

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Diseño de una planta para la valorización de residuos de cáscara  
de cacao por carbonización hidrotérmica para generación de  
energía eléctrica en Ecuador**

**Emely Tamara Estévez Almache**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniera Química

Quito, 13 de mayo 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 para la valorización de residuos de cáscara de cacao  
por carbonización hidrotérmica para generación de energía eléctrica en  
Ecuador**

**Emely Tamara Estévez Almache**

**Nombre del profesor, Título académico**

Herman Murillo Romero, Ph.D

**Nombre del profesor, Título académico**

Sebastián Ponce Cahuasqui, Ph.D

Quito, 13 de mayo 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: Emely Tamara Estévez Almache

Código: 00211280

Cédula de identidad: 1752580801

Lugar y fecha: Quito, 13 de mayo 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## **UNPUBLISHED DOCUMENT**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 Ecuador, se está evidenciando un impulso hacia la independencia energética, lo que ha propiciado la aparición de una nueva industria enfocada en la generación de energía con fuentes renovables. En este panorama, la biomasa ha sido una de las principales alternativas, ocupando el tercer lugar en producción de electricidad y siendo la fuente principal para generar energía térmica en el país. El país desempeña un papel significativo en la producción mundial de cacao, contribuyendo con el 75% de la misma, pero la cáscara de cacao, un subproducto de las etapas de secado, fermentación y tostado de las semillas ha sido subestimada en términos económicos y ambientales. En este contexto, surge un proyecto que presenta una oportunidad estratégica para Ecuador: la implementación de tecnologías avanzadas para la conversión de residuos del cacao. Se plantea que la planta de producción utilizará inicialmente alrededor de 26.000 [ton/año] de residuos de cáscara de cacao para cubrir las necesidades eléctricas de una escuela en la provincia de Guayas. Se eligió el proceso de carbonización hidrotérmica (HTC) ya que sus características operativas son versátiles y eficientes, descomponiendo residuos en productos útiles de manera sostenible. Se debe tomar en cuenta que, en el contexto del diseño del proceso, se obtuvieron resultados de eficiencia del uso de los recursos, especialmente la reutilización de agua como materia prima, aproximadamente de 670,00 [ton/año], gracias a la etapa de evaporación del licor durante las etapas de producción. Así se consigue una reducción de costos del proceso para poder obtener un diseño más eficiente y responsable. Finalmente, se llevó a cabo una evaluación económica y de seguridad-técnica HAZOP para determinar la seguridad y rentabilidad del proyecto obteniendo un margen de ganancia del 75%, con un producto de venta de 0,15 [\$/kW], con un tiempo de recuperación de 6 años y una tasa de retorno interna de la inversión del 22,39% considerándolo un proyecto rentable y atractivo.

**Palabras clave:** Residuos, generación de energía, fuentes renovables, biomasa, cáscara de cacao, conversión térmica, carbonización hidrotérmica.

## ABSTRACT

In Ecuador, there is a push towards energy independence, which has led to the emergence of a new industry focused on generating energy with renewable sources. In this panorama, biomass has been one of the main alternatives, occupying third place in electricity production and being the main source to generate thermal energy in the country. The country plays a significant role in global cocoa production, contributing 75% of it, but cocoa shell, a by-product of the drying, fermentation and roasting stages of the beans, has been underestimated in economic and environmental terms. . . In this context, a project arises that presents a strategic opportunity for Ecuador: the implementation of advanced technologies for the conversion of cocoa residues. It is proposed that the production plant will initially use around 26.000 [tons/year] of cocoa shell waste to cover the electrical needs of a school in the province of Guayas. The hydrothermal carbonization (HTC) process was chosen as its operational characteristics are versatile and efficient, breaking down waste into useful products in a sustainable manner. It should be considered that, in the context of the process design, resource use efficiency results were obtained, especially the reuse of water as raw material, approximately 670.00 [tons/year], thanks to the stage, of liquor evaporation during the production stages. In this way, a cost reduction in the process is achieved to obtain a more efficient and responsible design. Finally, an economic and safety-technical HAZOP evaluation was carried out to determine the safety and profitability of the project, obtaining a profit margin of 75%, with a sales product of 0.15 [\$/kw], with a recovery time of 6 years and an internal return on investment of 22.39%, considering it a profitable and attractive project.

**Keywords:** Waste, energy generation, renewable sources, biomass, cocoa shell, thermal conversion, hydrothermal carbonization.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. Antecedentes del proyecto .....	16
1.1.1. Cáscara de cacao .....	16
1.1.2. Carbonización hidrotérmica (HTC) .....	17
1.2. Justificación para la implementación del proyecto .....	19
1.3. Objetivos del proyecto .....	20
1.3.1. Objetivo general.....	20
1.3.2. Objetivos específicos .....	21
1.4. Impactos esperados de la implementación de la planta.....	21
2. BASES DEL DISEÑO .....	23
2.1. Descripción de materias primas .....	23
2.2. Descripción de los productos obtenidos.....	25
2.3. Limitaciones y normas .....	26
2.3.1. Aceptación de los productos considerando la ubicación .....	27
2.4. Terminología especializada.....	28
3. DISEÑO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.	29
3.1. Clasificación general de los procedimientos de fabricación de hidrocarbón y actividades relacionadas .....	29

3.2.	Selección del proceso adecuado para la obtención de energía renovable .....	30
3.2.1.	Comparación de procesos .....	30
3.2.2.	Diagrama de flujo .....	31
3.2.3.	Balance de masa.....	33
3.2.4.	Recolección de información para el procedimiento de carbonización hidrotérmica (HTC). .....	33
4.	DISEÑO DE LA PLANTA DE CARBONIZACIÓN HIDROTÉRMICA DE CÁSCARA DE CACAO .....	35
4.1.	Determinación del caudal de producción .....	35
4.2.	Selección de equipos .....	35
4.3.	Estimación de la demanda del proceso .....	36
4.4.	Análisis de seguridad HAZOP .....	36
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN ECUADOR .....	38
5.1.	Estimación de costos .....	38
5.1.1.	Estimación de costos de los equipos.....	38
5.1.2.	Estimación de los costos de producción .....	39
5.1.3.	Estimación de inversión de capital fijo y de trabajo .....	39
5.2.	Evaluación de la rentabilidad del proyecto .....	40
5.2.1.	Descripción del flujo de caja del proyecto.....	40
5.2.2.	Indicadores de rentabilidad .....	41
5.2.3.	Análisis de sensibilidad.....	43

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	45
7. REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de materias primas usadas para el proceso. ....	25
Tabla 2. Resumen de indicadores de rentabilidad por margen de ganancia. ....	42
Tabla 3. Valores determinados variables e ideales para cada escenario para la implementación del proyecto. ....	44
Tabla 4. Metodología para la toma de decisiones y de objetivos para el proyecto. ....	50
Tabla 5. Balance de masa para el triturado. ....	56
Tabla 6. Balance de masa para el reactor HTC. ....	56
Tabla 7. Balance de masa para el filtrado. ....	56
Tabla 8. Balance de masa de evaporador. ....	57
Tabla 9. Balance de masa del condensador. ....	57
Tabla 10. Balance de masa del secado. ....	57
Tabla 11. Balance de masa para el ciclo Rankine. ....	58
Tabla 12. Balance de masa para la turbina. ....	58
Tabla 13. Valores de potencia para cada equipo del proceso. ....	59
Tabla 14. Base de cálculo de la producción energética por tonelada al año. ....	59
Tabla 15. Análisis de seguridad para la etapa 1 de la entrada de materia prima. ....	60
Tabla 16. Análisis de seguridad para la etapa 2 del tratamiento de materia prima. ....	61
Tabla 17. Análisis de seguridad para la etapa 3 de la generación de energía. ....	61
Tabla 18. Determinación de costos por metodología para la elección de equipos para el proceso. ....	63
Tabla 19. Determinación de costos por catálogo para la elección de equipos para el proceso. ....	64
Tabla 20. Resumen de costos ISBL para el proceso. ....	65

Tabla 21. Resumen de costos ISBL, OSBL, ingeniería y construcción, imprevistos y la determinación de capital fijo para el proceso. ....	65
Tabla 22. Cálculo del capital del trabajo. ....	65
Tabla 23. Costos para la implementación y operación de la planta. ....	66
Tabla 24. Descripción del flujo de caja usado para calcular la rentabilidad del proyecto. ....	67
Tabla 25. Costos de producción fijos determinados para el proyecto. ....	67
Tabla 26. Comparación de procesos de conversión térmica para materiales orgánicos. ....	76
Tabla 27. Comparación y calificación de cada proceso de conversión térmica. ....	76
Tabla 28. Código de equipos usados para el diagram P&ID. ....	78
Tabla 29. Relación peso/agua para el análisis experimental del proceso. ....	79
Tabla 30. Esquema de materia prima y subproductos generados del proceso experimental. ...	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cacao variedad 1753 CCN51. ....	23
Figura 2. Diagrama de bloque general para el proceso de HTC. ....	30
Figura 3. Diagrama de flujo general de la planta usando el método de conversión térmica HTC.....	31
Figura 4. Diagrama de flujo de la línea 1 general para el tratamiento de materia prima. ....	31
Figura 5. Diagrama de flujo general de la línea 2 de generación de energía. ....	32
Figura 7. Curva del flujo de caja lineal acumulado a diferentes años del proyecto. ....	41
Figura 9. Análisis de sensibilidad VPN de la planta en una vida útil de 10 años. ....	44
Figura 10. Valores de entrada para la etapa de trituración. ....	51
Figura 11. Valores de la malla del equipo para el proceso de triturado.....	51
Figura 12. Valores generados por la simulación para la temperatura del reactor. ....	52
Figura 13. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el reactor. .....	52
Figura 14. Valores generados por la simulación para la fracción de sólidos en la salida del filtrado.....	53
Figura 15. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el proceso de filtrado. ....	53
Figura 16. Valores generados por la simulación para la temperatura de entrada y de salida para el proceso de evaporación. ....	53
Figura 17. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el evaporador.....	54
Figura 18. Valores generados por la simulación para la temperatura de entrada y de salida para el proceso de condensado.....	54

Figura 19. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el condensador. ....	54
Figura 20. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el secador. ....	55
Figura 21. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para la turbina. ....	55
Figura 22. Simulación completa del proceso. ....	55
Figura 23. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal. ....	68
Figura 24. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS. ....	68
Figura 25. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 100%. ....	69
Figura 26. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 100%. ....	69
Figura 27. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 50%. ....	70
Figura 28. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 50%. ....	70
Figura 29. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 56,5%. ....	71
Figura 30. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 56,6%. ....	71
Figura 31. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 66%. ....	72

Figura 32. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 66%. .....	72
Figura 33. Resumen de Reglamento Tarifario Vigente del Ecuador del año 2021. ....	74
Figura 34. Resumen de la regulación Nro.001/2020 para el control de electricidad en Ecuador del año 2020.....	75
Figura 35. Diagrama de bloque de la planta para producir energía renovable usando como materia prima residuos de cáscara de cacao y como método de conversión térmica el proceso de carbonización hidrotérmica.....	77
Figura 36. Diagrama P&ID de la planta producir energía renovable usando como materia prima residuos de cáscara de cacao y como método de conversión térmica el proceso de carbonización hidrotérmica.....	77
Figura 37. Reactor de alta presión a escala de laboratorio TGYF-B del laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ).....	79
Figura 38. Ficha de seguridad de materia prima: agua. ....	81
Figura 39. Ficha de seguridad materia prima: Cacao. ....	82
Figura 40. Ubicación en el mapa de la distancia entre el terreno para la implementación de la planta, la empresa Barry Callebaut y la Escuela Víctor Alarcón Lazo.....	83
Figura 41. Terreno ubicado en cantón Yaguachi, kilómetro 26 en la vía Durán-Tambo para la implementación de la planta. ....	83
Figura 42. Logística y accesibilidad del terreno para la implementación de la planta. ....	84

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. METODOLOGÍA Y CÁLCULOS .....	48
Anexo A1. Objetivos específicos, actividades relacionadas y procedimientos .....	48
Anexo A2. Simulaciones del proceso .....	49
Anexo A3. Balances de masa del proceso .....	54
Anexo A4. Demanda energética de los equipos .....	57
Anexo A5. Análisis de seguridad HAZOP .....	58
Anexo A7. Estimación de costos .....	60
Anexo A8. Evaluación de rentabilidad .....	64
ANEXO B. MISCELANEOS .....	71
Anexo B1. Resumen de leyes y normas consideradas .....	71
Anexo B2. Comparación de procesos .....	73
Anexo B3. Diagrama de flujo y diagrama de bloques .....	74
Anexo B4. Recopilación de datos experimentales .....	75
Anexo B5. Hojas de seguridad de materias primas .....	77
Anexo B6. Ubicación del terreno para la implementación de la planta .....	79

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes del proyecto

#### 1.1.1. Cáscara de cacao.

En Ecuador, se observa una constante búsqueda de la independencia energética, lo que ha propiciado el surgimiento de una nueva industria orientada hacia la generación de energía mediante fuentes renovables. La biomasa ha adquirido un papel destacado como la tercera fuente principal para la producción de electricidad y como la principal fuente para la generación de energía térmica actual (Velazquez-Araque, 2016). Ecuador contribuye con el 75% de la producción mundial de cacao variedad 1753 CCN-51 y actualmente se presenta una imperante necesidad de abordar el manejo eficiente de los residuos generados durante el procesamiento del cacao (Avadí, 2023). A pesar de los éxitos en la comercialización de productos terminados y la exportación de cacao en diversas formas, la generación de subproductos, especialmente la cáscara resultante de las etapas de secado, fermentado y tostado de las semillas, ha sido subestimada en términos de su potencial económico y ambiental (Diboma, B. S., Mfomo, J. Z., Ndiwe, B., Bôt, B. V, 2024). Este proyecto presenta una oportunidad estratégica para la implementación de tecnologías avanzadas de conversión de residuos del cacao. Ejemplos pioneros en la industria del cacao en Ghana, donde se exploran compuestos activos en cáscaras de vaina y cáscara de frijol de cacao, subrayan la necesidad de una gestión más eficiente de estos residuos (Capaci, 2023). El panorama actual evidencia que la producción de cacao en diferentes regiones, como en Colombia y Ecuador, conlleva la generación de residuos de cáscara de vaina (CPH) por sus siglas en inglés. Desarrollar un análisis y diseño industrial subraya la necesidad de una gestión integral de residuos y la importancia de aprovechar la cáscara de cacao para minimizar la huella ambiental de la industria. Es en este contexto, la urgencia de implementar una planta para la conversión de residuos del cacao se justifica no solo desde una perspectiva económica, aprovechando el valor potencial de estos subproductos, sino

también como una medida crítica para abordar la creciente preocupación por el impacto ambiental de la industria del cacao. La adopción de tecnologías avanzadas en este ámbito no solo promovería la eficiencia económica, sino que también consolidaría la posición de liderazgo de Ecuador en la producción mundial de cacao al incorporar prácticas más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

### **1.1.2. Carbonización hidrotérmica (HTC).**

La selección del proceso actual frente a otras alternativas se fundamenta en la búsqueda de una solución óptima para abordar las necesidades y desafíos específicos presentes en el uso de residuos como fuente de energía. En el análisis de las diferentes opciones disponibles, se consideraron una serie de factores clave, que van desde la eficacia y la viabilidad técnica hasta las consideraciones económicas y ambientales. En la búsqueda constante de métodos eficientes y sostenibles para la conversión de materiales orgánicos, resulta esencial evaluar y comparar distintos procesos alternativos. En este contexto, se compara dos de los procesos más parecidos al proceso de HTC. La pirólisis, la torrefacción y la hidrólisis térmica, estos procesos comparten una serie de similitudes fundamentales en su naturaleza de descomposición térmica de materiales orgánicos. En primer lugar, todos estos métodos operan en condiciones de ausencia o limitación significativa de oxígeno, lo que impide la combustión completa de los materiales orgánicos y favorece la formación de productos carbonosos (Luo, 2016). Además, estos procesos comparten la particularidad de operar a temperaturas relativamente elevadas, un factor determinante que influye en la velocidad de reacción y la composición de los productos finales. Aunque comparten estas similitudes fundamentales, es crucial destacar que cada proceso tiene sus propias particularidades operativas. En el Anexo B2 se presenta una tabla comparativa de las características más importantes de cada proceso. No obstante, para este proyecto, se ha seleccionado la carbonización hidrotérmica como el proceso óptimo (Atlas Bioenergético de la República del Ecuador, 2014). El diagrama de bloques de la planta y el funcionamiento de este

proceso en la misma se ilustran en el Anexo B3. En donde este método termoquímico innovador trata a los materiales orgánicos, tales como biomasa lignocelulósica o subproductos industriales, sometiéndolos a condiciones extremas de alta temperatura y presión en presencia de agua, lo que implica la descomposición térmica de los enlaces químicos de los materiales orgánicos, facilitado por la presencia del agua como reactivo. Durante la reacción, que tiene lugar en un reactor especialmente diseñado, se generan varios productos, entre ellos hidrocarbón y licores acuosos ricos en compuestos orgánicos. La versatilidad de la carbonización hidrotérmica la hace relevante en diversas aplicaciones, desde la producción de biocarbón hasta la obtención de líquidos orgánicos valiosos con potenciales aplicaciones en biocombustibles o materiales químicos (Castillo, 2020). Este proceso representa una prometedora vía para la conversión sostenible de biomasa y otros recursos orgánicos en productos útiles, destacando su importancia en la búsqueda de soluciones energéticas y químicas más respetuosas con el medio ambiente, además de ofrecer un mayor control de condiciones operativas, lo que contribuye a una operación más eficiente y segura. Una de las principales ventajas de la carbonización hidrotérmica es su capacidad para tratar biomasa húmeda sin necesidad de pre-secado, a diferencia de la pirólisis. El proceso de HTC se caracteriza por operar a temperaturas relativamente moderadas, típicamente entre 180 y 250 grados Celsius. Este rango de temperatura permite la conversión de biomasa en productos carbonizados sin alcanzar los extremos térmicos asociados con otros procesos como la pirólisis, que empieza a partir de los 400 grados Celsius. A diferencia de la pirólisis, que requiere temperaturas mucho más altas para descomponer la materia orgánica, el proceso HTC utiliza la presión y el calor controlado para obtener productos como biocarbón y otros materiales (Batista-Marín, 2020). Esta diferencia en el rango de temperaturas implica un menor consumo energético y, por ende, un proceso más eficiente desde el punto de vista energético.

