producción de biodiésel en Aspen Plus, se presentaron varios desafíos que requirieron ajustes significativos en los parámetros operativos y de diseño, especialmente en las columnas de destilación. Uno de los principales problemas fue que el software no maneja eficientemente flujos tan pequeños como los asociados a una planta piloto. Esto dio lugar a dimensiones calculadas por el programa que era irracionales y físicamente inadecuadas.

Para abordar esta limitación se recurrió a referencias bibliográficas, que fueron previamente mencionadas, que sugieren parámetros mínimos operativos para equipos a pequeña escala. Específicamente, se decidió reducir el espaciado por bandejas (tray spacing) de las columnas de destilación al mínimo práctico, fijándolo en 15cm. Este valor no solo está dentro de las recomendaciones para plantas piloto, sino que también mejora la estabilidad del modelo en Aspen Plus. Además, el diámetro de las columnas fue justado a

15cm, también basado en datos bibliográficos, garantizando que las dimensiones sean representativas de un diseño realista para plantas piloto.

Estos ajustes permitieron obtener resultados coherentes con la operación esperada de una planta piloto y resolvieron las limitaciones iniciales del software para flujos bajos.

4.1.2.2 Dimensionamiento de equipos de biochar.

Al realizar la simulación en Aspen Plus de la producción de biochar (figura 7) se tuvo que considerar a la biomasa que entra al inicio del proceso como “sólido” para que el programa lograra simular el proceso de secado y triturado; pero luego se consideraba como un “material no definido” para que pueda entrar al pirolizador y así completar todo el proceso. Esto dio como resultado que el proceso si es viable y factible; ya que la simulación si corrió; por lo que posteriormente se procede con el dimensionamiento de los equipos del proceso. Se consideró como si todos los equipos tuvieran una forma cilíndrica, sin embargo, las relaciones de radio y altura varía según el tipo de equipo; por ejemplo, para el reactor de pirolizador se considera una relación 1:2 de altura:diámetro. Todas estas consideraciones se encuentran especificadas para cada equipo en la tabla 10 en la sección G de anexos.

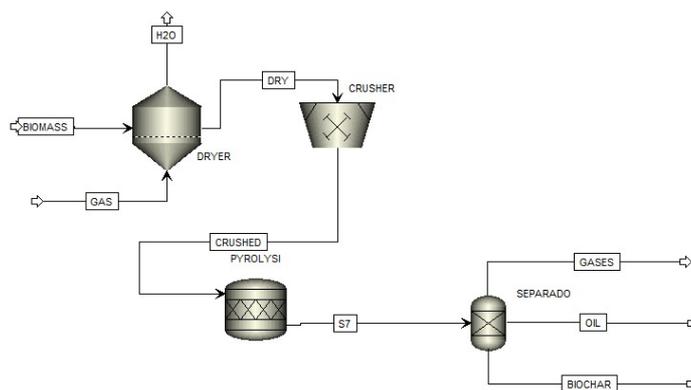


Figura 10. Simulación producción biochar en Aspen plus

4.1.2.3 Dimensionamiento de equipos para hidrochar y biopolímeros.

Por último, el dimensionamiento de los equipos para la producción de biopolímeros e hidrochar se los realizó considerando los caudales de entrada para cada equipo, para poder

calcular en base a esto su volumen, altura, y diámetro; considerando un factor de sobredimensionamiento de 1,2 (Roig, 2013).

Como algunos procesos comparten los mismos equipos se calcula las dimensiones de cada equipo; como se lo observa en las tablas 10 y 11 del Anexo G; y se considera solo las dimensiones más grandes de esos equipos para usarlos; de manera que los equipos a usar, con sus respectivas dimensiones están presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de los equipos de la planta piloto modular

Tabla 2. Resumen equipos a emplearse en la planta piloto			
Equipo	Volumen (L)	Alto (cm)	Radio (cm)
Molino de martillos	8.81	35.53	8.88
Secador de lecho fluidizado	9.24	47.31	7.88
Reactor de pirólisis	12.52	39.95	9.99
Reactor HTC	19.69	60.88	10.15
Filtro de prensa	72.00	120.00	180.00
Tanque de mezclado	25.50	50.64	12.66
Reactor CSTR	163.86	94.15	23.54
Reactor batch	108.89	63.80	23.30
Columna separación	81.67	114	5
Columna destilación 1	22.27	105	7.5
Columna destilación 2	36.22	180	7.5

4.2. Layout de la planta

El diseño del layout de la planta piloto se estructuró para maximizar la funcionalidad, la flexibilidad y la seguridad. La planta está dividida en zonas claramente definidas que abarcan la línea de producción, almacenamiento de materia prima, almacenamiento de producto final y almacenamiento de equipos, organizadas para garantizar un flujo eficiente de materiales y procesos.

La línea de producción de biodiesel constituye el núcleo del diseño, Aquí se encuentran los equipos principales para las etapas de pretratamiento, reacción y postratamiento,

organizados en secuencia lineal para optimizar el flujo de trabajo. Los equipos utilizados tienen dimensiones reducidas, lo cual es típico en plantas piloto y facilita su manipulación y reubicación en el espacio disponible.

En uno de los extremos de la planta se encuentra la zona de almacenamiento de materia prima, destinada a los reactivos y materiales necesarios para la producción. Esta área se diseñó para tener un acceso rápido a las materias primas, con medidas de seguridad adecuadas para la manipulación de sustancias químicas. En el extremo opuesto, la zona de almacenamiento de producto final asegura que los productos se mantengan separados de la materia prima, minimizando riesgos de contaminación cruzada y facilitando la logística de carga y descarga. El diseño también incluye una zona de almacenamiento de equipos, subdividida en tres áreas: equipos de pretratamiento, reactores y equipos de postratamiento. Esta segmentación facilita la organización y el mantenimiento, permitiendo un acceso rápido a los componentes necesarios para las distintas etapas del proceso. Los equipos de pretratamiento como los mezclados y calentadores iniciales se agrupan en una sección; los reactores empleados ocupan otra área, mientras que las columnas de destilación y otras unidades de esta etapa forman parte de la sección de postratamiento.

Un aspecto crucial del diseño es su enfoque modular. Los equipos están montados en sistemas móviles que permiten su extracción y almacenamiento temporal, lo que facilita la reconfiguración de la línea de producción para adaptarse a nuevas investigaciones o productos. Para garantizar la accesibilidad y seguridad, las distancias mínimas entre equipos se establecieron siguiendo las recomendaciones de Wood-Black (2014) en *Considerations for Scale-Up – Moving from the Bench to the Pilot Plant to Full Production*. En *Academia and Industrial Pilot Plant Operations and Safety*.

En general, el diseño de layout no solo optimiza la utilización del espacio, sino que también asegura la funcionalidad, la seguridad y la adaptabilidad de la planta piloto. Este

diseño permite que la instalación sea utilizada como una herramienta versátil para la transferencia de tecnología y el escalamiento de procesos desde laboratorio hacia la industria.

El layout se presenta en Anexo H.

4.3 Seguridad y ambiente

4.3.1 Seguridad

4.3.1.1 Seguridad en la producción de Biodiésel.

La seguridad en la producción de biodiésel es un aspecto crítico, especialmente en plantas piloto donde se busca optimizar procesos y minimizar riesgos. Para identificar y mitigar los posibles peligros asociados a esta línea de producción, se realizaron dos análisis de seguridad complementarios: el análisis FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) y el análisis HAZOP (Hazard and Operability Study). A continuación, se describen los resultados. El análisis FMEA tiene como objetivo identificar y priorizar los modos de falla en las etapas del proceso de producción. Las etapas analizadas fueron: pretratamiento, transesterificación, separación de fases, lavado y purificación. Se evaluaron los posibles modos de falla, sus causas, consecuencias y se asignaron valores de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D) para calcular el Número de Prioridad de Riesgo (NPR). La Tabla 13 en el Anexo I resume todos estos parámetros del análisis FMEA. Este análisis permitió priorizar los riesgos, siendo la etapa de transesterificación la que presentó los valores de NPR más altos. Basándonos en los resultados del FMEA, se realizó un análisis HAZOP detallado de la etapa de transesterificación. Esto permitió identificar desviaciones de los parámetros normales de operación y establecer acciones correctivas. Los parámetros evaluados incluyeron: temperatura, presión, flujo de reactivos y agitación. Los resultados del análisis HAZOP se presentan en la Tabla 14 presentada en el Anexo I.

4.3.1.2 Seguridad en la producción de Hidrochar.

Dentro de la planta piloto se ha considerado que la etapa más peligrosa, o que requiere de mayor atención, y sobre la cual se realizará un análisis de riesgos HAZOP (Tabla 15 en el anexo I) es en la producción de hidrochar (según el análisis FMEA realizado, presente en la tabla 12 de la sección I de los anexos); más específicamente en el reactor de carbonización hidrotermal; debido a las condiciones críticas de operación (temperaturas y presiones altas); ya que las fallas en los reactores ocasionan explosiones, lesiones, quemaduras, etc. Por esta razón, esta etapa es una de las que requieren mayor atención y cuidado, comparado con otras etapas de los otros procesos de la planta.