## **1.2. Justificación para la implementación del proyecto**

En un contexto global caracterizado por la creciente conciencia hacia fuentes energéticas más sostenibles, los proyectos de energía renovable se han erigido como imperativos, más allá de constituir meramente opciones deseables. En este marco, la perspectiva de generar energía a partir de residuos de cáscara de cacao se presenta como una oportunidad estratégica. La selección cuidadosa de la especie 1753 CCN51 de residuos de cáscara de cacao, que es reconocida por sus propiedades para la conversión en energía. La especie de cacao es ampliamente reconocida por su potencial energético, destacando por su capacidad para generar biomasa de manera rápida y sostenible. Diversos estudios respaldan el uso de esta especie como fuente de energía renovable. Por ejemplo, se ha documentado su uso para diferentes evaluaciones energéticas, demostrando un alto rendimiento en comparación con otras fuentes vegetales (Teneda, 2015). Además, otros estudios realizados por el Instituto de Energías Renovables, se observó que esta especie tiene un gran potencial para la producción de electricidad en plantas de biomasa, proporcionando una alternativa viable y sostenible a los combustibles fósiles (Instituto Nacional de Eficiencia Energética, 2022). Se establece a este proyecto como una oportunidad para la generación de subproductos con valor añadido. La producción de la planta se espera que sea rentable analizando e identificando los costos asociados con el proyecto, incluyendo la adquisición de materias primas, costos operativos, inversión en infraestructura y equipo, costos de manejo y transporte, entre otros, además de considerar gastos de mantenimiento, depreciación de activos y cualquier otro costo recurrente. Los ingresos de esta se estiman como una proyección de derivados de la venta de energía generada y si es aplicable, de subproductos como compuestos bioactivos. Para realizar la evaluación financiera del proyecto, se emplearán tres indicadores fundamentales para valorar su viabilidad económica. En primer lugar, se considerará el Periodo de Recuperación de Inversión (PRI), que representa el tiempo necesario para que el proyecto recupere la inversión

inicial. Seguidamente, se analizará la Tasa Interna de Retorno (TIR), la cual calcula la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de los flujos de efectivo del proyecto sea igual a cero. Finalmente, se estudiará el Valor Actual Neto (VAN), que refleja la diferencia entre los flujos de efectivo entrantes y salientes, ajustados al valor presente mediante una tasa de descuento (Montenegro, 2023). Estos indicadores son herramientas cruciales en la toma de decisiones para evaluar la viabilidad económica y financiera de un proyecto. Las tarifas de importación e impuestos son un tipo de arancel aplicado a los equipos importados y se establecen como un porcentaje sobre la suma del Costo, Seguro y Flete, que constituyen la base imponible. Este reglamento se establece por el Servicio de Nacional de Aduana del Ecuador, en los regímenes de Reposición de Mercancías con Franquicia Arancelaria (Art. 150) y Transformación bajo control Aduanero (Art. 151) ubicados en el Código Orgánico De La Producción, Comercio e Inversiones (COPCI). Este método, varía según el tipo de mercancía. Además, se debe aplicar una tasa del 0.5% sobre la misma base imponible gracias al Fondo de Desarrollo para la Infancia (FODINFA) (Agroforestry Systems, 2024). El Impuesto a los Consumos Especiales (ICE) introduce un factor de variabilidad, ya que su porcentaje depende de la naturaleza específica de los bienes y servicios importados. Asimismo, el Impuesto al Valor Agregado (IVA), aplicado al 15%, se calcula sobre la suma de la base imponible, Ad-valorem, FODINFA e ICE, constituyendo un componente significativo en la estructura de costos de la importación. Además, la variabilidad del ICE basado en la naturaleza específica de los bienes importados puede influir en la selección de tecnologías y equipos, considerando su impacto en los costos totales y por ende, en la rentabilidad del proyecto.

### **1.3. Objetivos del proyecto**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Diseñar una planta para la transformación eficiente de residuos agrícolas usando carbonización hidrotérmica para la generación de energía renovable a partir de la cáscara de cacao.

### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- 1) Seleccionar tecnologías innovadoras para convertir térmicamente los residuos de cáscara de cacao.
- 2) Desarrollar el diseño de un proceso que utilice una cantidad de residuos agrícolas disponibles.
- 3) Desarrollar el diseño de un proceso para la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.
- 4) Realizar un análisis de viabilidad técnica y económica del proceso para la generación de energía de la planta.

### **1.4. Impactos esperados de la implementación de la planta**

La hipótesis central de este proyecto radica en la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar un sistema de generación de energía renovable a partir de residuos de cáscara de cacao en la provincia de Guayas, Ecuador. Se parte del supuesto de que la disponibilidad abundante de residuos de cáscara de cacao, combinada con los avances tecnológicos en procesos de conversión térmica, permitirá aprovechar este recurso agrícola subutilizado para generar electricidad de manera sostenible y rentable. En términos técnicos, se espera que el diseño e implementación de la planta de generación de energía se realice utilizando tecnología de vanguardia, optimizando cada etapa del proceso, desde la recolección y preparación de los residuos hasta la conversión térmica y la distribución de energía eléctrica. Desde una perspectiva económica, se espera que el proyecto genere beneficios a la parroquia Virgen de Fátima y a sus alrededores. En primer lugar, se espera que la venta de energía eléctrica producida por la planta genere ingresos significativos, lo que contribuirá a la viabilidad financiera a largo plazo del proyecto. Además, de promover la creación de empleo para la gestión de residuos y operación de la planta, lo que tendrá un impacto positivo en la economía local, especialmente en las comunidades rurales cercanas a las plantaciones de cacao. En cuanto

a los beneficios ambientales, se espera que el proyecto contribuya a la reducción de desechos agrícolas y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la descomposición de los residuos de cáscara de cacao, así como las quemadas agrícolas. Además, al utilizar residuos orgánicos como fuente de energía renovable, se espera que Ecuador empiece a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y a promover prácticas más sostenibles en el sector energético. Este proyecto aspira ser un modelo integral de desarrollo sostenible, abordando los desafíos ambientales, económicos y sociales de manera integral, al igual que los resultados obtenidos sirvan como referencia para futuras iniciativas similares en Ecuador y otras regiones con recursos agrícolas subutilizados y necesidades energéticas insatisfechas.

## 2. BASES DEL DISEÑO

### 2.1. Descripción de materias primas

Para la producción de energía renovable a partir de residuos de cáscara de cacao se necesitan como materias primas los residuos de cáscara de cacao de la variedad 1753 CCN51, los cuales se obtienen del árbol conocido científicamente como *Theobroma Cacao* L. La figura 1 indica la especie de cacao, la semilla y la cáscara usada para el proyecto. Este árbol es nativo de las regiones tropicales de América del Sur y proporciona la materia prima esencial para la generación de energía sostenible.

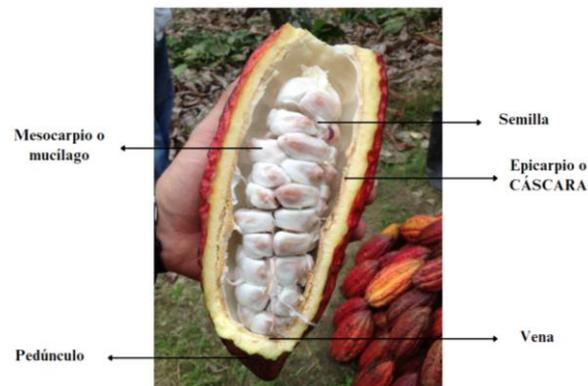


Figura 1. Cacao variedad 1753 CCN51.

La selección específica la variedad mencionada anteriormente de residuos de cáscara de cacao se basa en sus propiedades y composición ideales para el proceso de conversión en energía (Zapata, 2024). La cáscara de cacao de esta especie posee un alto contenido de fibra, compuesta tanto por fibra soluble como insoluble. Esta fracción, oscila entre el 60% de la cáscara y confiere propiedades beneficiosas como material para procesos de conversión bioenergética. La descomposición de esta fibra durante procesos de gasificación o carbonización hidrotérmica libera gases combustibles que pueden utilizarse para generar calor y, por ende, electricidad (Funke, 2010). Además cuenta con la presencia de sustancias bioactivas, como la teobromina y catequinas (en rangos aproximados del 1% al 3%), lo cual añade una dimensión adicional a la utilidad de la cáscara de cacao en la generación de energía. La teobromina, por ejemplo, es

un alcaloide que puede ser utilizada en aplicaciones que requieren combustión o degradación bioquímica para la generación de calor o energía (Ortiz, 2019). Por otro lado, las catequinas son antioxidantes que pueden influir en la estabilidad de los procesos de producción de energía, contribuyendo a mejorar la eficiencia o la calidad del producto final (Gutiérrez, 2015). Este residuo se destaca de manera aprovechable en la generación de energía renovable, planteando oportunidades para una gestión sostenible de residuos agrícolas y la producción de subproductos beneficiosos para diversas aplicaciones. Además de los residuos de cáscara de cacao, otro componente crucial en este proceso es el agua. El agua desempeña un papel fundamental en la fase de HTC, una etapa esencial para la transformación de los residuos en una forma de energía renovable (Owusu, 2023). Ambas materias primas proporcionan una base sólida para el desarrollo de una fuente de energía renovable innovadora y respetuosa con el medio ambiente. Antes de utilizar cualquier materia prima en los procesos industriales, es fundamental consultar las hojas de seguridad para garantizar un manejo seguro y adecuado de los productos, las cuales se encuentran en el Anexo B5. Los residuos de cacao serán suministrados por Barry Callebaut AG, una empresa con sede en Suiza y ubicada en el cantón de Durán, en la provincia de Guayas, Ecuador. Barry Callebaut AG, una procesadora de cacao y fabricante de chocolate, produce alrededor de 2.500 kg/ha al mes, con un precio de venta comercial de \$0, gracias a que son residuos generados (Barry Callebaut Agrilogic, 2023). Asimismo, de acuerdo con el Reglamento Tarifario Vigente de Ecuador en el Año 2023 reportado por la Empresa Cantonal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil, la tarifa referencial del metro cúbico de agua potable es alrededor de \$0.23 (Empresa Cantonal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil, 2023). El mismo Reglamento Tarifario Vigente se encuentra en el Anexo B1. Por otro lado, para proporcionar detalles precisos sobre las materias primas utilizadas en la producción, se presenta a continuación la tabla 1, la cual contiene

información sobre la cantidad específica, el precio unitario, el costo anual y el país de origen de cada proveedor.

Tabla 1. Descripción de materias primas usadas para el proceso.

Materia Prima	Cantidad [ton/día]	Precio [\$/kg]	Costo Anual [\$/año]	País Proveedor
Agua	6453,290	0,25	1.196.072,00	Ecuador
Cáscara de cacao	71,233	0	0	Ecuador

## 2.2.Descripción de los productos obtenidos

En este proyecto, se contempla la obtención de un producto principal y un derivado resultante: energía generada a partir de biomasa y un concentrado conocido también como licor de HTC, el esquema de los derivados resultantes se puede ver en el Anexo B4. El licor de HTC de cáscara de cacao se genera como subproducto a partir del proceso de carbonización hidrotérmica, seguido de un proceso de filtrado y evaporado en la planta. Este derivado posee diversas aplicaciones, como mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de los cultivos al utilizarse como fertilizante. Además, se puede considerar su uso en la síntesis de productos químicos o como adsorbente útil para el tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la eliminación de contaminantes (Liu, 2024). Sin embargo, es importante señalar que el estudio detallado de este derivado no se contemplará en la recirculación de la planta. En cambio, se reserva para la venta comercial o para futuros estudios específicos que busquen determinar la composición exacta del licor de HTC. Estos estudios permitirán optimizar su aplicación en diferentes sectores industriales, maximizando así su valor como subproducto del proceso de carbonización hidrotérmica de la cáscara del cacao. Por otro lado, el producto principal que se obtiene de la planta surge a partir del proceso de triturado, una técnica empleada para transformar y reducir a fragmentos más pequeños la materia prima normalmente mediante la

aplicación de fuerza mecánica. Este proceso tiene como objetivo volver más eficiente el proceso al aprovechar el potencial energético contenido en el hidrocarbón. El hidrocarbón, al ser introducida en un ciclo Rankine, desempeña un papel crucial en la mejora de la eficiencia del sistema. El ciclo Rankine, al ser un ciclo termodinámico que convierte el calor en trabajo mecánico, permite la utilización de un generador para producir energía eléctrica de manera sostenible (Estevam, 2024). Por otro lado, en la actualidad, en la provincia de Guayas se generan 718.018,43 toneladas anuales de residuos de cáscara de cacao, de las cuales se utilizarán inicialmente alrededor de 26.000 toneladas al año para cubrir las necesidades eléctricas de una escuela fiscal de 1.4 hectáreas. La Escuela de Educación Básica Victor Lazo Alarcón ubicada en la parroquia Virgen de Fátima, la cual consume aproximadamente 200 kWh por mes, equivalente a 2,2 MW anuales, contribuyendo así a la generación anual de energía eléctrica. Para esto, la planta de producción generará aproximadamente 2,25 MW anual de energía eléctrica. Según el último informe de balance energético del año 2020 elaborado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, la parroquia Virgen de Fátima y sus sectores rurales aledaños enfrentan deficiencias en sus redes eléctricas debido a líneas de transmisión y distribución antiguas y deterioradas (Marafi, 2024). Esta situación se agrava por la falta de inversión en el mantenimiento y modernización de la infraestructura eléctrica, lo que resulta en una baja confiabilidad en el suministro eléctrico. Este enfoque no solo contribuye a la generación sostenible de energía, sino que también podría servir como ejemplo para otras comunidades que enfrentan desafíos similares en términos de infraestructura eléctrica obsoleta y falta de inversión.

### **2.3. Limitaciones y normas**

El proyecto propuesto se enfrenta a diversas limitaciones internas y externas que pueden impactar su desarrollo y sostenibilidad a largo plazo. Las limitaciones internas incluyen la disponibilidad de recursos financieros y la gestión eficiente de la materia prima, mientras que

las limitaciones externas están relacionadas con las regulaciones ambientales y normativas para la distribución de energía eléctrica en Ecuador. Estas limitaciones influirán en la definición del alcance del proyecto, la selección de tecnologías y la implementación de medidas de cumplimiento normativo, así como en el diseño del proceso para asegurar el cumplimiento de las regulaciones.

### **2.3.1. Aceptación de los productos considerando la ubicación.**

La provincia del Guayas es una de las 24 provincias que conforman al Ecuador. La capital, Guayaquil se considera como una de las ciudades más pobladas, la principal urbe económica del país. En Ecuador, se encuentra una pequeña área rural situada en el cantón Yaguachi de la provincia del Guayas, conocida coloquialmente como "Kilómetro 26" debido a su ubicación a lo largo de la vía Durán-Tambo, la parroquia Virgen de Fátima se considera como una ubicación estratégica respondiendo a consideraciones técnicas fundamentales que buscan maximizar la eficiencia operativa y la sostenibilidad del proyecto, el mapa de la ubicación se encuentra en el Anexo B6. Al pie de la Vía Durán Tambo en la parroquia Virgen de Fátima, se encuentra una extensión de superficie de alrededor de 24,82 hectáreas, al lado del nuevo proyecto vial del puerto de Guayaquil-Durán, ingresando por la entrada de la vía Taura. Esta propiedad industrial es ideal para medianas y grandes industrias, ya que está ubicada estratégicamente a 372 metros de la carretera principal, a 147,18 metros de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) y aproximadamente de 25 minutos de la empresa proveedora de la cáscara del cacao, Barry Callebaut AG. Además de que el sector cuenta con una vía de acceso asfaltada de 4 carriles y 5 pozos profundos de agua cercanos al río Guayas. Las condiciones climatológicas del sector cuentan con una probabilidad de precipitaciones del 5%, humedad alrededor del 85% y un viento de 3 km/h, además de que la temperatura ambiente ronda entre 27°C y 32°C (Meteosolana, 2024). La localización estratégica de la planta se beneficia de una red de acceso conveniente, con vías de transporte bien desarrolladas que facilitan la llegada y

salida eficiente de insumos y productos finales. La cercanía a puertos marítimos y conexiones viales confiables contribuye significativamente a la logística, reduciendo los costos de transporte y mejorando la accesibilidad, el mapa de localización del terreno se encuentran en el Anexo B6. Esto se traduce en una gestión eficiente de los recursos hídricos y promueve la generación de empleo en la región, junto con el impulso de prácticas sostenibles los cuales promoverán el desarrollo económico local y se fortalecerán los lazos comunitarios.

#### 2.4. Terminología especializada

- › **Conversión bioenergética:** Proceso de convertir biomasa, como residuos orgánicos, en energía útil como biogás, bioetanol o biodiesel mediante diversos procesos bioquímicos como la fermentación o la digestión anaeróbica (Herguedas, 2023).
- › **Carbonización hidrotérmica:** Proceso termoquímico que implica la conversión de biomasa en productos sólidos que contienen carbono en presencia de agua y a temperaturas elevadas, típicamente entre 180°C y 250°C (Dufour, 2024).
- › **Sostenibilidad ambiental:** Capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Naciones Unidas, 2024).
- › **Optimización de residuos:** Aplicación de estrategias y tecnologías para maximizar el valor de los residuos y minimizar su impacto en el medio ambiente (Ecoembres, 2024).
- › **Subproductos:** En un contexto técnico, los subproductos son productos secundarios o adicionales que surgen durante un proceso de producción principal. Estos productos pueden tener valor comercial o ser útiles en otros procesos (Blanco, 2018)

### **3. DISEÑO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE**

#### **3.1. Clasificación general de los procedimientos de fabricación de hidrocarbón y actividades relacionadas**

El proceso HTC implica la conversión termoquímica de biomasa en agua comprimida caliente, normalmente a temperaturas que oscilan entre 180 y 350 °C y presiones autógenas de 2 a 4 MPa. Para este proyecto se compararon tres procesos de conversión térmica: pirólisis e hidrólisis. Se consideran similares en el sentido de que implican la conversión de biomasa en productos valiosos mediante la aplicación de calor. Sin embargo, difieren en sus condiciones de operación, mecanismos de reacción y la naturaleza de los productos obtenidos. La pirólisis es un proceso en el que la biomasa se calienta en ausencia de oxígeno o cualquier otro medio gaseoso, normalmente a temperaturas que oscilan entre 300 y 800 °C (Reza, 2015). La descomposición térmica de la biomasa en pirólisis produce carbón sólido, bioaceite líquido y productos gaseosos. Si bien la pirólisis puede producir productos valiosos, requiere altas temperaturas y un control cuidadoso de los parámetros del proceso para obtener la distribución deseada del producto. La hidrólisis, por otro lado, implica el tratamiento de la biomasa con vapor de alta temperatura o agua comprimida caliente a temperaturas entre 180 y 240 °C y presiones de hasta 4 MPa (Libra, 2011). Este proceso se utiliza principalmente para componentes complejos de la biomasa, como materiales lignocelulósicos, en azúcares más simples y otros productos.

La figura 2 describe el proceso de carbonización hidrotérmica usando como materia prima la biomasa de cáscara de cacao. En el proceso, la cáscara de cacao primero pasa por un pretratamiento de trituración. Luego, la cáscara molida se introduce en el método HTC, donde se emplea agua para generar varios gases y una mezcla de sólidos y líquidos. Esta mezcla se separa mediante un proceso de filtración, tras el cual el hidrocarbón se seca antes de someterse

a la caldera y al ciclo Rankine para producir energía. Dado que el proceso no requiere secar la cáscara antes del tratamiento, se presume que el consumo de energía será menor.