Adicionalmente, es necesario revisar los manuales de operación correspondientes a cada proceso y asegurarse del uso adecuado del equipo de protección personal, incluyendo todos sus accesorios. Asimismo, se debe llevar a cabo una inspección exhaustiva de las válvulas y mantener un monitoreo continuo de las operaciones. Además, es fundamental implementar medidas de control para riesgos químicos y ofrecer capacitaciones regulares a los operadores, con el objetivo de prevenir accidentes y fallos que puedan afectar tanto la seguridad de los trabajadores como la eficiencia de la producción.

La integración de los análisis FMEA y HAZOP permitió identificar y evaluar de manera exhaustiva los riesgos asociados a la producción de los diferentes productos en la planta piloto. Estas herramientas no solo priorizan las áreas de mayor atención, sino que también ofrecen recomendaciones prácticas para mitigar riesgos y mejorar la seguridad operativa.

4.3.2 Ambiente.

Es importante considerar un tratamiento para las aguas residuales de las diferentes etapas de cada proceso o incluso una recirculación de estas para lograr una circularidad del proceso. Específicamente se reusaría el agua empleada en el lavado de la materia prima, ya que esta no

se ve afectada por ningún químico ni reactivo que pueda impedir su reúso. Al hacerlo se está velando por el medio ambiente procurando mantener un enfoque sostenible.

Por otro lado, algunos reactivos tales como el ácido sulfúrico, el hidróxido de sodio, el cloro, entre otros, pueden reutilizarse para reducir costos de producción y optimizar así los diferentes canales de producción. Sin embargo, su reúso no es ilimitado por lo que hay que tener en cuenta su tratamiento y desecho. Este debe ser cuidadoso para evitar contaminaciones cruzadas y su llegada a lugares donde pueden afectar al ambiente. Por eso existen protocolos de manejo de residuos los cuales serán seguidos una vez estos reactivos hayan cumplido su vida útil.

Por último, se mantendrá en capacitación continua al personal de planta (en ocasiones habrá personas realizando prácticas profesionales o pasantes) con respecto a buenas prácticas medio ambientales; para que tengan una noción más clara del reciclaje, normas ISO y diferentes normas con este enfoque.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.1 Estimación de costos

Para determinar los costos ISBL, OSBL, etc. Se realizó en primera instancia una cotización de los equipos necesarios de la planta con una empresa externa privada (Anexo J, tabla 16); ya que, al ser equipos con dimensiones relativamente pequeñas, no se encuentran en ninguna tienda en línea (como Alibaba) que venda este tipo de equipos. El costo total de los equipos es de \$87.000. En base a este valor se calculó el ISBL mediante dos métodos: Factor de Hand y Factor detallado (Anexo J, tablas 17 y 18); posteriormente se realiza un promedio de entre los dos, considerando un rango de $\pm 30\%$ y se obtuvo un ISBL de \$306.171. Una vez estimado este costo se calcula el costo de inversión de capital fijo (\$486.812). En base a esto se consideran 10 escenarios, en los que se considera si hay financiamiento externo (20%-50%) o no, la cantidad de horas rentada al año, y variando el costo de renta por hora.

5.2 Evaluación económica del proyecto

En primera instancia se busca rentar a \$100/h la planta piloto, por un tiempo de 1920 horas anuales (8 horas diarias, 5 días a la semana por un año). Al hacerlo, se estima un tiempo de recuperación de 3 años (como se observa en la figura 11); con un VAN de \$200.831 y un TIR del 23%; esto indica que el proyecto genera un mayor valor presente neto; por lo que es financieramente atractivo; además, un TIR del 23% indica que el proyecto ofrece retornos sustanciales, ya que supera ampliamente el costo de oportunidad estimado del 10%. Por lo tanto, el proyecto es rentable.

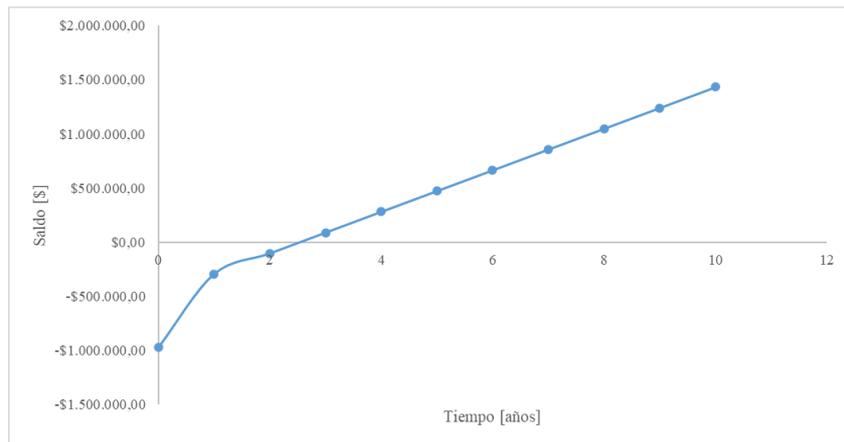


Figura 11. Diagrama de flujo de caja con un costo de renta de \$100/h

Por otro lado, en el caso de que se busque reducir el costo por hora de renta de la planta, se considera que debe ser mínimo de \$65/h, considerando que al año se la renta por 1920 horas. En este caso, la inversión se la recupera en 4 años, como se lo observa en el diagrama de flujo de la figura 12, con un VAN y un TIR de \$18.660 y 11% respectivamente. Con este valor de renta el proyecto sigue siendo rentable.

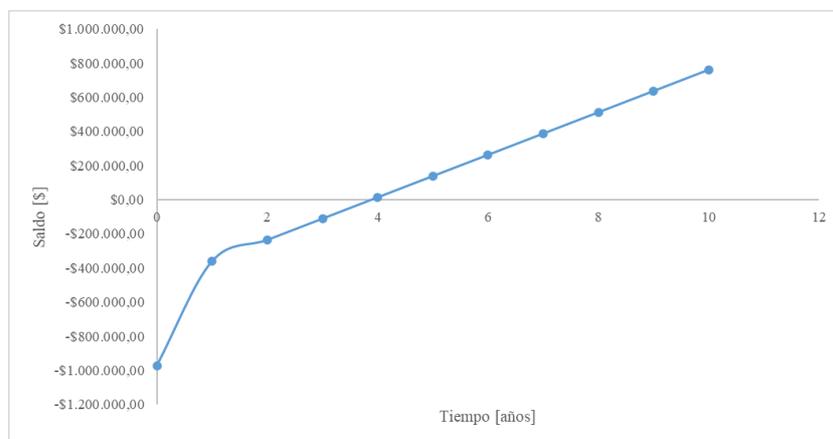


Figura 12. Diagrama de flujo con un costo de renta de \$65/h

Si se considera el escenario de que se renta la planta por \$65/h (lo mínimo para que sea rentable el proyecto), por un tiempo de 1920 horas anuales, con un financiamiento externo del 20-50%, se observa que los tiempos de recuperación de la inversión van de 2 a 4 años (como se observa en la figura 13), dependiendo del porcentaje de financiamiento de los equipos. En cualquiera de los casos mencionados, el proyecto resulta rentable; ya que el VAN varía de

\$178.488 a \$32.444 y el TIR de 35-13% (dependiendo del porcentaje de inversión; desde 50% hasta un 20% de inversión respectivamente). Por esta razón, en cualquiera de esos casos el proyecto resulta ser más que rentable.

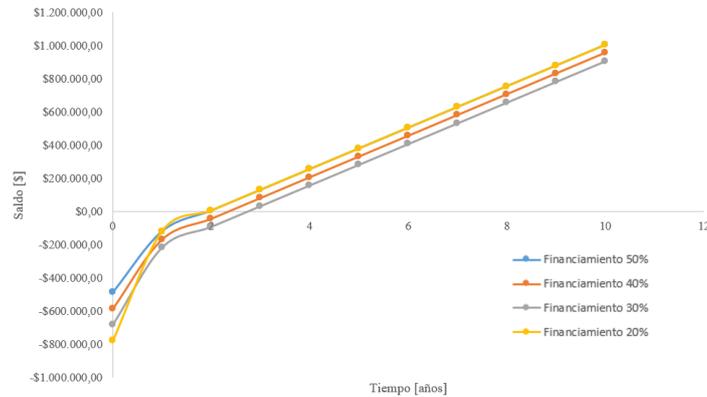


Figura 13. Diagrama de flujo con un costo de renta de \$65/h, por 1920h anuales y financiamiento del 20-50%

En cambio, si se considera un caso en el que la planta no se renta todo el año (1920 horas; sino solo 1000 horas al año), por el valor mínimo para que sea rentable (\$65/h), y considerando diferentes porcentajes de financiamiento (50-20%); se obtiene que se recupera la inversión inicial de 4 a 6 años dependiendo del porcentaje de financiamiento; como se observa en el diagrama de flujo de cada de la figura 14. En este caso, no en todas las opciones de financiamiento es rentable el proyecto; de manera que solo cuando existe un financiamiento del 50%, el proyecto es rentable, ya que generan un VAN y un TIR de \$16.379 y 12% respectivamente. En los otros casos (financiamiento de 20-40%) el proyecto generaría un TIR positivo, pero un VAN negativo; lo cual indica que se recupera la inversión; sin embargo, no sería rentable el proyecto.