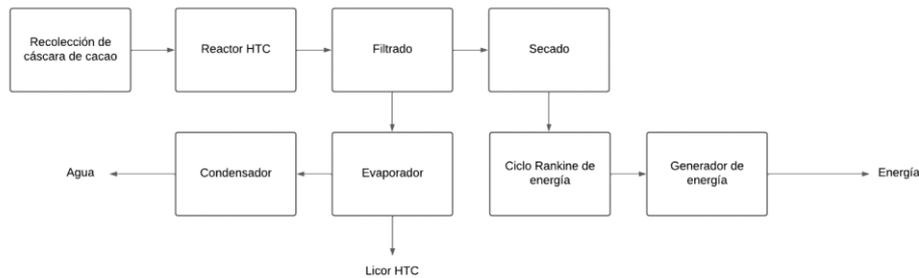


Figura 2. Diagrama de bloque general para el proceso de HTC.

El proceso HTC emerge como una opción más atractiva para la conversión de biomasa debido a sus condiciones operativas, compatibilidad versátil con materias primas, distribución de productos valiosos, beneficios ambientales y escalabilidad.

### 3.2. Selección del proceso adecuado para la obtención de energía renovable

Después de analizar los procesos para obtener el producto deseado, es fundamental elegir el más adecuado para su producción. Para tomar esta decisión, se llevará a cabo una comparación entre los procesos mencionados, evaluando varios aspectos y se detallará el proceso seleccionado junto con el equipo requerido.

#### 3.2.1. Comparación de procesos.

Para elegir el proceso más adecuado para implementar en el proyecto, es esencial tener en cuenta tanto las condiciones de operación, el impacto ambiental, la investigación y desarrollo que pueden tener a lo largo del tiempo y las inversiones y costos para su aplicación, así también como las características finales del producto. El proceso HTC, la pirólisis y la hidrólisis son técnicas que pueden emplearse para transformar la biomasa, pero difieren en los resultados que producen (Camargo, 2018). Con el fin de determinar cuál de estos procesos es más conveniente para su implementación, se creó una tabla comparativa en la que se evaluaron varios parámetros

clave. Para cada parámetro, se asignó una calificación de 1 a 5, donde 5 representa la mejor opción y 1 la peor. La tabla 3, que puede encontrarse en el Anexo B2, donde se ofrece una visión clara de cómo se comparan los dos métodos. Tras la evaluación, se determinó que el proceso HTC es la opción óptima para obtener un adsorbente de alta calidad. Este proceso obtuvo un total de 36 puntos, superando significativamente a la pirólisis, que recibió solo 27 puntos y la hidrólisis recibiendo 23 puntos. Los resultados de esta evaluación sugieren que la carbonización hidrotérmica ofrece mejores condiciones y mayor eficiencia para la producción del producto deseado.

### 3.2.2. Diagrama de flujo.

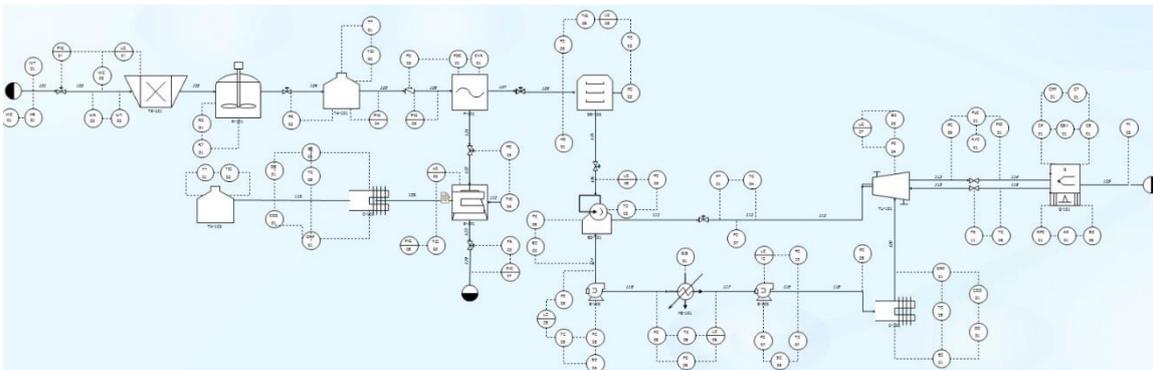


Figura 3. Diagrama de flujo general de la planta usando el método de conversión térmica HTC.

Línea 1: Tratamiento de materia prima

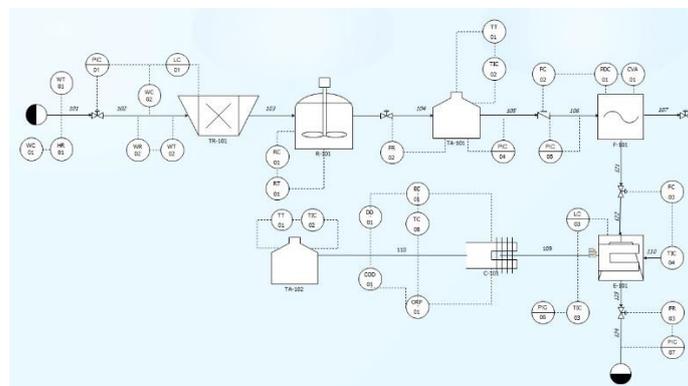


Figura 4. Diagrama de flujo de la línea 1 general para el tratamiento de materia prima.

Línea 2: Generación de energía:

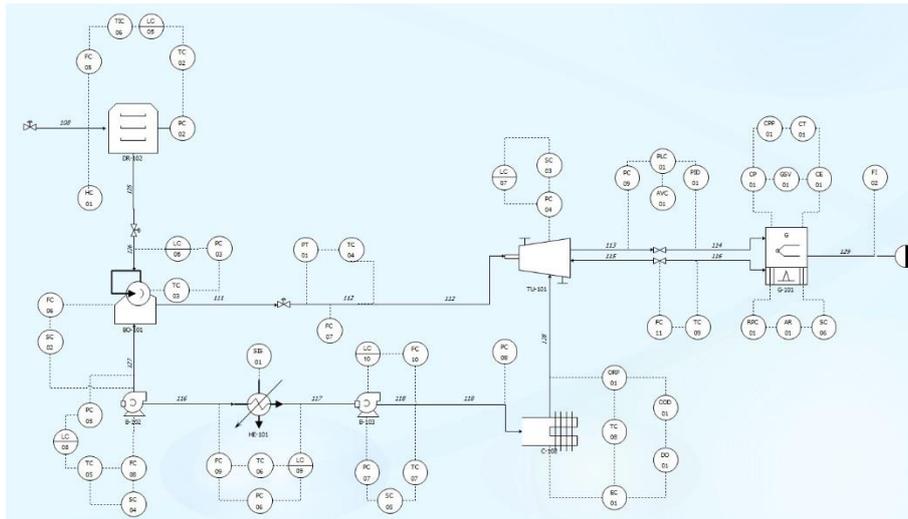


Figura 5. Diagrama de flujo general de la línea 2 de generación de energía.

En la figura 5 se ilustra el diagrama de flujo del proceso, donde las líneas y flechas indican las corrientes del proceso, mientras que los números sobre ellas sirven como códigos para identificar la composición de cada corriente. En el Anexo B3 se incluyen tablas que detallan estos códigos y describen el equipo utilizado. El proceso comienza con la alimentación de cáscara de cacao en un triturador para reducir su tamaño de partícula. La cáscara molida y el agua se introducen luego en un reactor continuo para la carbonización hidrotérmica, donde se mantiene la temperatura y presión en un rango subcrítico, es decir, por debajo del punto crítico del agua. La relación entre cáscara y agua es de 1:12 (Sharma, 2020). El producto resultante se pasa por un filtro para separar el hidrocarbón del licor generado. El hidrocarbón húmedo se seca en un secador a aproximadamente 120°C. Luego, el hidrocarbón seco se traslada a un ciclo Rankine donde se utiliza una caldera, un condensador, un calentador y una turbina para convertir el vapor de agua generado por el hidrocarbón junto con una temperatura de alrededor de 550°C a energía eléctrica (Giacometto, 2018). Por otro lado, los licores extraídos se dirigen a un evaporador, para posteriormente pasar a un condensador y finalmente a un tanque de almacenamiento para mantener reservado para posteriores ventas del licor u otras investigaciones afines del mismo. El diagrama de flujo también define el equipo necesario para

el proceso, como bombas y válvulas y resalta la importancia de los balances de masa para garantizar un proceso eficiente y bien equilibrado.

### **3.2.3. Balance de masa.**

Para calcular el balance de masa, se tuvo en cuenta un flujo de materia prima constante de 26.000 ton/año de cáscara de cacao, aproximadamente 0,824 kg/seg de biomasa y 24.363,846 ton/año de agua. A partir de estas cantidades, se estimó que la producción por hora de 20.331,6 ton/año. Convirtiendo el valor de la producción por hora usando el valor de poder calorífico del cacao de 17,6 MJ/kg (Syamsiro, 2024) se obtiene 1,29 MW de energía eléctrica. Para los balances de masa en las etapas de trituración, filtración, secado y generación de energía, se utilizó el software Aspen Plus. Los balances de masa para la fase de carbonización hidrotérmica se llevó a cabo usando como base datos experimentales obtenidos en laboratorio. Por otro lado, para el proceso de tratamiento, se utilizaron datos bibliográficos, como la relación entre hidrocarbón y agua de 1:2 y un rendimiento del 56,9% de hidrocarbón (Azargohar, 2017). Estos cálculos permiten estimar la producción de cada línea de flujo según la cantidad de materia prima utilizada, con más detalles disponibles en el Anexo A3. Este enfoque sistemático para el balance de masa es crucial para optimizar el proceso de producción y para garantizar que los recursos y la energía se utilicen de manera eficiente. Con esta información, se pueden tomar decisiones informadas para ajustar las operaciones, identificar posibles áreas de mejora y evaluar el rendimiento general del sistema.

### **3.2.4. Recolección de información para el procedimiento de carbonización hidrotérmica (HTC).**

Para el proceso de carbonización hidrotérmica (HTC), se tomó en cuenta experimentos realizados anteriormente en el reactor de alta presión a escala de laboratorio TGYF-B del laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), en la sección de Anexo B4 se encuentra una foto del mismo. Estas pruebas se centraron en explorar cómo la temperatura

afecta el proceso. Pero para el presente proyecto se realizó una prueba experimental, en donde se añadieron 30 gramos de cáscara molida y 300 gramos de agua, siguiendo la relación de 1:10 entre cáscara y agua (Rauscher, 2019). El tiempo de operación del reactor se estableció en 60 minutos con una temperatura constante de 250 grados Celsius. Después de la carbonización, se llevó a cabo la filtración para separar el hidrocarbón y el secado del mismo. Los resultados de estos experimentos están recopilados en el Anexo B4. No se realizaron más pruebas experimentales ya que en proyectos anteriores como “Análisis de prefactibilidad de una planta de biochar mediante un proceso de pirólisis con cascarilla de arroz (Mateus, 2023)” y “Valorización de hueso de palma por carbonización hidrotérmica para obtener un adsorbente de colorantes, biogás y fertilizante (Rueda, 2023)” se evaluaron diferentes condiciones de operación en donde se determina que la mejor temperatura para la producción de hidrocarbón es de 250 grados Celsius. Respecto a la etapa de generación de energía a partir del hidrocarbón, se realizaron varias simulaciones utilizando el software Aspen Plus. Para las simulaciones, se consideró la composición en fracción másica de la biomasa, principalmente con agua de 0,438%, carbón con 0,2001%, hidrógeno con 0,261% y oxígeno con 0,1% (Ponce, 2021). Esta simulación permitió estimar los parámetros clave para el proceso de obtención de energía y así mismo validar la viabilidad del proceso seleccionado para la planta de producción. Los detalles de estas simulaciones y las gráficas relacionadas se adjuntan en el Anexo A2, para su revisión y análisis.

## **4. DISEÑO DE LA PLANTA DE CARBONIZACIÓN HIDROTÉRMICA DE CÁSCARA DE CACAO**

### **4.1. Determinación del caudal de producción**

El flujo de producción de la planta se estableció en función de la cantidad de materia prima disponible, que en este caso es principalmente la cáscara de cacao. Según los datos de superficie y producción en Ecuador en el año 2022, la siembra de cacao corresponde a 1,4 millones de hectáreas, representando el 41,3% de superficie total plantada superando a la palma africana, el banano y la caña de azúcar. Pero de este 41,3% solo se vende 336,58 ton/año de almendra seca de cacao, mientras que los residuos generados 2.015.352,60 ton/año en todo el país (Encuestas de Producción Agropecuaria Continua, 2015). Sin embargo el enfoque de este proyecto se encuentra en la ciudad de Guayaquil, en donde se producen alrededor de 718.018,43 ton/año. Se sugiere que la industria del cacao tiene un gran potencial para reutilizar sus subproductos. La gran cantidad de residuos de cáscara de cacao generados cada año representa una oportunidad significativa para aprovechar esta biomasa de forma productiva. Por esta razón, tomando en cuenta la generación de residuos en la provincia del Guayas, se estableció un flujo inicial de 26.000 ton/año, lo que equivale a aproximadamente 0,8244 kg/s. De esta cantidad, se estima que solo se utiliza dos tercios del volumen total generado.

### **4.2. Selección de equipos**

Para planta se han considerado varios equipos para llevar a cabo las operaciones, entre los que se incluyen un triturador, el reactor HTC, dos tanques de almacenamiento, filtrado, secado, dos condensadores, calderas, evaporador, turbinas y finalmente un generador de energía, así como también equipos auxiliares como bombas, separadores y mezcladores. Para cada equipo, se tuvo en cuenta el material de construcción adecuado según el tipo de materia que pasará a través de él. Se eligió que todos los equipos usados estarán fabricados de acero inoxidable por sus diferentes características como resistencia a la corrosión, durabilidad y resistencia mecánica

(Fuentes, 2023). El dimensionamiento de la mayoría de los equipos se realizó mediante simulaciones en Aspen Plus. La metodología de la selección de los equipos mencionados anteriormente se presenta en el Anexo A4, junto con los resultados obtenidos de la simulación. Es importante realizar la selección del equipamiento adecuado no solo para asegurar una demanda energética óptima y un análisis económico sólido, sino también para garantizar la seguridad del proceso y su eficiencia operativa.

### **4.3. Estimación de la demanda del proceso**

Para estimar la demanda energética del proceso, se realizaron balances de energía para cada uno de los equipos de la planta. Estos balances se obtuvieron principalmente a través de simulaciones con el programa Aspen Plus para la mayoría de los equipos empleados en la producción. Luego, estas cantidades de energía se multiplicaron por el caudal de entrada correspondiente. La energía de activación necesaria para el proceso de HTC es de 4212 kJ/kg (Mazari, 2015). La metodología completa utilizada para determinar la demanda energética de estos equipos está detallada en el Anexo A4, donde también se presentan los resultados obtenidos para los demás equipos del proceso. Al considerar la demanda energética del proceso implica evaluar posibles riesgos, como las altas temperaturas y presiones, así como la manipulación de productos, para implementar medidas que garanticen un entorno seguro. El diseño del proceso debe tener en cuenta tanto la eficiencia energética como la seguridad operativa para asegurar un funcionamiento fiable y seguro.

### **4.4. Análisis de seguridad HAZOP**

Para realizar un análisis HAZOP del equipo utilizado en el proceso de tratamiento y generación de energía, se evaluó la finalidad del equipo y también el propósito de cada una de las corrientes de entrada y salida, teniendo en cuenta las condiciones de operación. Para cada corriente, se identificaron posibles desviaciones, sus causas, consecuencias y valorizaciones de riesgo. Al igual que se especificó qué equipo sería responsable de implementar dichas acciones dentro de

la planta. Adicionalmente, se asignaron valores que indican la probabilidad de ocurrencia para proporcionar una evaluación del riesgo asociado.

La metodología utilizada para este análisis HAZOP y los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo A5. Se aborda desde la identificación de las desviaciones hasta las posibles acciones correctivas para reducir el riesgo. Además de identificar riesgos potenciales y asignar valores de probabilidad y consecuencias, el análisis HAZOP también tiene en cuenta la seguridad global del proceso. Este análisis permite prever problemas antes de que ocurran, ayudando a la planta a establecer medidas de seguridad más firmes. Al proporcionar este nivel de detalle y claridad, la planta puede implementar estrategias efectivas para prevenir accidentes y mantener la seguridad del personal y la infraestructura.

## **5. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN ECUADOR**

### **5.1. Estimación de costos**

Los procedimientos integrales empleados para calcular todos los gastos necesarios para realizar la evaluación económica del proyecto se proporcionan en el Anexo A7 adjunto. Esta sección presenta los hallazgos relacionados con la estimación de costos.

#### **5.1.1. Estimación de costos de los equipos.**

Para estimar los costos de los equipos se consideró el dimensionamiento y especificaciones de cada equipo con base en evaluaciones previas. Esto implicó definir el costo de compra, el país proveedor, los equipos requeridos, los materiales de fabricación y su respectivo factor del material (Sinnott, 2008). El precio de compra se multiplicó por los factores antes mencionados además de la cantidad para determinar el costo total del equipo. Además, se evaluaron los costos individuales y de instalación (ISBL) asociados con todas las operaciones del proceso, materia prima, almacenamiento de productos, etc. Se utilizaron tres métodos diferentes: el método del factor Lang, el método del factor Hand y el método factorial detallado (DFM). Para el método del factor de Lang se consideraron diferentes factores dependiendo del tipo de proceso, con un factor de 3 para sólidos, 5 para fluidos (líquidos o gases) y 4 para mezclas sólido-fluido. Así, el total calculado para cada equipo se multiplicó por el factor correspondiente. Para el método del factor Hand se aplicó un factor en función del tipo de equipo, como condensadores, calentadores, tanques a presión, entre otros. Esta información se detalla en la Tabla 6.3 del libro "Plant Design and Economics for Chemical Engineers" de los autores citados anteriormente (Sinnott, 2008). Cada uno de estos factores se multiplicó por el costo total del equipo previamente calculado. Para el DFM se consultó la Tabla 6.4 del mismo libro, donde se definen diferentes tipos de factores para tuberías, materiales, obras civiles, etc., dependiendo del tipo de proceso (sólido, fluido o mixto sólido-fluido). Estos factores se determinaron para cada

elemento del equipo, y la suma de estos factores constituyó el factor de instalación detallado que se multiplicará por el costo total del equipo previamente calculado. En consecuencia, los resultados de costos de ISBL promedio fue de \$1.063.966, mientras que para cada método fueron \$1.150.464 para el método del factor Lang, \$958.720 para el método del factor Hand y \$13.795.085 para el DFM.

### **5.1.2. Estimación de los costos de producción.**

Para estimar los costos de producción, el costo total se calculó como la suma de los costos fijos y los costos variables. Los costos fijos representan los gastos monetarios que la empresa debe pagar independientemente del nivel de producción de la planta (Yolanda, 2022). Estos costos fijos abarcan varios componentes, como costos laborales para trabajadores y supervisores, gastos de mantenimiento de plantas, impuestos a la propiedad y primas de seguros, tarifas de alquiler de tierras, cargos por permisos ambientales y una categoría de costos "varios" que representa cualquier otro gasto imprevisto. La suma total de todos estos componentes de costos fijos fue de aproximadamente a \$1.532.111,62. Por otro lado, los costos variables, son gastos que fluctúan según el nivel de producción de la planta. Para estimar los costos variables se consideraron los costos totales de las materias primas y los costos asociados al consumo de energía eléctrica, calculados a partir de análisis de balance energético. La suma total de todos los costos variables antes mencionados fue aproximadamente \$1.197.812,58. Finalmente, los costos de producción se obtuvieron sumando los costos variables y fijos, lo que resultó en un total aproximado de \$1.414.951,67.