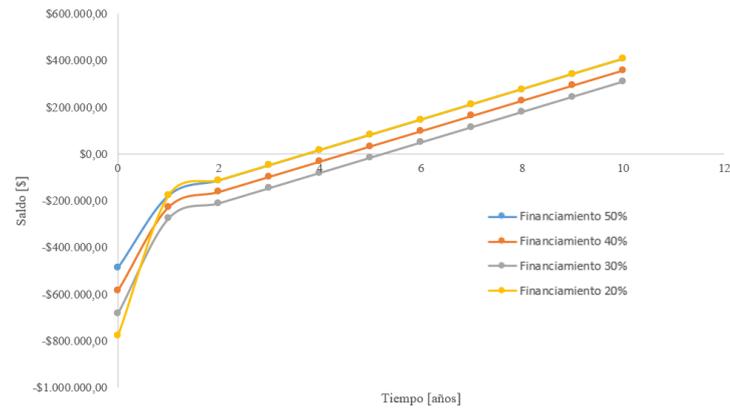


Figura 14. Diagrama de flujo con un costo de renta de \$65/h, por 1000h anuales y financiamiento del 20-50%

Existen varios escenarios en los que el proyecto es rentable; incluyendo escenarios en los que el costo por hora de renta de la planta es bajo, o que las horas de renta son inferiores, o incluso combinando ambos factores e incluyendo un financiamiento externo por parte de empresas privadas u ONG's.

5.3 Análisis de flexibilidad

Se puede considerar escenarios en los que la planta puede ser rentada a un profesor de la universidad; sin embargo, el profesor no estaría pagando por la renta; ya que pertenece a la USFQ, entonces se podría considerar que le corresponda un 10-15% a la USFQ de las ventas del producto manufacturado en la planta; generando así más ingresos. Adicionalmente, se puede buscar más inversionistas (internacionales) que estén dispuestos a financiar el proyecto, con el fin de beneficiar al campo investigador del Ecuador; ya que cualquier profesor, empresa o ajeno a la USFQ puede rentar la planta piloto modular.

Por último, se puede generar un ingreso extra, si se tiene la opción de proveer con la materia prima necesaria para trabajar en la planta piloto; claro que del costo total que tendría toda la materia prima, se cobraría un 10-20% adicional, para tener un ingreso significativo.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo destacan la importancia de las plantas piloto en el proceso de escalamiento de laboratorio a la industria, así como su relevancia en la educación y la innovación. La transición de procesos químicos desde el laboratorio hasta la planta industrial requiere una planificación meticulosa y una comprensión profunda de las interacciones y variaciones que se presentan a gran escala.

Asimismo, el diseño y la operación de plantas piloto enfrentan desafíos significativos, como la eficiencia en la transferencia de calor, el manejo de materiales y la adaptación de diseños de laboratorio a equipos de mayor escala. La implementación de estrategias adecuadas durante esta etapa permite mitigar riesgos operativos, mejorar la predictibilidad y optimizar el desempeño técnico y económico de los procesos en escalas mayores.

Por último, se determinó que la planta es rentable, considerando varios escenarios. Teniendo escenarios en los que se puede obtener un VAN y un TIR de \$178.488 y 35% respectivamente, cuando existe un financiamiento externo del 50% (y se renta la planta a \$100/h durante 1920h al año); así como un VAN y un TIR de \$18.660 y 11% respectivamente cuando el escenario no es nada favorable (cuando se renta la planta a \$65/h durante 1920h al año sin ningún tipo de financiamiento externo).

Es importante considerar la idea de buscar financiamiento externo por parte de organizaciones privadas o por ONG's; ya que esto potenciaría la viabilidad del proyecto, y abriría las puertas a grandes proyectos que incluso muchos profesores dentro de la universidad tienen en mente.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabi, A. O., Tampier, M., & Bibeau, E. (2009). Microalgae technologies and processes for biofuels/bioenergy production in British Columbia: Current technology, suitability, and barriers to implementation. *The British Columbia Innovation Council* .
- Arroyo, F., Fernández-Pereira, C., & Bermejo, P. (2015). *Demonstration plant equipment design and scale-up from pilot plant of a leaching and solvent extraction process*. *Minerals*, 5(2), 298-313. <https://doi.org/10.3390/min5020298>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Demirbaş, A. (2009). Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management*, 50(11), 2782-2801.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.035>
- Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160–177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
- García, J. A., & Sánchez, M. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel: una revisión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(1), 311-326. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.481>
- George, J., Kumar, R., & Joy, J. (2020). *Biopolymers and Their Industrial Applications*. Elsevier.
- Gertenbach, D., & Cooper, B. L. (2009). Scale-up Issues From Bench to Pilot. *AIChE National Meeting, Nashville*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267317344_Scale-up_Issues_From_Bench_to_Pilot

- Jirasek, F., Bamler, R., Fellenz, S., Bortz, M., Kloft, M., Mandt, S., & Hasse, H. (2022). Making Thermodynamic Models of Mixtures Predictive by Machine Learning: Matrix Completion of Pair Interactions. *arXiv preprint arXiv:2209.00605*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.00605>
- Julián-Ricardo, M. C., Baltá-García, J. G., Pérez-Sánchez, E. J., & Pérez-Sánchez, A. (2018). Simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto. *Afinidad*, 75(581).
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M. M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., & Emmerich, K. H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(5), 513–533.
<https://doi.org/10.1002/bbb.256>
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., & Crini, G. (2019). Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1667–1692. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00904-x>
- Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers: applications and trends*. William Andrew.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849772043>
- Otoni, C. G., Lodi, B. D., Lorevice, M. V., Leitão, R. C., Ferreira, M. D., Moura, M. R. de, & Mattoso, L. H. C. (2018). Optimized and scaled-up production of cellulose-reinforced biodegradable composite films made up of carrot processing waste. *Industrial Crops and Products*, 121, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.003>

- Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., & Som, C. (2016). *From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies*. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.164.
- Rodríguez Sepúlveda, L. J., & Orrego Alzate, C. E. (2016). Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos: revisión bibliográfica. *Revista Científica*, 25, 252-264.
- Roig Javierre, J. A. (2013). *Manual práctico para el diseño y cálculo de equipos de proceso para plantas industriales según el código ASME Sección VIII División 1*. Universidad de Zaragoza.
- Sahana, T. G., & Rekha, P. D. (2018). Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. *Molecular Biology Reports*, 45(6), 2857–2867.
<https://doi.org/10.1007/s11033-018-4296-3>
- Salazar Iribe, A., & Gamboa de Buen, A. (2013). Importancia de las pectinas en la dinámica de la pared celular durante el desarrollo vegetal. *Revista de Educación Bioquímica*, 32(2), 67-75. Recuperado de
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-19952013000200003
- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*, 47(9), 2281-2289.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026>
- Smith, R. (2016). *Chemical Process: Design and Integration* (2nd ed.). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119990130>
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1-11.

- Thanh, L. T., Okitsu, K., Maeda, Y., & Nishimura, R. (2012). Catalysis in biodiesel production using biomass-derived heterogeneous catalysts: A greener approach. *Energy Conversion and Management*, 64, 295–305.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.03.034>
- Vega, F., & Navarrete, B. (2019). Professional design of chemical plants based on problem-based learning on a pilot plant. *Education for Chemical Engineers*, 26, 30-34.
<https://doi.org/10.1016/j.ece.2018.08.001>
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M., & Dias, I. (2010). Biochar application to soils. *A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions*. EUR, 24099(162), 2183-2207.
- Wood-Black, F. (2014). Considerations for Scale-Up – Moving from the Bench to the Pilot Plant to Full Production. En M. K. Moore & E. B. Ledesma (Eds.), *Academia and Industrial Pilot Plant Operations and Safety* (pp. 37-46). American Chemical Society.
<https://doi.org/10.1021/bk-2014-1163.ch003>
- Zhang, M., & Gao, B. (2013). *Biochar Production, Characterization, and Applications*. In B. Gao & R. C. Brown (Eds.), *Biochar Technology* (pp. 1-14). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9475-4_1
- Zhao, X., Cheng, K., & Liu, D. (2009). Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82(5), 815-827.
<https://doi.org/10.1007/s00253-009-1883-1>

8. ANEXOS

ANEXO A: MATRIZ DE DECISIONES

Tabla 1. Matriz de decisiones

Criterios	Opciones			
	Alimentos (líquidos/bebidas)	Procesamiento de Biomasa	Farmacéutica	Alimentos (sólidos)
Costos	5	4	1	4
Complejidad	6	7	3	5
Regulaciones	3	8	1	5
Mercado	8	5	5	3
Materia prima	9	10	4	5
Ambiental	7	5	5	8
Total	38	39	19	30

Dónde 1 es lo más bajo (menos viable) y 10 lo más alto (muy viable); y los criterios engloban lo siguiente:

- Costos: Se estima que tan fuerte puede ser la inversión; considerando costos de los equipos, de instalación, de materia prima, etc. (1 sería muy costoso y 10 poco costoso)
- Complejidad: Implica que tan difícil puede llegar a ser todo el proceso, desde el diseño de la planta, la adquisición de equipos, material, y la puesta en marcha (1 es muy complejo y 10 es poco complejo)

Dependiendo el proceso, existen más o menos normas que se necesitan

- Regulaciones: cumplir antes y durante la puesta en marcha de la planta; por esta razón, 1 será cuando tenga muchas regulaciones y 10 cuando tenga pocas.