### **5.1.3. Estimación de inversión de capital fijo y de trabajo.**

Una vez finalizado el cálculo de los costos ISBL, fue posible proceder a estimar la inversión de capital fijo, que representa los recursos monetarios necesarios para la implementación del proyecto (Pérez, 2023). Esto implicó sumar los costos ISBL, los costos OSBL, los costos de ingeniería y construcción y los costos de contingencia. Los costes de OSBL, que incluyen los

gastos de infraestructura de la planta, se estimaron en un 20% de los costes de ISBL. Los costos de ingeniería y construcción se determinaron tomando el 5% de los costos ISBL calculados. Por último, los costos de contingencia para eventos imprevistos se calcularon como el 10% de los costos combinados de ISBL y OSBL (Sinnott, 2008). En última instancia, todos estos componentes de costos se agregaron para obtener los resultados de la inversión en capital fijo. Lo cual se calculó valores para ISBL de \$1.063.966,40, costos de OSBL \$212.793,28, costos de ingeniería, diseño y construcción de \$127.675,97, costos para imprevistos de \$127.675,97 y finalmente la suma de todos estos costos mencionados anteriormente fue el capital fijo de \$1.532.111,62. Para la estimación del capital de trabajo, se consideraron varios factores: un costo de materia prima de dos semanas para la producción, un costo de producción de dos semanas para estimar el costo de los productos, un costo de producción de una semana para estimar el efectivo disponible, un costo de producción de cuatro semanas para estimar el costo de los productos, costo de materia prima semanal para la producción para estimar las cuentas por cobrar, y un costo de repuestos estimado en 1,1% de los costos combinados de ISBL y OSBL. La suma de todos estos componentes dio como resultado un costo de capital de trabajo de \$10.728.621,50.

## **5.2. Evaluación de la rentabilidad del proyecto**

El método empleado para evaluar la rentabilidad del proceso se detalla con más precisión en el Anexo A8. A continuación, se muestran los resultados clave obtenidos de la evaluación de la rentabilidad del proyecto.

### **5.2.1. Descripción del flujo de caja del proyecto.**

El flujo de caja representa la cantidad de dinero generada por el proyecto, abarcando tanto las entradas como las salidas a lo largo de los años (Cuesta-Vidal, 2021). Su cálculo implica considerar los ingresos y gastos incurridos por la empresa cada año, ya que la diferencia entre ingresos y gastos da como resultado el flujo de caja neto. Esta métrica se emplea para evaluar

la viabilidad de implementación del proyecto. Para calcular los ingresos netos del proyecto, primero se calcula el ingreso bruto con base en los costos de producción y los precios de los productos, ya que el ingreso neto será el resto del ingreso bruto después de deducir un impuesto del 15%. Además, se calculó el flujo de caja acumulado durante un período de diez años. Para ello se precisó que el flujo de caja y el flujo de caja acumulado del primer año serían los mismos. A partir del segundo año, el flujo de caja acumulado sería la suma del flujo de caja acumulado del año anterior y el flujo de caja del año en curso. Es importante señalar que los flujos de efectivo negativos indican que la salida de efectivo es significativamente mayor que la entrada de efectivo, mientras que los valores positivos representan el escenario opuesto. Además, la figura 7 revela que los flujos de caja serán negativos durante los primeros cuatro años; Sin embargo, a partir del sexto año se vuelven positivos, lo que implica un período de recuperación aproximado de seis años.

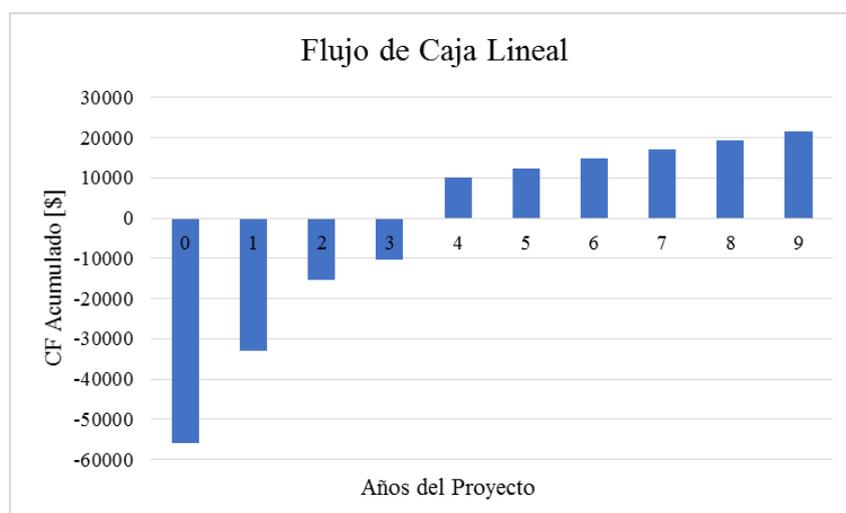


Figura 6. Curva del flujo de caja lineal acumulado a diferentes años del proyecto.

### 5.2.2. Indicadores de rentabilidad.

Para la evaluación financiera del proyecto, se empleó el estudio en base al flujo de caja fijo para derivar la métrica del valor presente neto (VAN), complementada con el cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación (PRI) como indicadores de rentabilidad

complementarios. Se toma en cuenta márgenes de ganancia del 100%, del 75%, del 70% y del 66% para la evaluación del mejor escenario para la implementación del mismo.

Tabla 2. Resumen de indicadores de rentabilidad por margen de ganancia.

<b>Margen de ganancia</b>	<b>Precio de venta del producto [\$/kw]</b>	<b>Valor actual Neto (VAN) [M\$]</b>	<b>Taza interna de retorno (TIR)</b>	<b>Tiempo de recuperación de inversión [años]</b>	<b>Retorno de inversión (ROI)</b>
100%	\$0,25	\$10,74	88,00%	3,93	55,99%
75%	\$0,15	\$12,55	42,02%	6,25	22,39%
70%	\$0,10	\$11,47	50,00%	7,76	26,00%
66%	\$0,06	\$11,80	13,00%	8,55	45,38%

La métrica del valor presente neto (VAN) se obtuvo descontando y sumando todos los flujos de efectivo futuros proyectados asociados con el proyecto, utilizando una tasa de rendimiento mínima atractiva (MARR), también conocida como tasa de descuento, como factor de descuento (Mete, 2015). El VAN cuantifica, en términos de valor presente, la rentabilidad prevista del emprendimiento. La interpretación de los valores del VAN obtenidos es la siguiente: Un VAN positivo significa que el valor presente de las entradas de efectivo excede al de las salidas de efectivo, lo que indica una oportunidad de inversión financieramente viable con perspectivas de ganancias económicas. Por el contrario, un VAN negativo implica que el valor presente de las salidas de efectivo excede las entradas, lo que hace que el proyecto sea económicamente inviable (Cordero, 2012). Un VAN de exactamente cero representa un escenario de equilibrio en el que no se anticipan pérdidas ni ganancias, se puede ver en la figura 7 mientras que los escenarios mencionados gráficamente en el Anexo A7.

Para el proyecto bajo consideración, el valor presente neto (VPN) calculado fue de \$2.549.203,47 millones indica que se esperan retornos económicos positivos. Después de determinar el VAN, se calculó la tasa interna de rendimiento (TIR). La TIR es una métrica de rentabilidad que representa la tasa de descuento a la que el VPN de todos los flujos de efectivo

es igual a cero. Es deseable una TIR más alta en relación con la TMAR, ya que implica que el proyecto genera rendimientos que exceden la tasa mínima requerida, lo que significa rentabilidad. Para este esfuerzo, se determinó una TIR del 42.02%, con un margen de ganancia del 70% utilizando una tasa de interés del 15%, lo que indica que la inversión es financieramente atractiva. Además, se evaluó el período de recuperación (PRI), que estima el tiempo necesario para recuperar el desembolso de capital inicial a través de las entradas de efectivo proyectadas. Un PRI más corto aumenta el atractivo de un proyecto para los inversores (Sinnott, 2008). Este proyecto exhibió un PRI de 6,25 años en el escenario ideal mencionado anteriormente, lo que atribuye a los sustanciales gastos de capital asociados con el establecimiento de instalaciones de producción de energía.

### **5.2.3. Análisis de sensibilidad.**

Para este análisis se han evaluado cuatro escenarios distintos: el primero implica variar el precio de compra de una de las materias primas en un 20%, el segundo implica variar el precio de venta del producto final en un 20%, el tercero implica variar el precio de compra de electricidad para la planta y el cuarto implica analizar si implica un beneficio o no, la reutilización del agua generada para la planta. Todos estos escenarios se incrementaron en un 20% gracias al libro “Principios, práctica y economía del diseño de plantas y procesos” (Sinnott, 2008). El objetivo de este análisis de flexibilidad es determinar los precios de venta mínimos viables para los productos, así como los precios de compra máximos permitidos para las materias primas. La tabla 3 resume todos los precios variados por escenario junto con el valor presente neto para cada caso. Cada precio representa los límites inferiores y superiores más allá de los cuales el proyecto ya no sería rentable.

Tabla 3. Valores determinados variables e ideales para cada escenario para la implementación del proyecto.

Escenarios	Caso	Valores Variados	Valor Presente Neto
1	Variación	\$0,20	\$ 109.934,77
	Ideal	\$0,00	\$ 2.549.203,47
2	Variación	\$0,60	\$ 280.893,73
	Ideal	\$0,15	\$ 2.549.203,47
3	Variación	\$0,95	\$ 629.586,85
	Ideal	\$0,79	\$ 2.549.203,47
4	Variación	7123,29	\$ 634.134,31
	Ideal	6453,29	\$ 2.549.203,47

Los precios ideales representan los valores establecidos anteriormente, mientras que los precios con variación corresponden a los costos máximos permisibles de adquisición de materias primas, de venta de producto y de reutilización de materia prima. En la figura 9 se puede observar de manera gráfica como afectarían estas modificaciones para la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

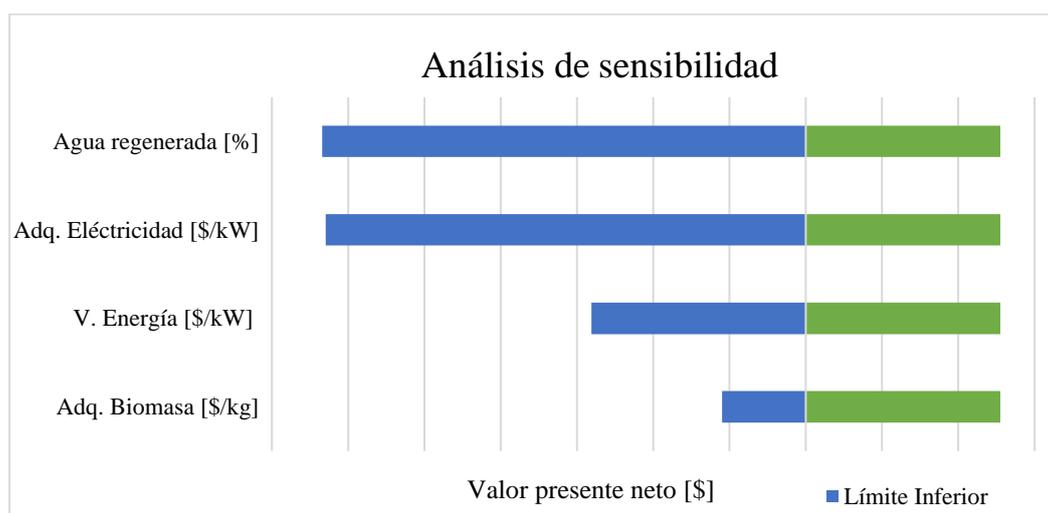


Figura 7. Análisis de sensibilidad VPN de la planta en una vida útil de 10 años.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base al diseño del proceso, el diseño de la planta y el análisis económico de viabilidad y rentabilidad del proyecto de diseño de una planta para la valorización de residuos de cáscara de cacao por carbonización hidrotérmica para la generación de energía eléctrica en Ecuador se concluye de manera general que es factible la implementación de este en el país. A pesar de las limitaciones de los últimos años existen ya empresas productoras en la región costera que no reúsan los grandes volúmenes de cáscara de cacao. Con esta disponibilidad de materia prima y su costo favorable, se concluye que es viable establecer el proyecto en la provincia de Guayas, donde se encuentra la mayor parte de este recurso. Esta conclusión se basa en un análisis exhaustivo del diseño global del proyecto, especialmente en el análisis económico del capítulo seis, a pesar de un largo período para recuperar la inversión, el proyecto sería rentable, según los indicadores de rentabilidad. Asimismo, tras llevar a cabo el análisis experimental utilizando el reactor de carbonización hidrotérmica bajo condiciones específicas de operación, se concluye que el proceso es adecuado para obtener el producto principal: energía eléctrica. La simulación del proceso confirmó que el uso de hidrocarbón derivado de la cáscara de cacao como materia prima es una opción óptima para la biomasa, debido a su alto contenido energético, lo que permite una producción eficiente de energía. Por lo tanto, se podría evaluar a esta biomasa para poder funcionar como materia prima para otro tipo de investigaciones e industrias relacionadas. Todas las pruebas y análisis experimentales realizadas en el proyecto ayudaron a determinar que las condiciones de operación óptimas para obtener un producto ideal energético son a una temperatura de 250°C durante 1 hora de operación en el reactor HTC. Así, comprobado la funcionalidad del diseño de proceso experimental se diseñó a escala industrial considerando todas las operaciones unitarias requeridas, además de definir que la materia prima requiere de un pretratamiento de trituración y secado para mejorar sus propiedades energéticas. Asimismo, se tuvo en cuenta el potencial tratamiento de uno de los subproductos obtenidos en el proceso

HTC, el licor de HTC obtenido, para que funcione como una investigación adicional o la posible venta al mercado de este subproducto. Una vez diseñada la planta, se pudo realizar el análisis de seguridad HAZOP para evaluar el equipo más peligroso de la planta, que en este caso fue el reactor HTC, el ciclo Rankine y el generador de energía, por sus altas condiciones de operación de temperatura y presión. Se consideraron las causas, efectos y soluciones a tomar según las consecuencias que pudieran ocurrir. Esto ayudó a determinar los cambios e implementaciones de equipos de control que se necesitan en la planta para asegurar el proceso y para poder realizar el diagrama PI&D, por lo que es necesario tener un correcto mantenimiento de todos los equipos utilizados y seguir todas las salvaguardas y recomendaciones para garantizar la seguridad no solo del proceso sino también de los empleados. Tras considerar los costos de equipos, implementación de equipos, materias primas, capital de trabajo, inversión de capital fijo, costos de energía y costos de mano de obra operativa, se concluyó que el proyecto será rentable tras unos seis años, donde la inversión de capital fijo se reducirá y recuperará. Aunque es un tiempo de recuperación medio, el proyecto es rentable porque su valor actual neto es de \$12.552.246,16 y obtiene una tasa interna de retorno del 42.02 %, lo que significa que tras evaluar la situación de la empresa durante los años. El proyecto será rentable, ya que el valor actual neto es mayor que cero y la tasa interna de retorno es mayor que la tasa de retorno mínima aceptable, que es del 20%. Finalmente, como recomendaciones para trabajos futuros, se sugiere investigar más sobre el proceso de carbonización hidrotérmica a nivel industrial, ya que a partir del año 2017 se ha comenzado a implementar en industrias de solo 3 países a nivel mundial: Suiza, España y México. Por lo tanto, es necesario investigar qué pasaría si se utilizan otras biomásas distintas a la cáscara de cacao. Además, se sugiere optimizar la planta de producción diseñada en este trabajo y si se pueden abaratar costos cambiando aspectos considerados en el diseño del proceso, como equipos, procesos de conversión térmica, entre otros.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroforestry Systems. (2024). Obtenido de Agroforestry Systems:  
<https://doi.org/10.3390/f15010195>
- Atlas Bioenergético de la República del Ecuador. (2014). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Quito: Atlas Bioenergético de la República del Ecuador.
- Avadí. (2023). Obtenido de International Journal of Life Cycle Assessment, :  
<https://doi.org/10.1007/S11367-023-02142-4>
- Azargohar. (2017). *ACS Publications*. Obtenido de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/bk-2007-0954.ch029>
- Barry Callebaut Agrilogic. (2023). *Farmer yield and income in Côte d'Ivoire: An analysis of Farmer Field Books*.
- Batista-Marín. (2020). *Dialnet*. Obtenido de  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=286207>
- Benson. (2024). *Heliyon*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23604>
- Blanco. (2018). *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*. Obtenido de  
<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7088/BVE18040224e.pdf?sequence=1>
- Camargo. (2018). *Repositorio Universidad Libre Colombia*. Obtenido de  
<https://repository.unilivre.edu.co/handle/10901/11026?show=full>
- Capaci, B. d. (2023). *ChemEngineering*. Obtenido de  
<https://doi.org/10.3390/chemengineering7030044>
- Castillo. (2020). Estudio de los recursos potenciales endógenos para el desarrollo en zonas rurales: Diagnostico de la parroquia Virgen de Fátima. *Espacios*, 41 (14).
- Cordero. (2012). *Repositorio Universidad Internacional SEK Quito*. Obtenido de  
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2070/3/CORDERO%20BAQUERO%20MARIA%20FLORENCIA.pdf>
- Cuesta-Vidal. (2021). *Ciencia Matria*. Obtenido de  
<https://www.cienciamatriarevista.org.ve/index.php/cm/article/view/519>
- Diboma, B. S., Mfomo, J. Z., Ndiwe, B., Bôt, B. V. (2024). *Energy Reports*. Obtenido de  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.20>
- Dufour. (2024). *Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA)*. Obtenido de  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586123004868?via%3Dihub>
- Ecoembres*. (2024). Obtenido de <https://reducereutilizarecicla.org/las-3rs/>

- Empresa Cantonal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil. (2023). *Reglamento Tarifario Vigente de Ecuador*. Obtenido de [https://www.interagua.com.ec/sites/default/files/2023-03/anexo\\_9.pdf](https://www.interagua.com.ec/sites/default/files/2023-03/anexo_9.pdf)
- Encuestas de Producción Agropecuaria Continua. (2015). *Atlas Bioenergético de la República del Ecuador*. Consultora ESIN.
- Estevam. (2024). *Algal Research*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103417>
- Fuentes. (2023). *Repositorio de la Universidad de El Salvador*. Obtenido de <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/34977/>
- Funke. (2010). *Bioproducts and Biorefining*. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/BBB.198>
- Giacometto. (2018). *Repositorio Universidad del Norte de Colombia*. Obtenido de <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8028>
- Gutiérrez. (2015). *Repositorio de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*. Obtenido de <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/766a24c5-191c-49e5-9f0b-3413989b632e/content>
- Herguedas. (2023). *Tecnológico Agrario y Agroalimentario*. Obtenido de <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Libra. (2011). *Biofuels*. Obtenido de <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Liu. (2024). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106315>
- Liu. (2024). *Management*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.032>
- Luo. (2016). *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2436975>
- Marafi. (2024). *Environmental Science and Pollution Research*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32236-x>
- Mateus. (2023). *Repositorio de la Universidad San Francisco de Quito*. Obtenido de <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/12825>
- Mazari. (2015). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjce.22293>
- Mete. (2015). *Scielo*. Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-081X2014000100006](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2014000100006)
- Meteosolana. (2024). *Meteosolana*. Obtenido de <https://ec.meteosolana.net/guayas/clima-en-virgen-de-fatima>
- Montenegro. (2023). *Journal of Animal and Plant Sciences*. Obtenido de <https://doi.org/10.36899/JAPS.2023.6.0671>

- Naciones Unidas. (2024). *Naciones Unidas*. Obtenido de <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sostenibilidad>
- nstituto Nacional de Eficiencia Energética. (2022). *Gobierno del Ecuador*. Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec/18-mil-plantas-de-cacao-aportaran-a-la-produccion-de-cacao-en-rioverde/>
- Ortiz. (2019). *Revista Redalyc*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4263/426360099004/html/>
- Owusu. (2023). *Journal of Agriculture and Food Research*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100641>
- Pérez. (2023). *OBS Business School*. Obtenido de <https://www.obsbusiness.school/blog/elementos-claves-en-el-estudio-economico-de-un-proyecto>
- Ponce. (2021). *Biomass Conversion and Biorefnery*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01854-7>
- Rauscher. (Junio de 2019). *Science Direct*. Obtenido de [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237018308398?casa\\_token=vzUjSIJMyDwAAAAA:vwT1ulffFeKKU0BoSKkPMEDlljtqYypSVIJJgZQNyh9XN4NprWrqGXSJAnJi8W-2KJG8e39J](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237018308398?casa_token=vzUjSIJMyDwAAAAA:vwT1ulffFeKKU0BoSKkPMEDlljtqYypSVIJJgZQNyh9XN4NprWrqGXSJAnJi8W-2KJG8e39J)
- Reza. (2015). *Bioresource Technology*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.052>
- Rueda. (2023). *Repositorio de la Universidad San Francisco de Quito*. Obtenido de <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/12781>
- Sharma. (2020). *Journal of Cleaner Production*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124295>
- Sinnott. (2008). *Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Elsevier.
- Solís. (2023). *Repositorio de la Universidad San Francisco de Quito*.
- Syamsiro. (2024). *Science Direct*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082611000834>
- Teneda. (2015). *Universidad Técnica de Ambato*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/11981>
- Velazquez-Araque. (2016). A preliminary study of pelletized ecuadorian cocoa pod husk for its use as a source of renewable energy. *Cybernetics and Informatics*, 2, 29–33.
- Yolanda, R. (2022). Clasificación de Costos. En R. Yolanda. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Zapata. (2024). *Heliyon*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24544>

## ANEXO A. METODOLOGÍA Y CÁLCULOS

### Anexo A1. Objetivos específicos, actividades relacionadas y procedimientos

Tabla 4. Metodología para la toma de decisiones y de objetivos para el proyecto.

<b>Objetivo general</b>	
Diseñar una planta para la transformación de residuos agrícolas usando carbonización hidrotérmica para la generación de energía renovable a partir de la cáscara de cacao.	
<b>Objetivos específicos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>› Seleccionar tecnologías innovadoras para la implementación de conversión térmica de los residuos de cáscara de cacao.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Desarrollar un diseño de proceso que utilice una cantidad de residuos agrícolas disponibles.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>› Desarrollar el diseño de un proceso para la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Realizar un análisis de viabilidad técnica y económica del proceso de generación de energía para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de la planta.</li> </ul>
<b>Actividades a realizarse</b>	
<b>Objetivo específico 1</b>	<b>Objetivo específico 2</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>› Estudio de literatura sobre tecnologías de conversión térmica de los residuos.</li> <li>› Análisis de la aplicabilidad de las tecnologías de HTC y su eficiencia en la transformación de los residuos.</li> <li>› Comparación de los impactos ambientales potenciales de HTC.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Diseñar mejoras en la planta de carbonización hidrotérmica, considerando tecnologías de control automático y monitoreo en tiempo real.</li> <li>› Comparación de procesos para observar el rendimiento y eficiencia de las tecnologías HTC.</li> </ul>
<b>Objetivo específico 3</b>	<b>Objetivo específico 4</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>› Realizar un análisis exhaustivo de las diferentes fuentes de energía renovable para identificar cuál es la más adecuada para el entorno y las necesidades del proyecto.</li> <li>› Desarrollar el diseño del proceso que transformará la energía renovable en electricidad, seleccionando los equipos y tecnologías más adecuados para el sistema.</li> <li>› Crear un plan detallado que incluya las fases de implementación, el cronograma, los costos estimados y las estrategias para abordar posibles desafíos técnicos y logísticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Análisis de HAZOP para evaluar los posibles riesgos en cada etapa del proceso de generación de energía.</li> <li>› Uso eficiente del agua y sistemas de recolección de lluvia para reducir la dependencia de fuentes externas.</li> <li>› Implementar medidas para reducir las emisiones, como la captura y utilización de subproductos gaseosos generados durante la carbonización hidrotérmica.</li> </ul>

## Anexo A2. Simulaciones del proceso

Specifications

State variables

Substream name:  CIPSD

Temperature: 250 C

Pressure: 1 MPa

Total flow basis: Mass

Total flow rate: 26000 tonne/year

Composition

Mass-Frac

Component	Value
CARBO-01	0,6
Total	0,6

Figura 8. Valores de entrada para la etapa de trituración.

Component Attribute

Particle Size Distribution

PSD mesh ID: PSD Units: mm

Populate PSD using:

User-specified values

A distribution function

Distribution function Type: Normal

Calculate

Interval	Lower limit	Upper limit	Weight fraction	Cumulative weight fraction
1	0,793701	1	0	
2	1	1,25992	0	
3	1,25992	1,5874	0	
4	1,5874	2	0	
5	2	2,51984	0	
6	2,51984	3,1748	0	
7	3,1748	4	0,4	0,4
8	4	5,03968	0,2	0,6
9	5,03968	6,3496	0,2	0,8
10	6,3496	8	0,2	1

Figura 9. Valores de la malla del equipo para el proceso de triturado.

Main Flowsheet × REACHTC (RCSTR) - Results × +	
Summary Balance Reaction Kinetics Component Generation Rates Custom	
▶ Outlet temperature	250 C
▶ Outlet pressure	3 bar
▶ Outlet vapor fraction	0,903627
▶ Heat duty	48,8306 cal/sec
▶ Net heat duty	48,8306 cal/sec
▶ Volume	
▶ Reactor	32000 l
▶ Vapor phase	31991,9 l
▶ Liquid phase	
▶ Liquid 1 phase	
▶ Salt phase	
▶ Condensed phase	8,1398 l
▶ Residence time	
▶ Reactor	0,00522257 hr
▶ Vapor phase	0,00522257 hr
▶ Condensed phase	

Figura 10. Valores generados por la simulación para la temperatura del reactor.

Main Flowsheet × REACHTC (RCSTR) - Results × +					
Summary Balance Reaction Kinetics Component Generation Rates Custom Reaction Variables Utility Usage					
	Total	Units	In	Out	Relative difference
▶ Mole		kmol/hr	714,168	714,168	-1,59188e-16
▶ Mass		kg/hr	5656,72	5656,72	0
▶ Enthalpy		cal/sec	-807466	-807418	-6,04738e-05

Figura 11. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el reactor.

Main Flowsheet × FILTRAD (Filter) - Results × +	
Summary   Balance   Cake moisture   ⚠ Status	
Fraction of solids to solid outlet	0,6
Fraction of liquid to liquid outlet	0
Solid load of liquid outlet	0
Liquid load of solid outlet	0
D50 of separation curve	0,00389207 meter
Heat duty	-6,06129e-05 cal/sec

Figura 12. Valores generados por la simulación para la fracción de sólidos en la salida del filtrado.

Main Flowsheet × FILTRAD (Filter) - Results × +					
Summary   Balance   Cake moisture   ⚠ Status					
	Total	Units	In	Out	Relative difference
▶ Mole		kmol/hr	714,168	714,168	-1,59188e-16
▶ Mass		tons/year	54660,1	54660,1	0
▶ Enthalpy		cal/sec	-807418	-807418	7,50701e-11

Figura 13. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el proceso de filtrado.

Main Flowsheet × EVAPOR (Flash2) - Results × +	
Summary   Balance   Phase Equilibrium   Utility Usage   ⚠ Status	
Outlet temperature	2000 C
Outlet pressure	2 MPa
Vapor fraction (Mole)	1
Vapor fraction (Mass)	0,915123
Heat duty	3,41802e+07 kJ/hr
Net duty	3,41802e+07 kJ/hr
1st liquid / Total liquid	
Pressure drop	-1 MPa

Figura 14. Valores generados por la simulación para la temperatura de entrada y de salida para el proceso de evaporación.

Main Flowsheet × EVAPOR (Flash2) - Results × +					
Summary Balance Phase Equilibrium Utility Usage Status					
	Total	Units	In	Out	Relative difference
▶ Mole		kmol/hr	538,987	538,987	0
▶ Mass		tons/year	34328,4	34328,4	0
▶ Enthalpy		cal/sec	-839280	1,42844e+06	-1,58755

Figura 15. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el evaporador.

Main Flowsheet × CONDEN (Heater) - Results × +		
Summary Balance Phase Equilibrium Utility Usage Status		
Outlet temperature	200	C
Outlet pressure	1	MPa
Vapor fraction	0	
Heat duty	-5,15215e+07	kJ/hr
Net duty	-5,15215e+07	kJ/hr
1st liquid / Total liquid	1	
Pressure-drop correlation parameter		
Pressure drop	1	MPa

Figura 16. Valores generados por la simulación para la temperatura de entrada y de salida para el proceso de condensado.

Main Flowsheet × CONDEN (Heater) - Results × +					
Summary Balance Phase Equilibrium Utility Usage Status					
	Total	Units	In	Out	Relative difference
▶ Mole		kmol/hr	422,199	422,199	0
▶ Mass		tons/year	20774	20774	0
▶ Enthalpy		cal/sec	803989	-2,61426e+06	1,30754

Figura 17. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el condensador.

Main Flowsheet × SECAD (Dryer) - Results × +							
Summary		Balance	Evaporation	Profiles	Evaporation Rate	Utility Usage	Status
	Total	Units	In	Out	Relative difference		
▶	Mole	kmol/hr	175,181	175,181			
▶	Mass	tons/year	20331,6	20331,6			
▶	Enthalpy	cal/sec	31862,8	31862,8			

Figura 18. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para el secador.

Main Flowsheet × TURBI (Compr) - Results × +							
Summary		Balance	Parameters	Performance	Regression	Utility Usage	Status
	Total	Units	In	Out	Relative difference		
▶	Mole	kmol/hr	175,181	161,084	0,0804733		
▶	Mass	tons/year	20331,6	18695,5	0,0804733		
▶	Enthalpy	cal/sec	31862,8	29298,7	0,0804733		

Figura 19. Valores de balance de masa de entrada obtenidos de la simulación para la turbina.

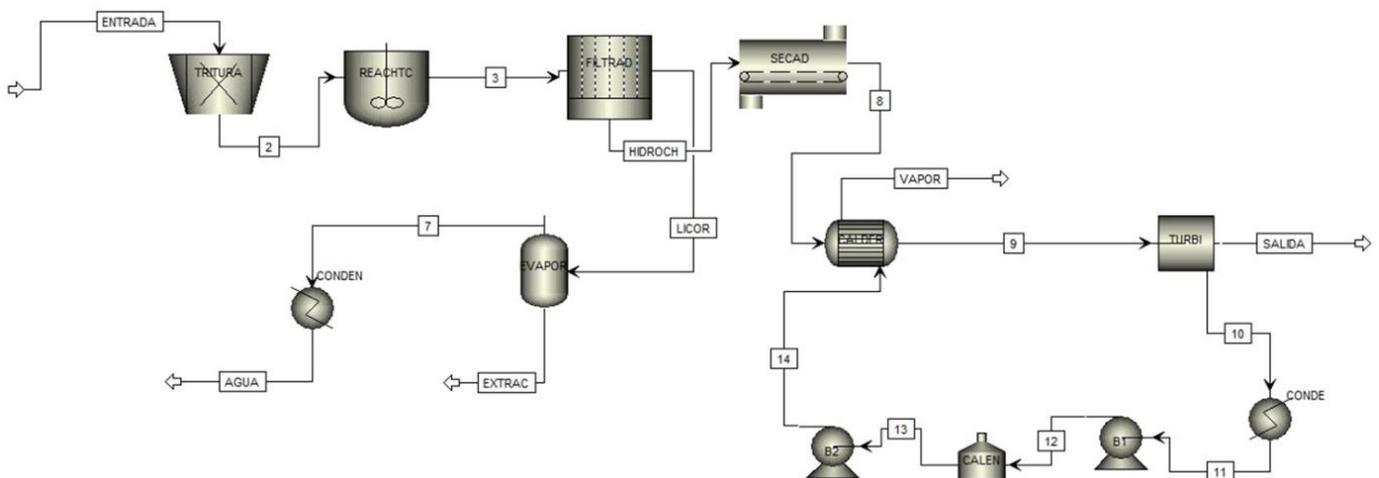


Figura 20. Simulación completa del proceso.



Tabla 8. Balance de masa de evaporador.

4. Evaporador								
Entrada			Salida					
Caudal másico [ton/año]		24363,846	Caudal 7			Extracto		
Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal másico [ton/año]		20774	Caudal másico [ton/año]		3589,846
WATER	11388	0,438	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]
CARBO-01	3589,846	0,201	WATER	11388	0,438	WATER	0	0,438
HYDRO-01	6786	0,261	CARBO-01	0,000	0,201	CARBO-01	3589,846	0,201
OXYGE-01	2600	0,1	HYDRO-01	6786	0,261	HYDRO-01	0	0,261
			OXYGE-01	2600	0,1	OXYGE-01	0	0,1

Tabla 9. Balance de masa del condensador.

5. Condensador					
Entrada			Salida		
Caudal másico [ton/año]		20774	Caudal másico [ton/año]		20774
Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]
WATER	11388	0,438	WATER	11388	0,438
CARBO-01	0	0,201	CARBO-01	0	0,201
HYDRO-01	6786	0,261	HYDRO-01	6786	0,261
OXYGE-01	2600	0,1	OXYGE-01	2600	0,1

Tabla 10. Balance de masa del secado.

6. Secado					
Entrada			Salida		
Caudal másico [ton/año]		1636,154	Caudal másico [ton/año]		1636,154
Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]
WATER	818,07	0,5	WATER	818,07	0,5
CARBO-01	818,07	0,5	CARBO-01	818,07	0,5
HYDRO-01	0	0	HYDRO-01	0	0
OXYGE-01	0	0	OXYGE-01	0	0

Tabla 11. Balance de masa para el ciclo Rankine.

<b>7. Ciclo cerrado Rankine</b>											
<b>Entrada</b>						<b>Salida</b>					
<i>Caudal 8</i>			<i>Caudal 14</i>			<i>Caudal 9</i>			<i>Vapor</i>		
Caudal másico [ton/año]		1636,154	Caudal másico [ton/año]		1636,154	Caudal másico [ton/año]		1636,154	Caudal másico [ton/año]		1636,154
Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]
WATER	818,07	0,5	WATER	818,07	0,5	WATER	818,07	0,5	WATER	818,07	0,5
CARBO-01	818,07	0,5	CARBO-01	818,07	0,5	CARBO-01	818,07	0,5	CARBO-01	818,07	0,5
HYDRO-01	0	0	HYDRO-01	0	0	HYDRO-01	0	0	HYDRO-01	0	0
OXYGE-01	0	0	OXYGE-01	0	0	OXYGE-01	0	0	OXYGE-01	0	0

Tabla 12. Balance de masa para la turbina.

<b>8. Turbina</b>					
<b>Entrada</b>			<b>Salida</b>		
Caudal másico [ton/año]		20.331,6	Caudal másico [ton/año]		20.331,6
Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]	Caudal [ton/año]		Composición en fracción másica [%]
WATER	1016,8	0,5	WATER	1016,8	0,5
CARBO-01	1016,8	0,5	CARBO-01	1016,8	0,5
HYDRO-01	0	0	HYDRO-01	0	0
OXYGE-01	0	0	OXYGE-01	0	0

#### Anexo A4. Demanda energética de los equipos

Tabla 13. Valores de potencia para cada equipo del proceso.

<b>Equipo</b>	<b>Potencia [kW]</b>
Triturado	10
Reactor HTC	50
Tanque almacenado	0
Filtrado	2
Evaporador	100
Condensador	0
Secado	10
Caldera	25
Calentador	5
Turbina	1000
Generador	1000
<b>Total</b>	<b>2202</b>

Tabla 14. Base de cálculo de la producción energética por tonelada al año.

Biomasa cacao [T]	Biomasa cacao seco [kg/s]	Hidrocarbón cacao x rendimiento [kg/s]	Energía termica generada x unidad de tiempo [MJ/s]	Energía eléctrica [MW]
20.331,6	0,644	0,246	4,309	1,292

## Anexo A5. Análisis de seguridad HAZOP

Tabla 15. Análisis de seguridad para la etapa 1 de la entrada de materia prima.

Etapa 1: Entrada de Materia Prima						
	Equipo	Intención	Palabra Guía	Desviación	Causa	Consecuencia/Acción
<b>Línea</b>	<i>102. Transferir la materia prima hacia el triturador.</i>					
	Trituradora	Entrada de materia prima hacia el triturador.	No	Flujo	Falla de válvula	Posible ingreso de materia prima sin procesar.
<b>Línea</b>	<i>103. Salida e ingreso de cáscara de cacao triturada hacia reactor HTC.</i>					
	Reactor HTC	Eliminación de impurezas y la saturación de materia prima a 250°C y 3 bar de presión.	Parte de	Temperatura y Presión	Fallo de reactor	Disminución de temperaturas y presiones/Controlador de nivel de flujo, de presión y temperatura
<b>Línea</b>	<i>104. Salida de hidrocarbón hacia tanque de almacenamiento.</i>					
	Tanque de Almacenamiento	Almacenar el hidrocarbón producido a 25°C y 1 bar de presión.	Más	Flujo	Falla de válvula	Fallo de ingreso del hidrocarbón o posibles pérdidas/Controlador de tasa de flujo, de presión y de temperatura.
<b>Línea</b>	<i>105-106. Salida del hidrocarbónr hacia el filtrado.</i>					
	Filtrado	Eliminar el contenido líquido del hidrocarbón hacia el evaporador, tamaño de partícula aproximado de 0,1 µm.	Más	Flujo	Falla de válvula	Acumulación del líquido en el filtrado, posible generación de torta de filtrado/Controlador de flujo, de captura de partículas, de grano.
<b>Línea</b>	<i>122. Entrada de flujo hacia el evaporador.</i>					
	Evaporador	Ingresar el fluido obtenido del filtrado hacia el evaporador a 90°C.	Menos	Flujo	Falla de evaporador	Falla de ingreso de fluido líquido obtenido del filtrado/Controlador de flujo, presión y tasa de flujo.
<b>Línea</b>	<i>123-124. Salida de extracto de hidrocarbónr obtenido del evaporador.</i>					
	-	-	Menos	Flujo	Falla de válvula de control	Salida de extracto de hidrocarbón para otros fines de análisis.
<b>Línea</b>	<i>119. Recirculación de agua condensada de salida de evaporador.</i>					
	Reactor HTC	Ingreso de recirculación de agua condensada hacia el reactor a 250°C.	Algo de	Flujo	Falla de entrada hacia el reactor	Entrada de agua condensada como recirculación al reactor/Controlador de temperatura, de nivel, de flujo, de caudal de corriente y de estabilidad de flujo.