Se evaluará la acogida de los productos realizados en la planta; de manera que

- Mercado: 1 es cuando nadie compraría los productos realizados y 10 que todo el mundo lo compraría.

Aquí se evalúa la disponibilidad de materia prima, y la cantidad de la misma

(en el caso de necesitar importarla, los tiempos que tomaría hacerlo, etc.) Es un

- Materia prima: 1 cuando es muy baja la disponibilidad de materia prima, o muy largos los tiempos de importación, y un 10 cuando es al revés

Se evalúa los posibles impactos ambientales que pueden tener los productos o subproductos de la planta piloto; así como los impactos ambientales

- Ambiental: ocasionados durante la producción. También se considera cómo se trata los residuos de la producción. 1 es cuando el impacto ambiental es muy alto y 10 cuando es muy bajo.

Y:

- Alimentos (líquidos/bebidas): Esta opción incluye la elaboración de todo tipo de bebidas, con un mayor enfoque en las bebidas fermentadas tales como la chicha y el vinagre (de maduro).
- Procesamiento de biomasa: Se incluye procesos como producción de celulosa, de pellets de bio plástico, biodiesel a partir de aceites comestibles y no comestibles, extracción de pectinas, procesos de pirólisis, etc.
- Farmacéutica: Dentro de esta opción se abarca todo lo relacionado a productos farmacéuticos (pastillas, jarabes, etc.)

- Alimentos (sólidos): Se incluye procesos tales como recubrimientos a frutas, y producción de otro tipo de alimentos sólidos.

ANEXO B: TABLA DE MATERIAS PRIMAS

Tabla 2. Materias primas, costos, origen y proveedores para cada proceso

Materia prima	Consideraciones de seguridad, manejo y transporte	Origen	Proveedores	Costos	Función en la obtención del producto final
Producción de Biodiesel					
Aceite vegetal (de palma)	Evitar derrames; manipularlo con cuidado	Cultivos de palma en Esmeraldas, Santo Domingo, etc.	Oleorios S.A.	\$1.50 por cada litro	Proporciona aceite para la síntesis de biodiesel
Aceite Residual	Riesgo de inflamabilidad (mantenerlo lejos de fuentes de ignición)	Restaurantes e industrias alimentarias	Restaurantes de la zona	-	Proporciona aceite para la síntesis de biodiesel
Metanol	Inflamable (manipularlo lejos de fuentes de ignición)	Algún comercial químico	Bioalcoholes del Pacífico S.A.	\$1.50 a \$2.50 por litro	Para la reacción de transesterificación
Hidróxido de sodio	Manipularlo cuidadosamente (debido a su corrosividad y reactividad)	Algún comercial químico	DISQUIMSA	\$1.20 - \$2.50 por kg.	Catalizador para la reacción y para neutralizar el aceite usado
Agua	- N/A	Suministro local	Suministro local	\$0.38 por m ³ .	Para el lavado, y desgomado del aceite usado
Producción y extracción de Celulosa y Biopolímeros					
Almidón de maíz	Hay que mantenerlo seco para evitar que se aglomere	Cultivos de maíz	Quim-Daz	\$1.10 por kilo	Materia prima para bioplásticos
Cáscaras de cítricos	- N/A	Industria alimentaria (jugos)	Empresas procesadoras de jugos de cítricos (TropicalFruit S.A.)	-	Fuentes de pectinas

Piel de banano	Almacenarlo en un lugar seco	Industria bananera	Empresas exportadoras (Dole Ecuador)	-	Fuente de pectinas
Cáscara de camarón	Riesgo de descomposición (mantenerse en refrigeración)	Industria pesquera/Alimentaria	Procesadoras de camarón (Omarsa S.A. - Songa S.A)	-	Fuente de quitosanos
Bagazo de caña de azúcar	Material seco (evitar humedad)	Industria azucarera	De los residuos generados en sectores agrícolas en Guayas, Los Ríos, y Cañar.	-	Fuente de celulosa para procesos de bioplásticos.
Cloro	Volátil, produce irritación en la piel, nariz, y ojos al contacto. Requiere un manejo cauteloso.	Algún comercial químico	AseptiClab	\$1.00 por litro	Para extraer biopolímeros en la última etapa.
Ácido sulfúrico	Requiere un manejo cuidadoso y equipo de protección adecuado para prevenir accidentes graves, debido a su naturaleza altamente corrosiva y reactiva.	Algún comercial químico	DISQUIMSA	\$1.00 - \$1.50 por litro	Para la extracción de biopolímeros (romper lignina)
Hidróxido de sodio	Manipularlo cuidadosamente (debido a su corrosividad y reactividad)	Algún comercial químico	DISQUIMSA	\$1.20 - \$2.50 por kg	Para la extracción de biopolímeros (romper hemicelulosa) y desacetilación de la quitina para obtener quitosano

Peróxido de hidrógeno	Manejarse con cuidado (fuerte oxidante) para evitar su descomposición, incendios y quemaduras, usando equipo adecuado y manteniendo el producto alejado de materiales combustibles.	Algún comercial químico	DISQUIMSA	\$2.50 por litro	Para blanquear y purificar la celulosa
Agua	• N/A	Suministro local	Suministro local	\$0.38 por m ³ .	Para el lavado en todo el proceso
Producción de Biochar e hidrochar					
Cascarilla de arroz	Mantenerlo en un lugar ventilado	Industria arrocerera	De los residuos generados en sectores agrícolas en Los Ríos, Loja, Manabí, etc.	-	Materia prima para generar biochar
Bagazo de caña de azúcar	Material seco (evitar humedad)	Industria azucarera	De los residuos generados en sectores agrícolas en Guayas, Los Ríos, y Cañar.	-	Materia prima para generar biochar
Rastrojos de maíz	Material seco (evitar humedad)	Industria agrícola	De los residuos generados en sectores agrícolas en Guayas, Los Ríos, y Cañar.	-	Materia prima para generar biochar

Cáscara de cacao	Evitar exceso de humedad para prevenir moho. El transporte debe ser en contenedores sellados.	Industria agrícola	De los residuos generados en sectores agrícolas en Guayas, El Oro y Los Ríos.	-	Materia prima para generar biochar
Cáscara de banano	Transporte en contenedores sellados, para evitar la rápida descomposición y malos olores.	Industria agrícola	De los residuos generados en sectores agrícolas en Los Ríos, Guayas y Manabí.	-	Materia prima para generar biochar
Cáscara de café	Uso de mascarillas, para evitar inhalación de polvos, y transportarlas en contenedores ventilados.	Industria agrícola	De los residuos generados en sectores agrícolas en Manabí, Loja y El Oro.	-	Materia prima para generar biochar
Nitrógeno	Uso de equipos de protección personal, monitoreo constante de oxígeno, una adecuada ventilación y evitar golpes o calor.	Ecuador	Agrigenetic	\$2,80 por kg	Gas necesario para combustionar en ausencia de oxígeno para producir biochar
Agua	<ul style="list-style-type: none"> N/A 	Suministro local	Suministro local	\$0.38 por m ³ .	Para la carbonización hidrotermal

ANEXO C: TABLA DE SELECCIÓN DE EQUIPOS

Tabla 3. Selección de equipos para la planta piloto de escalamiento modular

Equipo	Razón
Producción de Biochar	
Molino de martillos	Debido a la cantidad de humedad y a la fibrosidad de la biomasa.
Secador de lecho fluidizado	Adecuado para contenido de humedad moderado y alto, y para partículas finas y uniforme. (Alta eficiencia)
Reactor de pirólisis	Es el indicado para lograr la pirólisis.
Producción de Hidrochar	
Molino de martillos	Debido a la cantidad de humedad y a la fibrosidad de la biomasa.
Reactor hidrotérmico de alta presión.	Permite operar en rangos de temperatura entre 180°C y 250°C y presiones elevadas (10-20 bar).
Filtro de prensa	Permite una separación más precisa; además de que maneja sólido con altos contenido de humedad.
Secador de lecho fluidizado	Adecuado para contenido de humedad moderado y alto, y para partículas finas y uniforme. (Alta eficiencia)
Producción de Biodiesel	
Filtro de prensa	Ideal para separar partículas finas en grandes volúmenes de aceite, debido a su alta eficiencia y capacidad de manejo de grandes caudales.
Mezclador (tanque agitado)	Ideal para este tipo de procesos, ya que asegura una mezcla homogénea de líquidos con diferentes densidades y viscosidades. Además, proporciona un control preciso de la temperatura y el tiempo de residencia.
Reactor batch	Adecuado porque se necesita flexibilidad en la operación (ya que es para una planta piloto); si fuera un proceso continuo el reactor de flujo pistón es el adecuado.