Tabla 16. Análisis de seguridad para la etapa 2 del tratamiento de materia prima.

<b>Etapa 2: Tratamiento de Materia Prima</b>						
	<i>Equipo</i>	<i>Intención</i>	<i>Palabra Guía</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causa</i>	<i>Consecuencia/Acción</i>
<b>Línea</b>	<i>102. Transferir la materia prima hacia el triturador.</i>					
	Secador	Secar completamente el hidrocarbón producido a 300°C	Menos	Temperatura	Falla de secado	Elevación de temperatura para producir el proceso de secado para el hidrocarbón para entrada hacia la caldera/Controlador de caudal de corriente, de nivel, de flujo, de humedad y de temperatura.
<b>Línea</b>	<i>125. Entrada de hidrocarbón seco hacia la caldera a temperatura de 300°C.</i>					
	Caldera	Calentar el hidrocarbón para producir vapor.	Algo de	Temperatura	Falla de válvula de control	Elevación de temperatura para producir vapor para alimentar a una turbina/Controlador de nivel, de temperatura, de sistema y de flujo.
<b>Línea</b>	<i>127. Entrada de vapor generado hacia la bomba.</i>					
	Bomba 1	Comprimir el vapor de la caldera a una presión más alta.	Menos	Temperatura	Falla de bomba	Elevación por compresión de vapor de la caldera a una presión más alta antes de entrar en el calentador de la caldera/Control de presión, de temperatura, de flujo y de sistema.
<b>Línea</b>	<i>116. Elevación de temperatura hacia la bomba 2.</i>					
	Calentador	Elevación de temperatura del vapor comprimida por la bomba.	Más	Temperatura	Falla de calentador	Mejora la eficiencia térmica del ciclo Rankine/Controlador de presión, de temperatura, de seguridad y alarma de nivel de flujo.
<b>Línea</b>	<i>117. Elevación de temperatura a 500°C.</i>					
	Bomba 2	Comprimir el vapor de la caldera a una presión más alta.	Más	Temperatura	Falla de bomba	Elevación por compresión de vapor de la caldera a una presión más alta antes de entrar en el generador/Control de presión, de temperatura, de flujo y de sistema.

Tabla 17. Análisis de seguridad para la etapa 3 de la generación de energía.

<b>Etapa 3: Generación de Energía</b>						
	<i>Equipo</i>	<i>Intención</i>	<i>Palabra Guía</i>	<i>Desviación</i>	<i>Causa</i>	<i>Consecuencia/Acción</i>
<b>Línea</b>	<i>112. Conversión de la energía térmica del vapor en energía eléctrica.</i>					
	Turbina	Expansión del vapor en la turbina producido por un movimiento rotativo del eje de la turbina.	Más	Temperatura	Falla turbina	Ciclo Rankine, el vapor de agua generado en la caldera se expande a través de la turbina/Controlador de presión, temperatura e indicador de flujo.
<b>Línea</b>	<i>118. Recirculación del vapor de salida de la turbina hacia el condensador.</i>					

	Condensador	El vapor de salida de la turbina sale a 300°C y disminuye durante la condensación en el condensador llegando a 50°C.	Menos	Temperatura	Falla condensador y falla válvula de control	Vapor de baja presión que sale de la turbina se envía al condensador, donde se enfría y se condensa nuevamente en agua líquida/Controlador de reducción de oxidación, presión, temperatura, de seguridad y alarma de nivel de flujo
<b>Línea</b>	<i>114-116. Entrada de vapor producido por la turbina hacia el generador de energía eléctrica.</i>					
	Generador	Generador recibe el vapor expandido proveniente de la turbina con una temperatura interna de 120°C.	Menos	Temperatura	Falla de válvulas de control	Turbina impulsa el eje del generador, se induce un campo magnético en las bobinas produciendo corriente eléctrica/Controlador de presión, de temperatura, de control crítico, de tiempo de ciclo, de setpoint, regulador proporcional y de carga compensada.

## Anexo A7. Estimación de costos

Tabla 18. Determinación de costos por metodología para la elección de equipos para el proceso.

Costos por metodología									
Equipo	Unidad	CapaTeo	S	a	b	n	Cei	Unidades	CeT
<b>Triturado</b>	ton/hora	2,97	2,97	5000	1400	0,7	\$ 7.998,17	1	\$ 7.998,17
<b>Reactor HTC</b>	m3/día	71,23	71,23	5000	1400	0,7	\$ 32.733,48	1	\$ 32.733,48
<b>Tanque almacenado</b>	m3/día	71,23	71,23	15000	990	1,1	\$ 102.287,03	2	\$ 204.574,05
<b>Filtrado</b>	m3/día	71,23	71,23	7000	71000	0,8	\$ 2.161.779,01	1	\$ 2.161.779,01
<b>Evaporador</b>	m2/día	133,50	133,50	5700	700	0,7	\$ 27.224,65	1	\$ 27.224,65
<b>Condensador</b>	l/día	113830,14	113830,14	400	9900	0,5	\$ 3.340.533,49	2	\$ 6.681.066,98
<b>Secado</b>	m2/día	89,65	89,65	110	380	1,8	\$ 1.242.889,14	1	\$ 1.242.889,14
<b>Caldera</b>	kg/h	186,78	186,78	5000	1400	0,7	\$ 59.456,80	1	\$ 59.456,80
<b>Calentador</b>	m2/día	89,65	89,65	500	1030	0,4	\$ 6.721,02	1	\$ 6.721,02
<b>Turbina</b>	kw/día	270778,54	270778,54	-950	1770	0,6	\$ 3.216.722,29	1	\$ 3.216.722,29
<b>Generador</b>	kw/día	270778,54	270778,54	500	1030	0,4	\$ 153.920,33	1	\$ 153.920,33
							\$ 10.352.265,4045	Total	\$ 13.795.085,9209

Tabla 19. Determinación de costos por catálogo para la elección de equipos para el proceso.

<b>Costos por catálogo</b>					
<b>Equipo</b>	<b>Costo catálogo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo más importación</b>	<b>Unidades</b>	<b>Total</b>
<b>Triturado</b>	\$ 35.000,00	ton/hora	\$ 49.000,00	1	\$ 49.000,00
<b>Reactor HTC</b>	\$ 10.000,00	m3/día	\$ 14.000,00	1	\$ 14.000,00
<b>Tanque almacenado</b>	\$ 1.000,00	m3/día	\$ 1.400,00	2	\$ 2.800,00
<b>Filtrado</b>	\$ 1.120,00	m3/día	\$ 1.568,00	1	\$ 1.568,00
<b>Evaporador</b>	\$ 10.000,00	m2/día	\$ 14.000,00	1	\$ 14.000,00
<b>Condensador</b>	\$ 45.000,00	l/día	\$ 63.000,00	2	\$ 126.000,00
<b>Secado</b>	\$ 19.800,00	m2/día	\$ 27.720,00	1	\$ 27.720,00
<b>Caldera</b>	\$ 3.000,00	kg/h	\$ 4.200,00	1	\$ 4.200,00
<b>Calentador</b>	\$ 3.000,00	m2/día	\$ 4.200,00	1	\$ 4.200,00
<b>Turbina</b>	\$ 100.000,00	kw/día	\$ 140.000,00	1	\$ 140.000,00
<b>Generador</b>	\$ 138.999,00	kw/día	\$ 194.598,60	1	\$ 194.598,60
<b>total</b>	\$ 366.919,00		\$ 174.888,00		\$ 239.288,00

Tabla 20. Resumen de costos ISBL para el proceso.

<b>Resumen</b>	<b>Valor [USD]</b>
Costo ISBL de acuerdo a Lang	\$ 1.150.464,0
Costo ISBL de acuerdo a Hand	\$ 958.720,0
Costo ISBL de acuerdo al método factorial detallado	\$ 1.082.715,2
<b>Promedio de los costos ISBL</b>	<b>\$ 1.063.966,4</b>

Tabla 21. Resumen de costos ISBL, OSBL, ingeniería y construcción, imprevistos y la determinación de capital fijo para el proceso.

<b>ISBL</b>	\$ 1.063.966,40
<b>OSBL</b>	\$ 212.793,28
<b>Costos de ingeniería, diseño y construcción</b>	\$ 127.675,97
<b>Costos para imprevistos</b>	\$ 127.675,97
<b>Capital fijo</b>	\$ 1.532.111,62

Tabla 22. Cálculo del capital del trabajo.

<b>Cálculo del capital de trabajo</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Costo de cáscara de cacao	\$0,00
Costo del transporte de las cáscaras de cacao	\$50,00
Costo del agua	\$0,25
Costo de producción	\$1.613,32
Margen de ganancia	70%
Precio de venta energía	\$0,15
Caudal de ingreso de cáscara	71,23

Caudal de ingreso de agua	6453,290
Producción	33123,29
Inventario de materias primas	\$ 16.633,23
Inventario de productos/ventas	\$ 165.616,45
Efectivo en caja	\$ 82.808,23
Cuentas a cobrar	\$ 33.123,29
Créditos de cuentas pendientes	\$ 10.411.287,96
Inventario de repuestos	\$ 19.151,40
<b>Capital de trabajo</b>	<b>\$ 10.728.620,54</b>

Tabla 23. Costos para la implementación y operación de la planta.

Costos para la implementación la planta [USD]		Costos para la operación de la planta [USD]	
Inversión de capital fijo	\$ 1.532.112	Costos de producción variables VCOP	\$ 1.197.811,58
Capital de trabajo	\$ 10.728.621	Costos de producción fijos FCOP	\$ 217.140
Inversión inicial total	\$ 12.260.732	Costo efectivo de producción CCOP	\$ 1.414.951,67

## Anexo A8. Evaluación de rentabilidad

Tabla 24. Descripción del flujo de caja usado para calcular la rentabilidad del proyecto.

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Ingresos anuales de la venta energía	\$ 3.974.794,80
Costo anual de las materias primas	\$ 1.414.951,67
Margen bruto de ganancias del producto	\$ 2.559.843,13
Beneficio bruto	\$ 2.559.843,13
Beneficio Neto	\$ 2.549.203,47

Tabla 25. Costos de producción fijos determinados para el proyecto.

<b>Descripción</b>	<b>Costo mensual total</b>	<b>Costo anual total</b>
<b>Salario del personal</b>	\$ 3.150,00	\$ 37.800,00
<b>Salario del personal de supervisión</b>	\$ 787,50	\$ 9.450,00
<b>Mantenimiento</b>	\$ 2.659,92	\$ 31.918,99
<b>Gastos directos</b>	\$ 1.575,00	\$ 18.900,00
<b>Impuestos</b>	\$ 886,64	\$ 10.639,66
<b>Alquiler del terreno</b>	\$ 1.063,97	\$ 12.767,60
<b>Gastos generales</b>	\$ 5.312,07	\$ 63.744,84

<b>Gastos medioambientales</b>	\$ 1.063,97	\$ 12.767,60
<b>Inventario de repuestos</b>	\$ 1.595,95	\$ 19.151,40
	<b>FCOP</b>	\$ 217.140,09

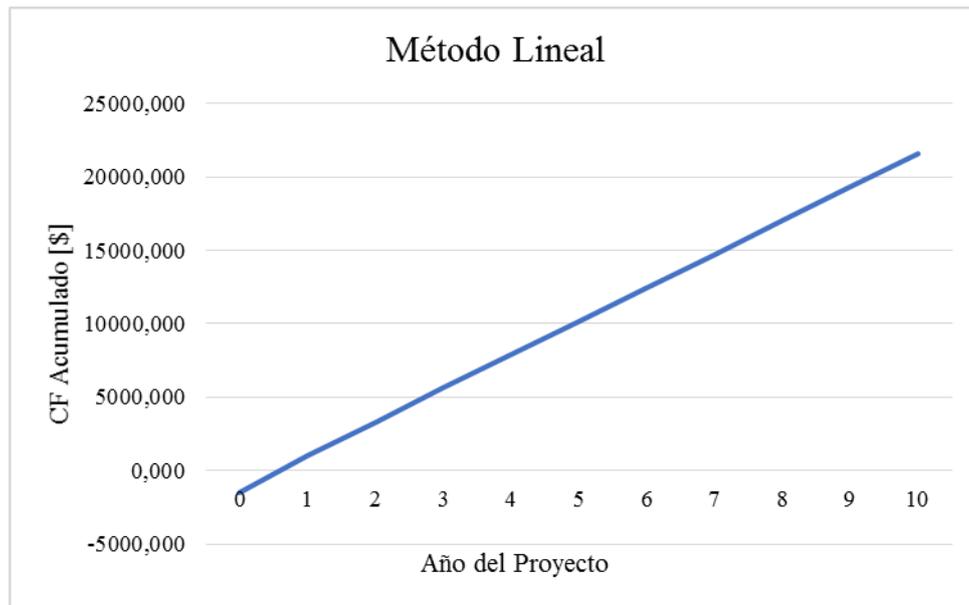


Figura 21. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal.

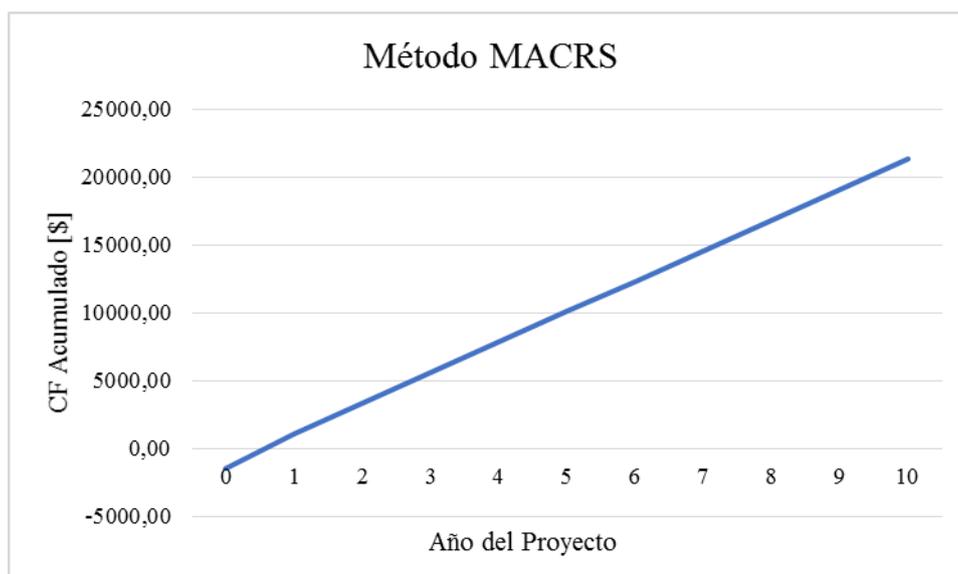


Figura 22. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS.

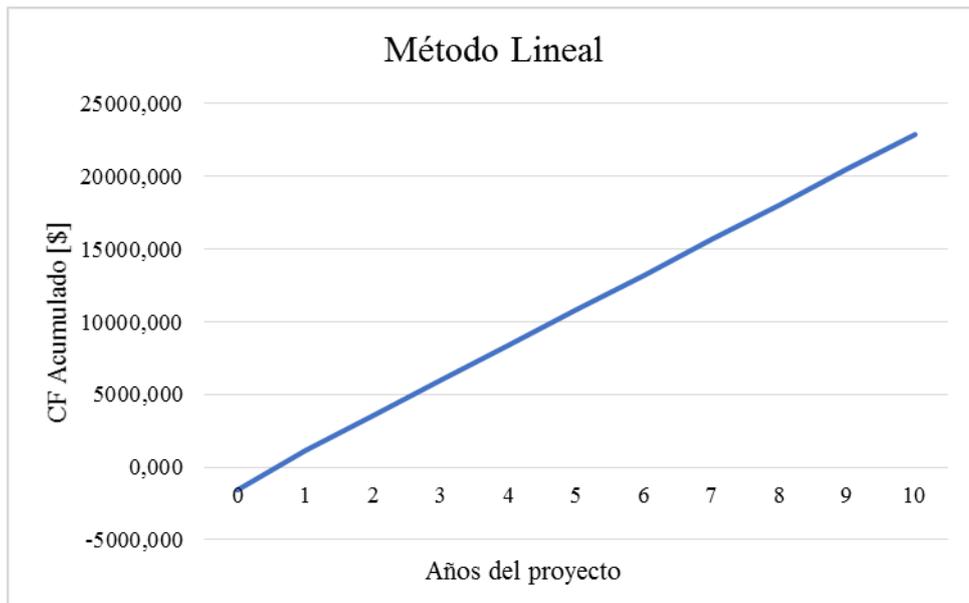


Figura 23. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 100%.

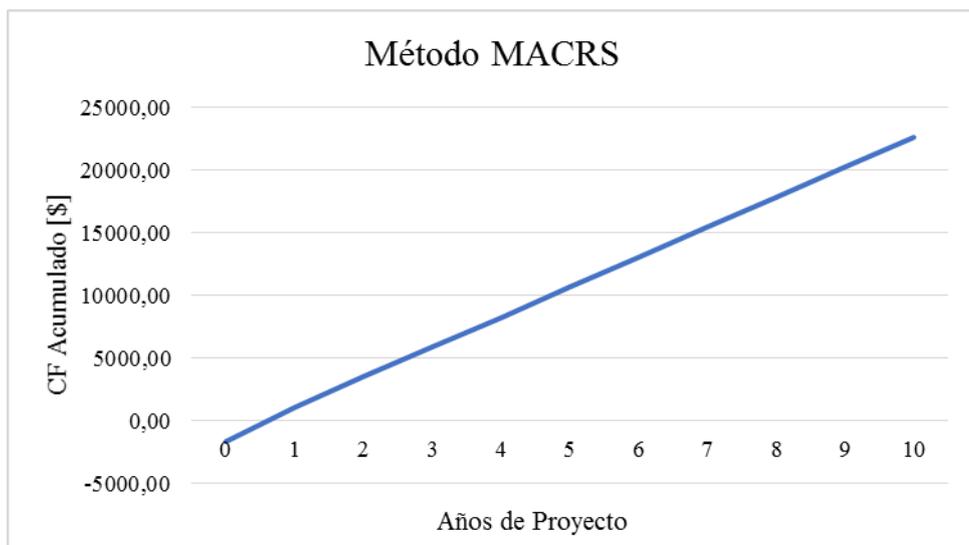


Figura 24. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 100%.