Columna de separación líquido-líquido	Adecuada para la separación del biodiesel de productos secundarios en la misma fase
Columna de destilación 1	Puede procesar un lote a la vez, controlando la temperatura y la presión para evitar la degradación del biodiesel
Columna de destilación 2 (purificación)	Debido a su alta capacidad de retención de partículas y su fácil mantenimiento.
Producción / Extracción de celulosa	
Molino de martillos	Eficiente para reducir el tamaño de partículas de la biomasa y tener una mejor superficie de contacto para las siguientes etapas.
Tanque de mezclado	Para el lavado, tratamiento básico, con cloro y blanqueamiento
Reactor CSTR	Para realizar la hidrólisis ácida y tener una buena eficiencia en la separación de la lignina.
Secador de lecho fluidizado	Adecuado para contenido de humedad moderado y alto, y para partículas finas y uniforme. (Alta eficiencia)

**ANEXO D: METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES A REALIZAR CON CADA
OBJETIVO**

Tabla 4. Objetivo general, específicos, actividades y metodología correspondiente para cada uno.

Objetivo general	Objetivos específicos	Actividades	Metodología
Diseñar una planta piloto en la Universidad San Francisco de Quito para el escalamiento de procesos de transformación de biomasa lignocelulósica para la producción de, biopolímeros, biodiésel, biochar e hidrochar.	Analizar los tipos de procesos y tecnologías disponibles para la transformación de biomasa lignocelulósica	<ul style="list-style-type: none"> -Realizar entrevistas a los diferentes docentes de la USFQ de diferentes áreas del politécnico. -Realizar una tabla de decisiones para determinar el/los procesos más viables para implementarlos en la planta piloto (ANEXO A) 	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar una encuesta con preguntas estándar para cada docente interrogado. - Preguntar a cada profesor la encuesta realizada y elaborar una tabla de decisiones. - Determinar en base a los criterios de la tabla de decisiones cuáles son los procesos más viables para realizarse en la planta piloto.
	Diseñar el layout de la planta piloto identificando los equipos y sistemas necesarios a partir de balances de masa para los diferentes productos	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar un diagrama de bloques para cada proceso elegido. - Corroborar que los diagramas de bloque estén correctos con los diferentes profesores del área pertinente. - Investigar y elegir una base de cálculo (lo que se espera producir en cada proceso), en base a ello 	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboración de los diagramas de bloque de cada proceso con el software Visio. - Validar cada diagrama de bloque con los docentes expertos en cada tema - Buscar, y determinar el caudal de producción de cada proceso basado en la literatura de procesos de escalamiento similares

		realizar un balance de masa inverso para determinar la materia prima necesaria en cada proceso.	- Elaborar el balance de masa de cada proceso en base al caudal de producción determinado
	Dimensionar los equipos seleccionados para la planta determinando su ubicación en la misma	<ul style="list-style-type: none"> - Simular cada proceso y determinar la dimensión de cada equipo. - Determinar la ubicación y disposición de cada equipo dentro de la planta. 	- Usar Aspen Plus para simular cada proceso y obtener las dimensiones de los equipos.
	Realizar un análisis de prefactibilidad técnica y económica, considerando costos de inversión, operación y mantenimiento, además de posibles fuentes de financiamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Investigar los precios de cada equipo y junto a los precios de las materias primas determinar los costos que tendrá el proyecto. - Determinar el tiempo de recuperación de la inversión. - Determinar la viabilidad del proyecto en base al VAN y TIR. 	<ul style="list-style-type: none"> - Buscar en distribuidores de equipos (tales como Alibaba) los equipos requeridos con las dimensiones calculadas. - Calcular los costos ISBL y OSBL. - Realizar el diagrama de flujo de caja. - Calcular el VAN y el TIR. - Determinarla viabilidad de la planta piloto.

ANEXO E: RESUMEN DE CAUDALES DE PRODUCCIÓN Y MATERIA PRIMA NECESARIA PARA CADA PROCESO

Tabla 5. Caudales de producción y de biomasa para cada proceso

Producto	Biochar	Hidrochar	Biodiesel	Celulosa
Materia prima necesaria	12.35 (kg/h)	2.53 (kg/h)	231.35 L/días	99.04 kg/h
Caudal de producción	1.5 (kg/h)	1.5 (kg/h)	150 L/días	20 kg/h

ANEXO F: BALANCES DE MASA PARA CADA PROCESO

Tabla 6. Balance de masa de la producción del Biochar

Caudal de producción			1.5		kg/h
Etapa	Entrada [kg/h]	Corriente	Salida [kg/h]	Corriente	Consideraciones
Secado	12.35	Biomasa húmeda	6.17	Biomasa seca	La humedad pasa del 50% al 10%
			4.94	Vapor de agua	
Molienda	6.17	Biomasa seca	5.56	Biomasa triturada	eficiencia del 90%
Pirólisis	5.56	Biomasa seca	1.50	Biochar	eficiencia del 90%
			0.56	Bio-oil	
	8.00	Nitrógeno	3.33	Gases producidos	CO ₂ , CO y H ₂

Tabla 7. Balance de masa de la producción del Hidrochar

Caudal de producción			1.5		kg/h
Etapa	Entrada [kg/h]	Corriente	Salida [kg/h]	Corriente	Consideraciones
Secado	3.00	Hidrochar húmedo	1.50	Hidrochar seco	Fracción húmeda del 50%
			1.50	Vapor de agua	
Separación sólido-líquido	15.00	Hidrochar + líquido acuoso	3.00	Hidrochar húmedo	Agua de entrada en radio 6:1
			12.00	Agua residual	
HTC	2.50	Biomasa triturada	15.00	Hidrochar + líquido acuoso	Rendimiento 60%
			0.25	Gases	~10% de HTC se hace gas
	15.00	Agua	2.25	Vapor de agua	

Molienda	2.53	Biomasa cruda	2.50	Biomasa triturada	Pérdida del 1%
----------	------	------------------	------	-------------------	----------------

Tabla 8. Balance de masa de la producción y extracción de biopolímeros

Caudal de producción			20		kg/h
Etapa	Entrada [kg/h]	Corriente	Salida [kg/h]	Corriente	Consideraciones
Molienda	44.02	Biomasa húmeda	39.61	Biomasa triturada	Todos los equipos tienen una eficiencia del 90%. 40% de la biomasa es celulosa, mientras que un 30% lignina
Lavado	39.61	Biomasa triturada	35.65	Biomasa lavada	El agua se lleva una gran parte de residuos que vienen con la biomasa
	4.00	Agua caliente	3.96	Agua residual	Agua a 40°C
Hidrólisis ácida	35.65	Biomasa lavada	32.09	Biomasa tratada 1	Se elimina el 50% de lignina de la biomasa. La cantidad de solución ácida:biomasa es 15:1
			6.60	Lignina Residual 1	
	106.96	Ácido sulfúrico 5%		Ácido sulfúrico usado	
Tratamiento básico	32.09	Biomasa tratada 1	28.88	Biomasa tratada 2	Proporción 20:1 de solución de NaOH:Biomasa.
			5.28	Lignina Residual 2	
	32.09	Hidróxido de sodio (5%)		Hidróxido de sodio usado	
	28.88	Biomasa tratada 2	25.99	Biopolímero	Se emplea 50:1 de agua:cloro

Tratamiento con cloro			1.32	Lignina Residual 3	
	72.20	Cloro (2%)		Cloro residual	
Blanqueado y Lavado	25.99	Biopolímero	23.39	Biopolímero purificado	Se emplea 10:1 de agua:peróxido de hidrógeno
	13.00	Peróxido de hidrógeno (10%)			
Secado	23.39	Biopolímero purificado	21.05	Biopolímero seco	
			2.34	Vapor de agua	

Tabla 9. Balance de masa de la producción de Biodiesel

Caudal de producción			150		L/día
Etapa	Entrada [L/día]	Corriente	Salida [L/día]	Corriente	Consideraciones
Filtrado final	150.00	Biodiesel sin agua	150.00	Biodiesel filtrado	-
Secado	152.28	Biodiesel filtrado	150.00	Biodiesel sin agua	Se considera una pérdida del 1.5%
			2.28	Evaporación	
Lavado	155.39	Biodiesel	152.28	Biodiesel lavado	Se considera una pérdida del 2%
	30.00	Agua de lavado	33.11	Agua residual	
Separación	172.66	Biodiesel + glicerina	155.39	Biodiesel	La glicerina será el 10% de la mezcla total
			17.27	Glicerina	
Transesterificación	191.84	Mezcla de aceite	172.66	Biodiesel + glicerina	-
Mezcla	1.92	Catalizador	191.84	Mezcla de aceite	Eficiencia del 90%
	31.83	Metanol			Catalizador es 1% del volumen del aceite
	225.59	Aceite neutralizado			
Neutralización	230.20	Aceite filtrado	225.59	Aceite neutralizado	Eficiencia del 98%

	1.73	Base	4.60	Jabón residual	Bajo residual 2% del aceite
Filtración	231.35	Aceite usado	230.20	Aceite filtrado	Se asume pérdida del 0.5%

ANEXO G: DIMENSIONAMIENTO EQUIPOS PLANTA

Tabla 10. Dimensionamiento inicial y consideraciones para cada equipo seleccionado