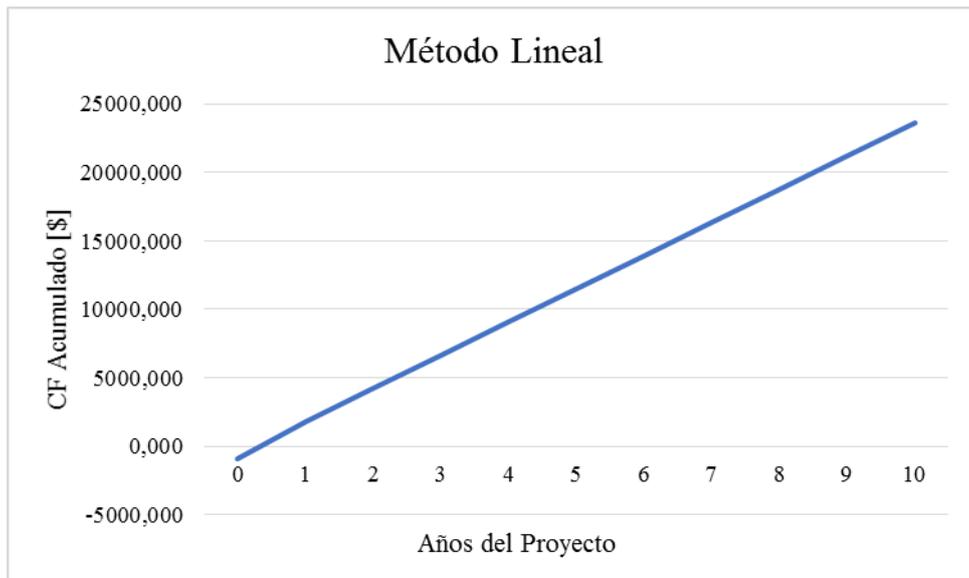


Figura 25. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 50%.

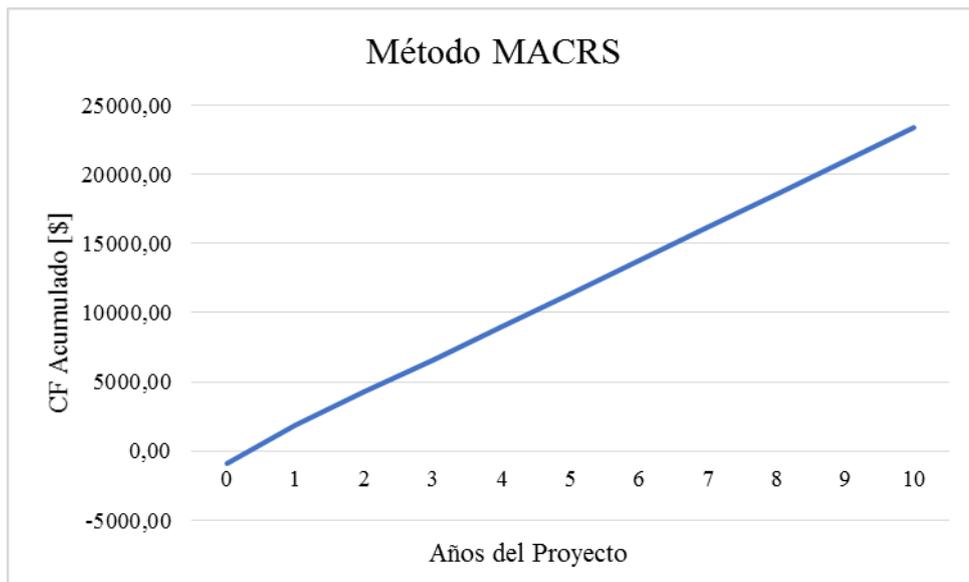


Figura 26. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 50%.

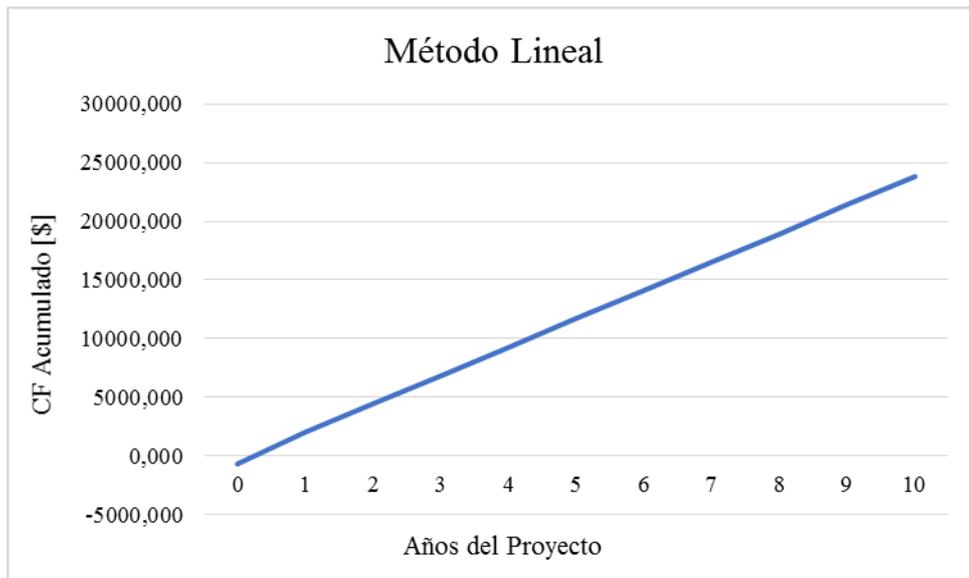


Figura 27. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 56,5%.

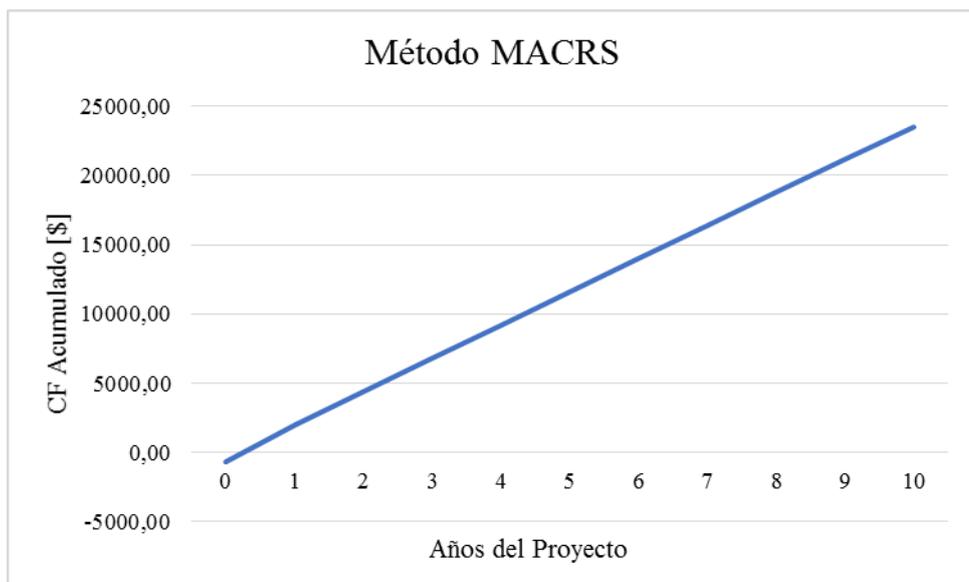


Figura 28. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 56,6%.

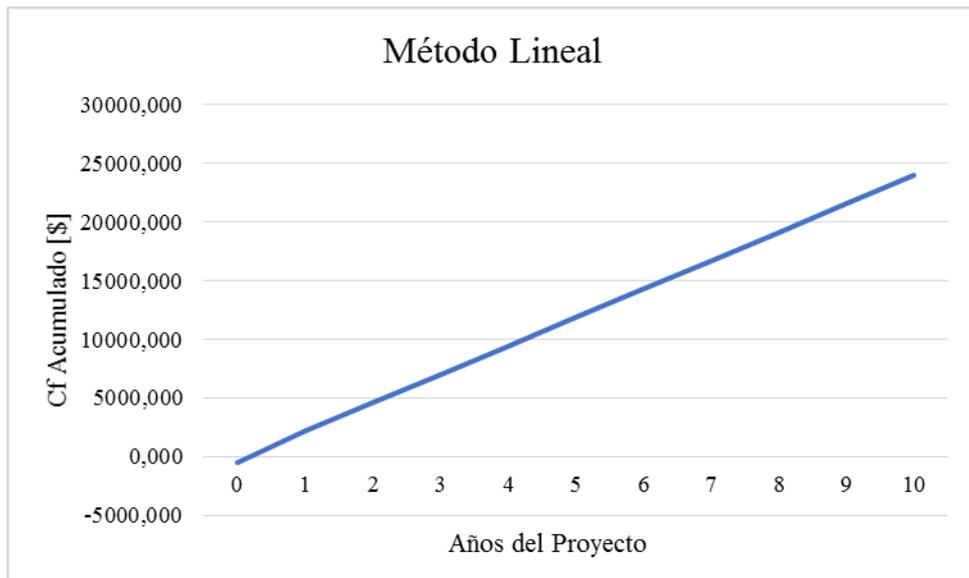


Figura 29. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método lineal para un margen de ganancia del 66%.

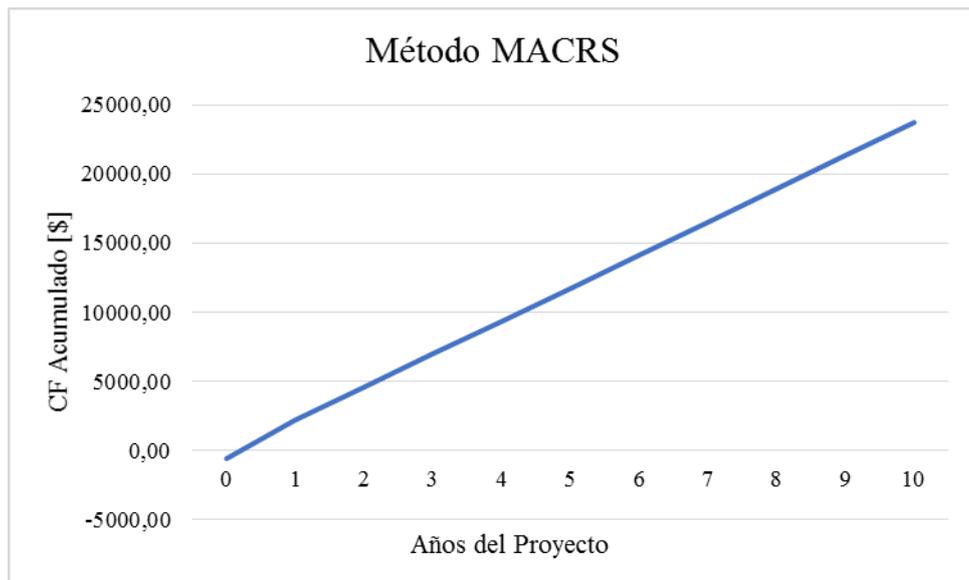


Figura 30. Determinación del crecimiento del flujo de caja por el análisis del método MACRS para un margen de ganancia del 66%.

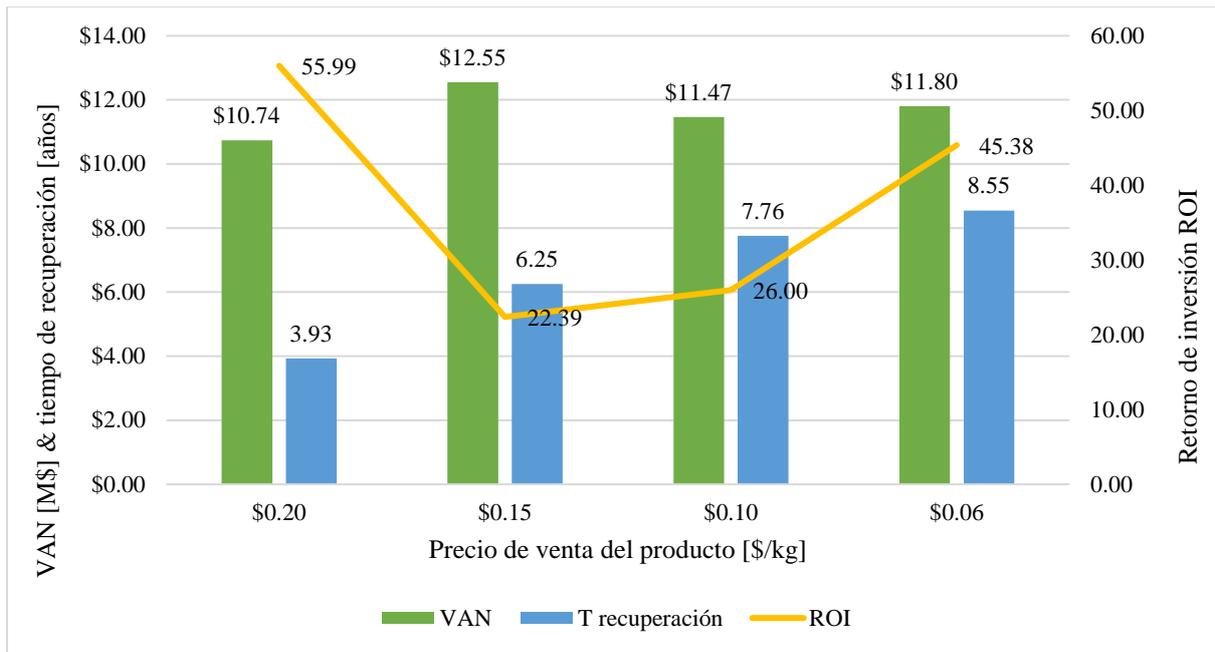


Figura 32. Valores de VAN, tiempo de recuperación y retorno de inversión para cuatro escenarios diferentes.

## ANEXO B. MISCELANEOS

### Anexo B1. Resumen de leyes y normas consideradas



Agencia de Regulación y Control  
de Energía y Recursos Naturales  
No Renovables

**Resolución Nro. ARCERNNR-027/2021**

**REGULACIÓN Nro. ARCERNNR – 003/21**

**EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL  
DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES  
-ARCERNNR-**

**Considerando:**

**Que,** el artículo 226 de la Constitución preceptúa que las instituciones del Estado, sus organismos, dependencias, las servidoras o servidores públicos y las personas que actúen en virtud de una potestad estatal ejercerán solamente las competencias y facultades que les sean atribuidas en la Constitución y la ley; y, que tendrán el deber de coordinar acciones para el cumplimiento de sus fines y hacer efectivo el goce y ejercicio de los derechos reconocidos en la Constitución;

**Que,** el artículo 313 de la Constitución de la República del Ecuador, establece que el Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia y que se considera un sector estratégico la energía en todas sus formas;

**Que,** el artículo 314 de la Constitución de la República preceptúa que, el Estado será responsable de la provisión de servicios públicos, entre otros, el de energía eléctrica, de acuerdo con los principios de obligatoriedad, generalidad, uniformidad, eficiencia, responsabilidad, universalidad, accesibilidad, regularidad;

**Que,** en el Tercer Suplemento del Registro Oficial nro. 418 del 16 de enero de 2015, se promulgó la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE), la cual establece las disposiciones para el funcionamiento del sector eléctrico ecuatoriano;

**Que,** el artículo 3, numeral 11 de la LOSPEE define a un Gran Consumidor como la persona jurídica, cuyas características de consumo, establecidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), a través de la respectiva regulación, le facultan para acordar libremente con un generador o autogenerador privados, la compra de la energía eléctrica para su abastecimiento;

**Que,** el artículo 44 de la LOSPEE establece que los grandes consumidores serán aquellas personas jurídicas, debidamente calificadas como tales por el organismo competente, cuyas características de consumo le facultan para actuar a través de contratos bilaterales;

**Que,** el artículo 46 de la LOSPEE señala que las transacciones de bloques de energía podrán celebrarse únicamente por compras y ventas de energía a través de contratos suscritos por los participantes y que se liquidarán comercialmente por parte del Operador Nacional de Electricidad, CENACE, en función de los precios pactados en los contratos. Sin embargo, para el cierre comercial de las

Dirección: Av. Naciones Unidas 17171 y Av. De los Shuaris  
Teléfono: 593-2-2266-344 | www.confederacionenergia.gov.ec  
Código postal: 171506 / Guayaquil - Ecuador



**Gobierno**  
del Ecuador

Juntos  
lo logramos

Sesión de Directorio Extraordinario electrónico de 17 de septiembre de 2021  
Página 1 de 38

Figura 31. Resumen de Reglamento Tarifario Vigente del Ecuador del año 2021.

**Resolución Nro. ARCONEL-006/2020****REGULACIÓN Nro. ARCONEL 001/2020****EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN  
Y CONTROL DE ELECTRICIDAD - ARCONEL****Considerando:**

- Que,** el artículo 313 de la Constitución de la República prescribe que, el Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, entre ellos, la energía en todas sus formas;
- Que,** el artículo 314 de la Constitución de la República preceptúa que, el Estado será responsable de la provisión de servicios públicos, entre otros, el de energía eléctrica, de acuerdo con los principios de obligatoriedad, generalidad, uniformidad, eficiencia, responsabilidad, universalidad, accesibilidad, regularidad, continuidad y calidad;
- Que,** el artículo 4 de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) establece los derechos de los consumidores o usuarios finales, entre éstos, recibir el servicio público de energía eléctrica acorde con los principios constitucionales de eficiencia, responsabilidad, continuidad, calidad y precio equitativo; y, recibir un trato equitativo, no discriminatorio o abusivo, en la prestación del servicio público de energía eléctrica;
- Que,** el artículo 5 de la LOSPEE define las obligaciones de los consumidores o usuarios finales, entre éstas, pagar oportunamente la factura de energía eléctrica, cuidar las instalaciones eléctricas que le permiten contar con suministro de electricidad y denunciar a quienes hacen uso incorrecto de dichas instalaciones;
- Que,** el artículo 15, numeral 2 ibídem determina como una de las atribuciones de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), dictar las regulaciones a la cuales deberán ajustarse las empresas eléctricas, el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y los consumidores o usuarios finales sean estos públicos o privados;
- Que,** el artículo 43 de la LOSPEE establece que la actividad de distribución y comercialización de electricidad, exceptuando el servicio de carga de vehículos eléctricos, será realizada por el Estado a través de personas jurídicas debidamente habilitadas; declara la obligación de cada empresa dedicada a la actividad de distribución y comercialización a expandir su sistema para satisfacer toda demanda de servicio de electricidad dentro de un área geográfica exclusiva;
- Que,** el artículo 60 de la Ley ibídem señala que, en la factura correspondiente al consumo de servicio público de energía eléctrica a los consumidores o usuarios finales, se incluirán, única y exclusivamente, los rubros correspondientes a los

Figura 32. Resumen de la regulación Nro.001/2020 para el control de electricidad en Ecuador del año 2020.

## Anexo B2. Comparación de procesos

Tabla 26. Comparación de procesos de conversión térmica para materiales orgánicos.

Características	Pirólisis	Hidrólisis	Carbonización Hidrotérmica
Control de Condiciones	Control (60-65%)	Control (70-75%)	Control (80-85%)
Impacto Ambiental	Emisión de Gases (CO <sub>2</sub> , CO y CH <sub>4</sub> )	Consumo de Agua	Recirculación de agua
Investigación y Desarrollo	Desarrollo Establecido	Activo	En evolución
Inversiones y Costos	Altos (\$10-\$50 millones)	Altos (\$20-\$100 millones)	Moderados (\$2-\$15 millones)

Tabla 27. Comparación y calificación de cada proceso de conversión térmica.

Características	Pirólisis	Hidrólisis	Carbonización Hidrotérmica	Pirólisis	Hidrólisis	HTC
Operaciones unitarias del proceso	Calentamiento controlado en ausencia de oxígeno para producir productos gaseosos, líquidos y sólidos.	Descomposición química mediante agua o vapor, a menudo con ácidos o enzimas.	Tratamiento térmico de biomasa en ambiente acuoso a altas presiones para obtener carbón hidrotérmico.	4	3	5
Temperatura	400 - 800 °C	100 - 200 °C	180 - 250 °C	3	4	4
Impacto ambiental	Riesgo de emisiones si no se controla	Posibles efluentes si se usan ácidos fuertes	Bajo impacto ambiental; emisiones controladas y subproductos reutilizables.	3	3	5
Tiempo total de operación	40	60	25	4	2	3
Materias primas	Biomasa, residuos orgánicos, plásticos, neumáticos	Biomasa, celulosa, lignocelulosa	Biomasa, celulosa, lignocelulosa	4	4	5
Maquinas y equipos	Hornos de pirólisis, unidades de condensación, sistemas de recogida de gases y sólidos	Reactores de hidrólisis, sistemas de presión, unidades de neutralización para hidrólisis ácida	Reactores hidrotérmicos, sistemas de presión, equipos de separación de sólidos y líquidos	4	2	5
Poder calorífico	16 - 30 MJ/kg para aceites pirolíticos	Varía según el producto final; el etanol tiene ~29 MJ/kg	18 - 30 MJ/kg para carbón hidrotérmico	3	4	5
Costos	Altos (\$10-\$50 millones)	Altos (\$20-\$100 millones)	Moderados (\$2-\$15 millones)	2	1	4
Total				27	23	36

### Anexo B3. Diagrama de flujo y diagrama de bloques

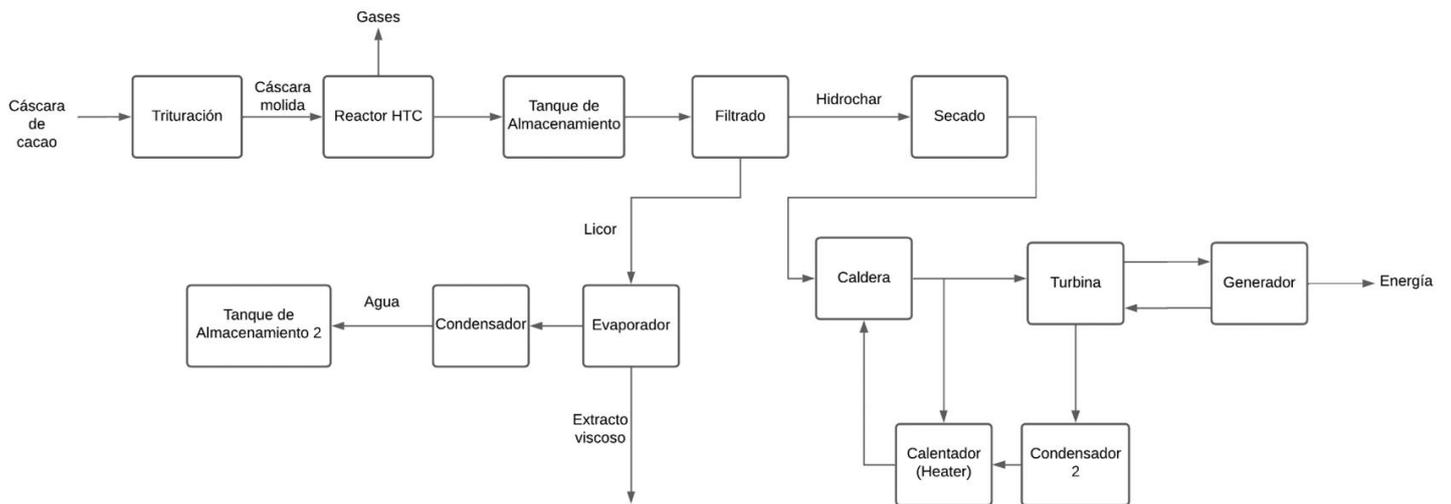


Figura 33. Diagrama de bloque de la planta para producir energía renovable usando como materia prima residuos de cáscara de cacao y como método de conversión térmica el proceso de carbonización hidrotérmica.

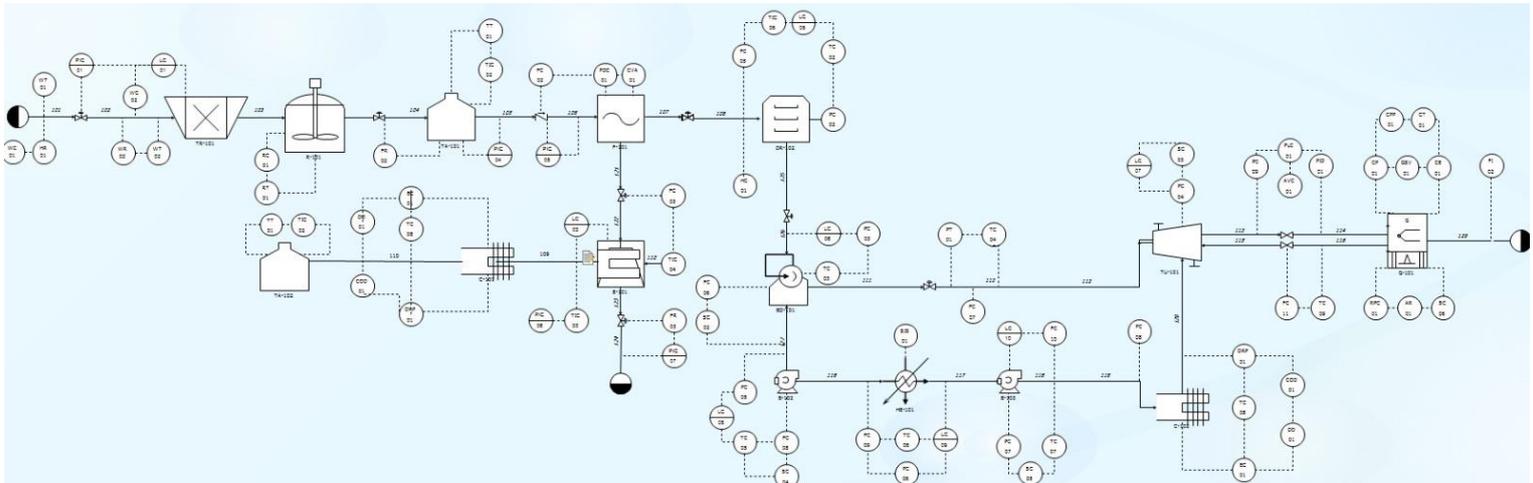


Figura 34. Diagrama P&ID de la planta producir energía renovable usando como materia prima residuos de cáscara de cacao y como método de conversión térmica el proceso de carbonización hidrotérmica.

Tabla 28. Código de equipos usados para el diagram P&amp;ID.

<b>Código</b>	<b>Equipos</b>
TR-101	Trituradora
R-101	Reactor HTC
TA-101	Tanque Almacenamiento 1
F-101	Filtradora
E-101	Evaporador
C-101	Condensador
TA-102	Tanque Almacenamiento 2
DR-101	Secador
BO-101	Caldera
TU-101	Turbina
C-102	Condensador 2
B-103	Bomba 1
HE-101	Calentador
B-102	Bomba 2
G-101	Generador

## Anexo B4. Recopilación de datos experimentales



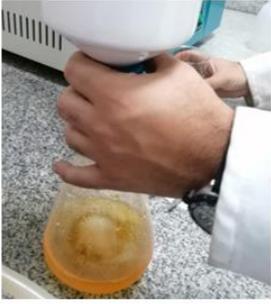
Figura 35. Reactor de alta presión a escala de laboratorio TGYF-B del laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ).

### Análisis experimental:

Tabla 29. Relación peso/agua para el análisis experimental del proceso.

Agua usada: 300 ml	Peso vaso: 113,56 g
<b>Experimento 1</b>	<b>Experimento 2</b>
$196.6651 - 65.2235 = 131.4416\text{g}$	$124.5520 - 65.2235 = 59.3285\text{ g}$
<b>Experimento 3</b>	<b>Experimento 4</b>
$157.6980 - 65.2235 = 92.4745\text{ g}$	$97.9502 - 65.2235 = 32.7267\text{ g}$

Tabla 30. Esquema de materia prima y subproductos generados del proceso experimental.

Materia Prima		Subproductos	
	Cáscara de cacao triturada		Licor obtenido cáscara de cacao
	Hidrocarbón cáscara de cacao		

## Anexo B5. Hojas de seguridad de materias primas

<b>ThermoFisher</b> SCIENTIFIC		<b>FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD</b> según el Reglamento (CE) nº. 1907/2006
Fecha de preparación 18-jun-2009	Fecha de revisión 29-sep-2023	Número de Revisión 9
<b>SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O LA MEZCLA Y DE LA SOCIEDAD O LA EMPRESA</b>		
<u>1.1. Identificador del producto</u>		
Descripción del producto:	<u>Water</u>	
Cat No. :	268300000; 268300010; 268300025	
Nº CAS	7732-18-5	
Nº CE	231-791-2	
Fórmula molecular	H2O	
<u>1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados</u>		
Uso recomendado	Productos químicos de laboratorio.	
Usos desaconsejados	No hay información disponible	
<u>1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad</u>		
<b>Empresa</b>	<b>Entidad de la UE / nombre de la empresa</b> Thermo Fisher Scientific Janssen Pharmaceuticaaan 3a, 2440 Geel, Belgium  <b>Nombre de la entidad / negocio del Reino Unido</b> Fisher Scientific UK Bishop Meadow Road, Loughborough, Leicestershire LE11 5RG, United Kingdom	
Dirección de correo electrónico	begel.sdsdesk@thermofisher.com	
<u>1.4. Teléfono de emergencia</u>		
	Para obtener información en <b>EE.UU.</b> , llame al: 001-800-227-6701 Para obtener información en <b>Europa</b> , llame al: +32 14 57 52 11  Número de emergencia, <b>Europa</b> : +32 14 57 52 99 Número de emergencia, <b>EE.UU.</b> : 001-201-796-7100  Número de teléfono de <b>CHEMTREC, EE.UU.</b> : 001-800-424-9300 Número de teléfono de <b>CHEMTREC, Europa</b> : 001-703-527-3887	

Figura 36. Ficha de seguridad de materia prima: agua.



## HOJA DE SEGURIDAD COMPLEFOL CACAO

### 1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO Y LA COMPAÑÍA

#### a. Información del Producto

**Estado físico:** Sólido en polvo  
**Nombre del producto:** Complefol Cacao  
**Número de Registro en la Agencia:** 1262-F-AGR  
**Tipo de Fertilizante:** Fertilizante mineral

#### b. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla. Datos del Fabricante

Fertilizante mineral

##### Datos del Fabricante

##### NEDERAGRO S.A.

Dirección: Lotización Inmaconsa, Calle Tulipanes 3er callejón 22. Número: 17 18.  
 Intersección: Av. 42 N O Manzana: 7 vía a Daule Kilometro: 10 1/2.  
 Teléfono: (04) 2113133  
 email: [ventas@nederagro.com](mailto:ventas@nederagro.com)  
 web: [nederagro.com](http://nederagro.com)  
 Guayaquil-Ecuador

#### c. Datos del Titular del registro en Ecuador.

##### NEDERAGRO S.A.

Dirección: Lotización Inmaconsa, Calle Tulipanes 3er callejón 22. Número: 17 18.  
 Intersección: Av. 42 N O Manzana: 7 vía a Daule Kilometro: 10 1/2.  
 Teléfono: (04) 2113133  
 email: [ventas@nederagro.com](mailto:ventas@nederagro.com)  
 web: [nederagro.com](http://nederagro.com)  
 Guayaquil-Ecuador

Figura 37. Ficha de seguridad materia prima: Cacao.

## Anexo B6. Ubicación del terreno para la implementación de la planta

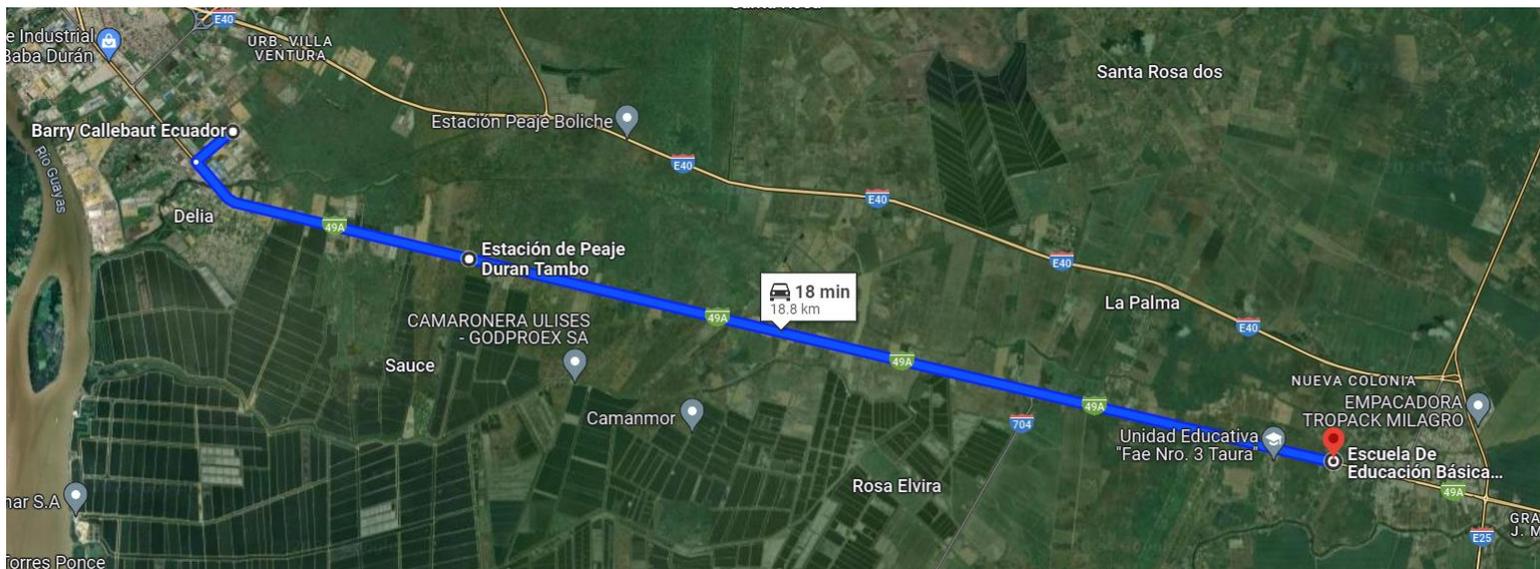


Figura 38. Ubicación en el mapa de la distancia entre el terreno para la implementación de la planta, la empresa Barry Callebaut y la Escuela Víctor Alarcón Lazo.

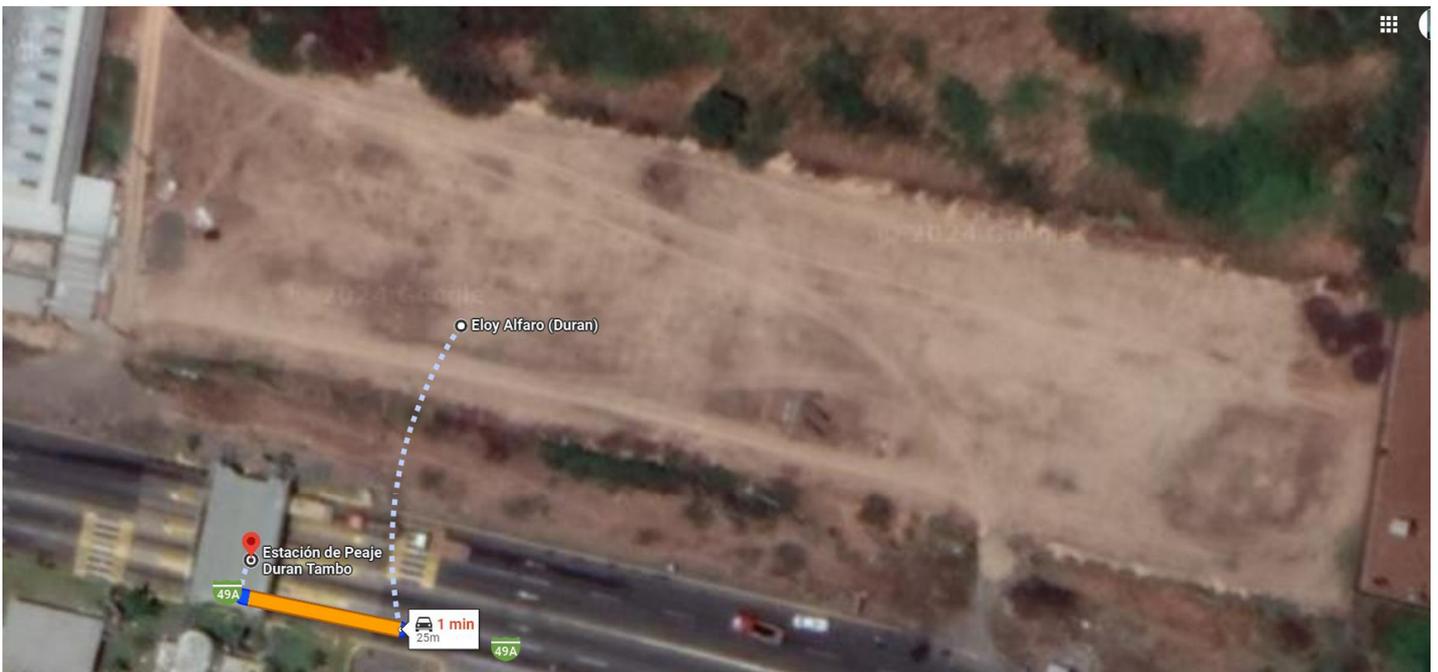


Figura 39. Terreno ubicado en cantón Yaguachi, kilómetro 26 en la vía Durán-Tambo para la implementación de la planta.

➤ Tipo de inmueble	Terrenos Industriales
➤ Dirección	km 23 Vía Durán Tambo
➤ Ciudad	Yaguachi - G
➤ Región	Vía Durán Tambo - Fátima
➤ Barrio	Vírgen de Fátima - km26
➤ Transacción	Venta
➤ Finalidad	Industrial, Comercial
➤ Área total	24,82 Hectáreas

Figura 40. Logística y accesibilidad del terreno para la implementación de la planta.