Equipo	Volumen (L)	Consideraciones calculo volumen	Alto (cm)	Radio (cm)	Grosor de las paredes	Material	Consideraciones para las dimensiones
Molino de martillo	0.75	Considerando un tiempo de residencia de 5 min y una densidad de 0.7 kg/L (porque tiene 50% humedad)	15.63	3.91	5 mm	Acero inoxidable	Para facilitar la disposición de los martillos asumimos una relación 2:1 altura:diámetro ($h=2d$)
Secador de lecho fluidizado	7.70	Considerando un tiempo de residencia de 15 min y una densidad de 0.4 kg/L de la biomasa (porque tiene 10% humedad)	44.52	7.42	5 mm	Acero inoxidable	Se asume una forma de cilíndrica. Velocidad mínima de fluidización de 0,3 m/s. Relación 3:1 de altura:diámetro ($h=3d$)
Reactor de pirólisis	10.43	Con un tiempo de residencia de 45 min (0,75h) y una densidad de 0.4 kg/L.	37.59	9.40	5 mm	Acero inoxidable	Se asume una forma de cilíndrica. Se emplea una relación de altura=2*diámetro.
Molino de martillos	0.75	Considerando un tiempo de residencia de 5 min y una densidad de 0.7 kg/L (porque tiene 50% humedad)	15.63	3.91	5 mm	Acero inoxidable	Para facilitar la disposición de los martillos asumimos una relación 2:1 altura:diámetro ($h=2d$). Se emplean los mismos valores que en los calculados en el biochar (porque son mayores)

Reactor hidrotérmico de alta presión.	16.41	Considerando una densidad de la mezcla de 0.8 kg/h y un tiempo de residencia de 45 minutos	57.29	9.55	12 mm	Acero inoxidable	Se asume una relación 1:3 de altura:diámetro; ya que es adecuado para reactores de alta presión para mantener estabilidad y minimizar el riesgo de deformación bajo presión.
Filtro de prensa	3.13	Considerando una densidad de la mezcla de 0.8 kg/h y un tiempo de residencia de 10 minutos	25.17	6.29	5 mm	Acero inoxidable	Se asume relación 2:1 de diámetro:altura. Es una relación adecuada para filtros de pequeña capacidad
Secador de lecho fluidizado	7.70	Considerando un tiempo de residencia de 15 min y una densidad de 0.4 kg/L de la biomasa (porque tiene 10% humedad)	44.52	7.42	5 mm	Acero inoxidable	Se asume una forma de cilíndrica. Velocidad mínima de fluidización de 0,3 m/s. Relación 3:1 de altura:diámetro ($h=3d$). Se emplean los mismos valores que en los calculados en el biochar (porque son mayores)
Filtro de prensa	60.00	Consideramos un tiempo de operación de 8 horas diarias, ciclo de operación de 1 hora, volumen del fultro prensa por ciclo de 3 L/ciclo. Area total de filtracion de 3m2. Placas de	1.00	1.5m Longitud	5 mm	Acero inoxidable	Espesor del pastel de filtracion de 2cm. Flujo de entrada según el balance de masa realizado.

		50cmx50cm y 12 placas					
Mezclador (tanque agitado)	14.00	Se considera el flujo de entrada el mixer especificado en los balances de masa, las densidades promedio de los compuestos y la relacion aceite-metanol de 4:1. Relacion H/D de 1.5.	34.00	11.50	5 mm	Acero inoxidable	Se asume una velocidad de agitacion de 200 rpm debido a la baja viscosidad.
Reactor batch	90.74	Se considera un sobredimensionamiento del 15% sobre la cantidad de materia procesada. Tiempo de residencia de 30 minutos y flujo de entrada de 3.024 L/min	60.00	21.94	5 mm	Acero inoxidable	Se asume una forma cilíndrica de base circular, la relación altura base es de 3:1 aproximadamente
Columna de separación liquido-liquido	68.06	Tomamos las propiedades de los fluidos a 60C. Tiempo de residencia de 5 minutos, diferencia de densidades de 390 kg/m ³ . La velocidad superficial es de 9.5mm/s. Se incluyen	1.14	10.00	4 mm	Acero inoxidable	Se incluye un margen adicional para corrosión y desgaste de 1mm. Se ajusto la altura de la columna con internals de coalescedores de malla metalica para la coalescencia rapida de gotas pequeñas.

		internals para disminuir la altura, aumenta la eficiencia al promover la coalescencia de gotas					
Columna de destilacion 1	18.56	Tomamos en cuenta un nuevo tray space entre platos debido a que los flujos que trata la columna son pequeños. Tray spacing de 15cm	1.05	7.50	5 mm	Acero inoxidable	El diametro asi como el tray spacing fueron modificados de los valores estandar dados por Aspen debido a que se trabaja con flujos pequeños. Se condieraron 2 mm adicionales a la pared de la columna debido al desgaste de la corrosion
Columna de destilacion 2 (purificacion)	30.18	Tomamos en cuenta un nuevo tray space entre platos debido a que los flujos que trata la columna son pequeños. Tray spacing de 15cm	1.80	7.50	5 mm	Acero inoxidable	El diametro asi como el tray spacing fueron modificados de los valores estandar dados por Aspen debido a que se trabaja con flujos pequeños. Se condieraron 2 mm adicionales a la pared de la columna debido al desgaste de la corrosion

Molino de martillos	7.34	Se supone una densidad de biomasa de 0.5 kg/L y un tiempo de retención de 5 minutos	33.44	8.36	5 mm	Acero inoxidable	Para facilitar la disposición de los martillos asumimos una relación 2:1 altura:diámetro ($h=2d$)
Tanque de mezclado	21.25	Se asume la densidad de la mezcla de 0.8 kg/h y un tiempo de retención de 10 minutos	47.66	11.91	5 mm	Acero inoxidable	Relación 1:2 de altura:diámetro ($h=2d$).
Reactor CSTR	136.55	Se asume la densidad de la mezcla de 0.8 kg/h y un tiempo de retención de 45 minutos	88.60	22.15	10 mm	Acero inoxidable	Relación 1:2 de altura:diámetro ($h=2d$).
Secador de lecho fluidizado	19.50	Se asume una densidad de la biomasa de 0.4 y un tiempo de retención de 20 minutos	46.31	11.58	5 mm	Acero inoxidable	Se asume una forma de cilíndrica. Se emplea una relación de altura= $2*$ diámetro.

Tabla 11. Dimensionamiento final cada equipo seleccionado (sobredimensionado)

Equipo	Volumen corregido (L) (Volumen *1,2)	Alto (cm)	Radio (cm)
Molino de martillo	0.90	16.61	4.15
Secador de lecho fluidizado	9.24	47.31	7.88
Reactor de pirólisis	12.52	39.95	9.99

Molino de martillos	0.90	16.61	4.15
Reactor hidrotérmico de alta presión.	19.69	60.88	10.15
Filtro de prensa	3.76	26.74	6.69
Secador de lecho fluidizado	9.24	47.31	7.88
Filtro de prensa	72.00	120.00	180.00
Mezclador (tanque agitado)	16.80	36.00	12.20
Reactor batch	108.89	63.80	23.30
Columna de separación líquido-líquido	81.67	114.00	5.00
Columna de destilación 1	22.27	105.00	7.50
Columna de destilación 2 (purificación)	36.22	180.00	7.50
Molino de martillos	8.81	35.53	8.88
Tanque de mezclado	25.50	50.64	12.66
Reactor CSTR	163.86	94.15	23.54

Secador de lecho fluidizado	23.40	49.21	12.30
--	-------	-------	-------

ANEXO H: LAYOUT DE LA PLANTA

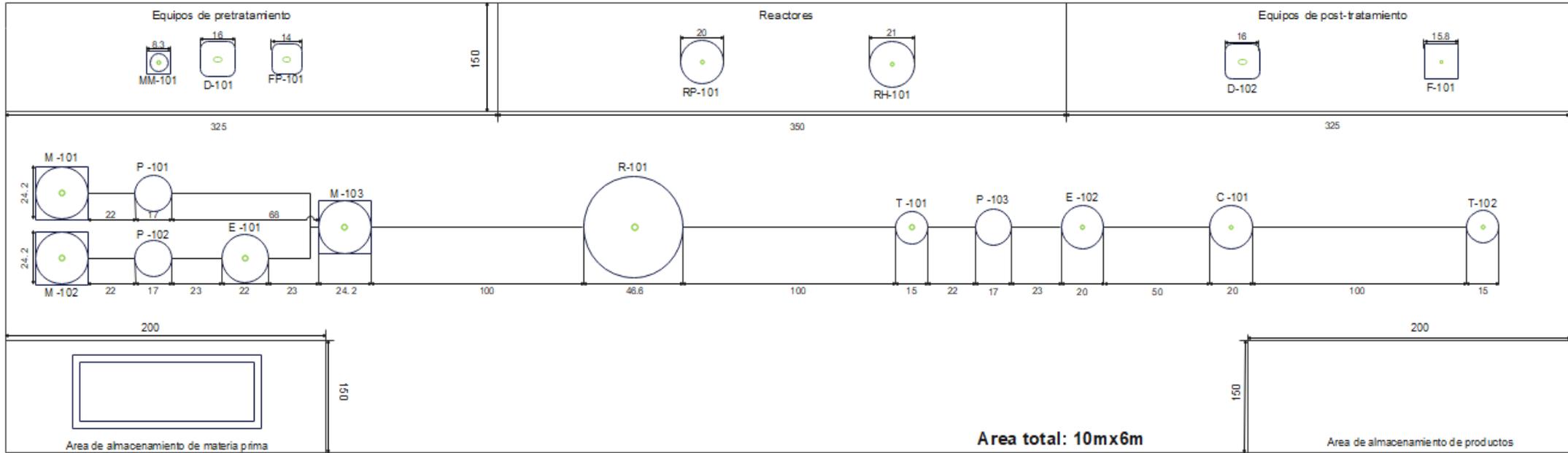


Figura 1. Layout de la planta enfocada en la línea de producción de biodiésel

ANEXO I: ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LA PLANTA

Para realizar el análisis FMEA se consideran los siguientes procesos:

1. Trituración
2. Secado
3. Carbonización hidrotermal
4. Filtración

Tabla 12. Análisis FMEA para la producción de Hydrochar

Etapa	Modo de falla	Efecto de falla	Causas de la falla	Severidad (S)	Probabilidad de Ocurrencia (O)	Detectabilidad (D)	RP N	Acciones recomendadas
Carbonización hidrotermal	Explosión durante la carbonización hidrotermal	Mal control de temperatura y/o presión	Lesiones al personal y daños materiales	7	4	4	112	Mantener controles de Temperatura y presión
Secado	Secado incompleto	Obstrucción en el flujo de aire	Reducción en la eficiencia del proceso	4	4	1	16	Verificar el flujo de aire a la entrada
Trituración	Trituración deficiente	Residuos anteriores u obstrucciones	Menor rendimiento del proceso	1	7	4	28	Verificar posibles residuos generados con anterioridad
Filtración	Atascos en la filtración	Exceso de masa en el filtro	Saturación y detención del proceso	4	3	3	36	Gestionar cambios de filtro

								más seguidos
--	--	--	--	--	--	--	--	--------------

En base a este análisis se observa como la carbonización hidrotermal requieren de un mayor análisis; ya que existe un mayor índice de prioridad de riesgo (RPN) en esta etapa. Por esta razón se realiza un análisis Hazop sobre esta etapa.

Tabla 13. Análisis FMEA para la producción de biodiesel

Etapa	Modo de falla	Efecto de falla	Causas de la falla	Severidad (S)	Probabilidad de Ocurrencia (O)	Detectabilidad (D)	NP R	Acciones Recomendadas	NPR Total
Pretratamiento	Mezcla incompleta de reactivos	Reacción ineficiente, baja conversión	Mal funcionamiento de la mezcladora	1	4	4	16	Verificar mantenimiento del equipo	24
	Contaminación en los reactivos	Baja calidad del biodiesel	Almacenamiento incorrecto de los reactivos	1	1	1	1	Inspeccionar condiciones de almacenamiento	
	Fallo en el bombeo de aceite	Interrupción del proceso	Obstrucción o falla en la bomba	7	1	1	7	Monitorear y limpiar regularmente	
Transesterificación	Catalizador insuficiente	Baja tasa de reacción, ineficiencia del proceso	Error en la dosificación del catalizador	4	1	4	16	Verificar la dosificación y ajustar parámetros	58

	Presión fuera de rango	Riesgo de fuga o explosión	Mal diseño o fallo en la válvula de presión	10	1	1	10	Inspeccionar válvulas y realizar mantenimiento preventivo	
	Temperatura fuera de rango	Conversión incompleta, formación de subproductos indeseados	Mal funcionamiento del control de temperatura	4	1	1	4	Revisar sensores y sistemas de control de temperatura	
	Formación de emulsiones	Dificultad en la separación de fases posteriores	Exceso de agitación o mezcla inadecuada	7	1	4	28	Ajustar parámetros de agitación y tiempos de reacción	
Separación de fases	Separación incompleta de fases	Biodiesel contaminado con glicerina y catalizador	Tiempo de separación insuficiente	4	1	4	16	Ajustar tiempos de operación y monitorear eficiencia	43
	Exceso de emulsiones	Dificultad para separar biodiesel de glicerina	Formación de emulsiones en la reacción	4	1	4	16	Mejorar el control de agitación en la etapa previa	
	Temperatura fuera de rango	Baja eficiencia en la separación de fases	Falta de control en la temperatura	4	1	1	4	Monitorear y ajustar el sistema de control de temperatura	

	Obstrucción en el equipo	Interrupción del proceso	Acumulación de sólidos o suciedad	7	1	1	7	Realizar limpieza regular y verificar filtros	
Lavado	Contaminación cruzada	Reducción de la calidad del biodiesel	Agua contaminada o sistema sucio	1	1	4	4	Realizar limpieza regular y utilizar agua de alta pureza	8
	Fallo en la eliminación del agua residual	Presencia de agua en el biodiesel final	Ineficiencia en la etapa de secado posterior	4	1	1	4	Revisar el sistema de separación de agua antes del secado	
Purificación	Trazas de metanol en el biodiesel final	Riesgo de inflamabilidad y toxicidad	Fallo en el sistema de recuperación	7	1	4	28	Inspeccionar regularmente el sistema de recuperación	51
	Pérdidas de biodiesel durante la purificación	Reducción del rendimiento general	Ineficiencia en el diseño de la columna	4	4	1	16	Revisar y ajustar el diseño del sistema	
	Presencia de contaminantes sólidos	Daño a equipos y biodiesel de baja calidad	Filtros obstruidos o inadecuados	7	1	1	7	Realizar mantenimiento periódico de los filtros	

Tabla 14. Análisis HAZOP de la etapa de transesteficación de biodiesel

Parámetro	Palabra guía	Causa	Consecuencia	Acción
Temperatura	Más	Fallo en el control del calentador	Formación de subproductos, baja eficiencia de reacción	Implementar alarmas de alta temperatura, revisar sensores
	Menos	Calentador defectuoso o insuficiente	Reacción incompleta, baja conversión	Realizar mantenimiento preventivo del sistema de calefacción
	Sin control	Fallo en el sistema de monitoreo	Riesgo de daño al reactor	Instalar sistema de control redundante
Presión	Más	Válvula de seguridad defectuosa	Riesgo de explosión	Inspeccionar válvulas de alivio periódicamente
	Menos	Fuga en líneas o en el reactor	Baja eficiencia en la mezcla	Revisar conexiones y realizar pruebas de fugas

	Sin control	Fallo en el sistema de monitoreo	Riesgo de sobrepresión o subpresión	Implementar monitoreo continuo con alarmas
Flujo de reactivos	Más	Bombas o válvulas mal calibradas	Mezcla incorrecta, exceso de reactivos	Calibrar las bombas y válvulas periódicamente
	Menos	Obstrucción en las líneas	Reacción incompleta, falta de reactivos	Inspeccionar y limpiar las líneas regularmente
	Sin flujo	Falla en las bombas	Interrupción del proceso	Verificar funcionamiento de las bombas antes del proceso
Agitación	Más	Velocidad excesiva en el agitador	Formación de emulsiones	Regular la velocidad del agitador
	Menos	Velocidad insuficiente	Reacción incompleta, mezcla ineficiente	Verificar la configuración del agitador
	Sin agitación	Fallo en el agitador	Sedimentación de reactivos, baja eficiencia	Realizar mantenimiento preventivo del

				sistema de agitación
--	--	--	--	----------------------

Tabla 15. Análisis Hazop de la carbonización hidrotermal

Parámetro	Palabra guía	Desviación	Causa	Consecuencia	Acción
Reactor de HTC	Más	Aumento de presión	Exceso de calor. Válvula cerrada	Explosión del reactor	Instalar válvula de alivio, diseño reforzado para alta presión.
Reactor de HTC	Más	Aumento de temperatura	Fallo en el sistema de control de calentador	Degradación de productos, riesgo de explosión	Incorporar control automático redundante.
Entrada al reactor	Otro que	Sobrellenado del reactor	Fallo en el operador	Reducción de la eficiencia del HTC	Incorporar un sensor con una alarma
Salida del reactor	Otro que	Flujo con alta temperatura	Poco enfriamiento	Quemaduras	Implementar un sistema de enfriamiento

ANEXO J: ANÁLISIS ECONÓMICO

Tabla 16. Costo de los equipos

Equipos	Volumen [L]	Cantidad	Costo aprox, equipo [€]	Total
Molino de martillos	8.81	1	\$2.000,00	\$2.000,00
Secador de lecho fluidizado	9.24	1	\$6.000,00	\$6.000,00
Reactor de pirólisis	12.52	1	\$7.500,00	\$7.500,00
Reactor HTC	19.69	1	\$8.000,00	\$8.000,00
Filtro de prensa	72.000	1	\$2.000,00	\$2.000,00
Tanque de mezclado	25.5	1	\$3.500,00	\$3.500,00
Reactor CSTR	163.86	1	\$17.500,00	\$17.500,00
Reactor batch	108.89	1	\$15.000,00	\$15.000,00
Columna separación	81.67	1	\$10.000,00	\$10.000,00
Columna destilación 1	22.27	1	\$7.500,00	\$7.500,00
Columna destilación 2	36.22	1	\$8.000,00	\$8.000,00
Total Ce				\$87.000,00

Tabla 17. Costo ISBL calculado por el método de Hand

Equipo	Cantidad	Costo equipo [€]	Factor de Hand	Costo total [€]
Molino de martillos	1	\$2.000,00	4	\$8.000,00
Secador de lecho fluidizado	1	\$6.000,00	4	\$24.000,00
Reactor de pirólisis	1	\$7.500,00	4	\$30.000,00
Reactor HTC	1	\$8.000,00	4	\$32.000,00
Filtro de prensa	1	\$2.000,00	2,5	\$5.000,00
Tanque de mezclado	1	\$3.500,00	2,5	\$8.750,00
Reactor CSTR	1	\$17.500,00	4	\$70.000,00
Reactor batch	1	\$15.000,00	4	\$60.000,00
Columna separación	1	\$10.000,00	4	\$40.000,00
Columna destilación 1	1	\$7.500,00	4	\$30.000,00
Columna destilación 2	1	\$8.000,00	4	\$32.000,00
Costo ISBL Hand				\$339.750,00

Tabla 18. Costo ISBL calculado por el método de Factor detallado

Equipo	Cantidad	Costo equipo [\$]	f_m	f_p	f_{er}	f_i	f_c	f_s	f_l	OS	D&E	X	C _e Total [\$]
Molino de martillos	1	2000	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	6560
Secador de lecho fluidizado	1	6000	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	19680
Reactor de pirólisis	1	7500	1.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	20700
Reactor HTC	1	8000	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	26240
Filtro de prensa	1	2000	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	6560
Tanque de mezclado	1	3500	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	11480
Reactor CSTR	1	17500	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	57400
Reactor batch	1	15000	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.25	0.1	49200
Columna separación	1	10000	1.3	0.8	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	35400
Columna destilación 1	1	7500	1.3	0.8	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	26550
Columna destilación 2	1	8000	1.3	0.8	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	28320
Costo ISBL Detallado													\$288.090

Tabla 19. Costo de los empleados

Descripción Trabajadores	Cantidad	Sueldo	Total
Administrativos	1	\$600,00	\$600,00
Prácticas profesionales	2	\$0,00	\$0,00
Planta	2	\$460,00	\$920,00
Total costos empleados			\$1.520,00

Tabla 20. Flujo de caja cuando se renta a \$100/h por 1920 h al año

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$486.811,89	-\$486.811,8	-\$973.623,78
1	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$192.000	\$192.000	-\$294.812
2	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$170.502	\$384.000	-\$102.812
3	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$149.004	\$576.000	\$89.188
4	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$127.507	\$768.000	\$281.188
5	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$106.009	\$960.000	\$473.188
6	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$84.511	\$1.152.000	\$665.188
7	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$63.013	\$1.344.000	\$857.188
8	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$41.515	\$1.536.000	\$1.049.188
9	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	\$20.017	\$1.728.000	\$1.241.188
10	\$192.000	\$48.681	\$143.319	\$21.498	-\$1.480	\$1.920.000	\$1.433.188

Tabla 21. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1920 h al año

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$486.811,89	-\$486.811,8	-\$973.623,78
1	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$124.800	\$124.800	-\$362.012
2	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$113.382	\$249.600	-\$237.212
3	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$101.964	\$374.400	-\$112.412
4	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$90.547	\$499.200	\$12.388
5	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$79.129	\$624.000	\$137.188
6	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$67.711	\$748.800	\$261.988
7	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$56.293	\$873.600	\$386.788
8	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$44.875	\$998.400	\$511.588
9	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$33.457	\$1.123.200	\$636.388
10	\$124.800	\$48.681	\$76.119	\$11.418	\$22.040	\$1.248.000	\$761.188

Tabla 22. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1920 h al año considerando un financiamiento en equipos del 50%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$243.405,95	-\$243.405,95	-\$486.811,89
1	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$124.800	\$124.800	-\$118.606
2	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$109.731	\$249.600	\$6.194
3	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$94.662	\$374.400	\$130.994
4	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$79.593	\$499.200	\$255.794
5	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$64.524	\$624.000	\$380.594
6	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$49.455	\$748.800	\$505.394
7	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$34.387	\$873.600	\$630.194
8	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$19.318	\$998.400	\$754.994
9	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$4.249	\$1.123.200	\$879.794
10	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	-\$10.820	\$1.248.000	\$1.004.594

Tabla 23. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1920 h al año considerando un financiamiento en equipos del 40%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$292.087,13	-\$292.087,13	-\$584.174,27
1	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$124.800	\$124.800	-\$167.287
2	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$109.731	\$249.600	-\$42.487
3	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$94.662	\$374.400	\$82.313
4	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$79.593	\$499.200	\$207.113
5	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$64.524	\$624.000	\$331.913
6	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$49.455	\$748.800	\$456.713
7	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$34.387	\$873.600	\$581.513
8	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$19.318	\$998.400	\$706.313
9	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$4.249	\$1.123.200	\$831.113
10	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	-\$10.820	\$1.248.000	\$955.913

Tabla 24. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1920 h al año considerando un financiamiento en equipos del 30%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$340.768,32	-\$340.768,32	-\$681.536,65
1	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$124.800	\$124.800	-\$215.968
2	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$109.731	\$249.600	-\$91.168
3	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$94.662	\$374.400	\$33.632
4	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$79.593	\$499.200	\$158.432
5	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$64.524	\$624.000	\$283.232
6	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$49.455	\$748.800	\$408.032
7	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$34.387	\$873.600	\$532.832
8	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$19.318	\$998.400	\$657.632
9	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$4.249	\$1.123.200	\$782.432
10	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	-\$10.820	\$1.248.000	\$907.232

Tabla 25. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1920 h al año considerando un financiamiento en equipos del 20%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$389.449,51	-\$389.449,51	-\$778.899,02
1	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$124.800	\$124.800	-\$118.606
2	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$109.731	\$249.600	\$6.194
3	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$94.662	\$374.400	\$130.994
4	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$79.593	\$499.200	\$255.794
5	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$64.524	\$624.000	\$380.594
6	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$49.455	\$748.800	\$505.394
7	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$34.387	\$873.600	\$630.194
8	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$19.318	\$998.400	\$754.994
9	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	\$4.249	\$1.123.200	\$879.794
10	\$124.800	\$24.341	\$100.459	\$15.069	-\$10.820	\$1.248.000	\$1.004.594

Tabla 26. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1000 h al año considerando un financiamiento en equipos del 50%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$243.405,95	-\$243.405,95	-\$486.811,89
1	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$65.000	\$65.000	-\$178.406
2	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$58.901	\$130.000	-\$113.406
3	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$52.802	\$195.000	-\$48.406
4	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$46.703	\$260.000	\$16.594
5	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$40.604	\$325.000	\$81.594
6	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$34.505	\$390.000	\$146.594
7	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$28.407	\$455.000	\$211.594
8	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$22.308	\$520.000	\$276.594
9	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$16.209	\$585.000	\$341.594
10	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$10.110	\$650.000	\$406.594

Tabla 27. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1000 h al año considerando un financiamiento en equipos del 40%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$292.087,13	-\$292.087,13	-\$584.174,27
1	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$65.000	\$65.000	-\$227.087
2	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$58.901	\$130.000	-\$162.087
3	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$52.802	\$195.000	-\$97.087
4	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$46.703	\$260.000	-\$32.087
5	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$40.604	\$325.000	\$32.913
6	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$34.505	\$390.000	\$97.913
7	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$28.407	\$455.000	\$162.913
8	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$22.308	\$520.000	\$227.913
9	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$16.209	\$585.000	\$292.913
10	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$10.110	\$650.000	\$357.913

Tabla 28. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1000 h al año considerando un financiamiento en equipos del 30%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$340.768,32	-\$340.768,32	-\$681.536,65
1	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$65.000	\$65.000	-\$275.768
2	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$58.901	\$130.000	-\$210.768
3	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$52.802	\$195.000	-\$145.768
4	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$46.703	\$260.000	-\$80.768
5	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$40.604	\$325.000	-\$15.768
6	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$34.505	\$390.000	\$49.232
7	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$28.407	\$455.000	\$114.232
8	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$22.308	\$520.000	\$179.232
9	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$16.209	\$585.000	\$244.232
10	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$10.110	\$650.000	\$309.232

Tabla 29. Flujo de caja cuando se renta a \$65/h por 1000 h al año considerando un financiamiento en equipos del 20%

Año	Beneficio neto	Depreciación	Ingreso Imponible	Impuesto	Flujo de caja	Flujo acumulativo	Saldo
0	-	-	-	-	-\$389.449,51	-\$389.449,51	-\$778.899,02
1	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$65.000	\$65.000	-\$178.406
2	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$58.901	\$130.000	-\$113.406
3	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$52.802	\$195.000	-\$48.406
4	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$46.703	\$260.000	\$16.594
5	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$40.604	\$325.000	\$81.594
6	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$34.505	\$390.000	\$146.594
7	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$28.407	\$455.000	\$211.594
8	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$22.308	\$520.000	\$276.594
9	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$16.209	\$585.000	\$341.594
10	\$65.000	\$24.341	\$40.659	\$6.099	\$10.110	\$650.000	\$406.594