

Diseño conceptual de una planta de producción de hidrógeno a partir de biomasa residual presente en el departamento de Santander, vía gasificación en agua supercrítica

Gabriela Gerena Acevedo y Adriana María Sarmiento Ortiz

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Química

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

*A mi ángel, María del Carmen Acevedo con su ejemplo de mujer guerrera y perseverante
sembró en mí el más grande de los valores. Te amé toda mi vida y siempre te amaré.*

Gabriela Gerena.

*A la memoria de mi padre, Benedicto, mi ángel que desde el cielo siempre ha sido una luz
que guía mis pasos. Te extraño cada segundo de mi vida y te amaré hasta la eternidad*

*A mi madre, María Consuelo, mi inspiración de vida, por acompañarme en este camino
con amor y apoyo incondicional*

Infinitas gracias por sembrar en mí todo lo bueno que hoy florece.

Adriana Sarmiento

Agradecimientos

A Dios, quien ha sido mi guía, mi fortaleza y mi protector en cada paso de este camino. Gracias por darme la sabiduría, la perseverancia y la oportunidad de cumplir este sueño.

A mi mami, por creer siempre en mí, por apoyarme en cada uno de mis sueños y por ser mi mayor inspiración. Sonia te amo con todo mi corazón.

A mi familia, porque su apoyo incondicional, consejos y confianza hicieron posible que cumpla una de las metas más importantes de mi vida.

A Felipe y Manu, quienes me acompañaron durante este proceso y que, con su forma tan especial de alegrar mis días, siempre lograron sacarme una sonrisa.

A mi compañera de tesis, Adrianita. Nos elegimos desde el primer momento y, desde entonces, construimos juntas este proyecto llamado ingeniería y, en el camino, una amistad incondicional que hoy considero parte de mi familia. Agradezco a la vida haber tomado la iniciativa de escribirte aquel día, porque fue el inicio de una experiencia que siempre llevaré conmigo. Gracias por tu apoyo y por estar presente en cada reto que enfrentamos. Sin duda, este logro también lleva una parte de ti.

A mi asesor de tesis, Profe Benavides, por su paciencia, dedicación y orientación constante. Gracias por creer en nosotras, guiarnos durante este proceso y motivarnos siempre a dar lo mejor de nosotras mismas.

A mis compañeros de carrera, Lis, Andrés y Sofí, quienes estuvieron conmigo desde el inicio; a Rossy, Pao y aquellos que se fueron uniendo en el camino. Gracias por compartir esta etapa llena de aprendizajes, cada uno dejó una huella especial en esta experiencia y contribuyó a que este recorrido fuera mucho más significativo.

Finalmente, me agradezco a mí misma por mi esfuerzo, perseverancia y fortaleza. Por no rendirme ante las dificultades, por confiar en mis capacidades y por levantarme cada vez que fue necesario. Hoy este logro es el reflejo de años de dedicación, sacrificio y sueños.

Gabriela Gerena

Agradecimientos

A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesaria en cada momento de mi vida

A mi madre, la persona que ilumina mi vida. Gracias por su constante esfuerzo, por creer en mí, por cada consejo y palabra de aliento recordándome que siempre puedo lograr todo lo que me propongo y por ser el pilar fundamental de todo lo que hoy soy.

A mis hermanos, Andrés y Alex por estar presentes en cada etapa de mi vida y acompañarme siempre en mis logros y dificultades

A Gabriela, mi amiga de la vida y compañera de tesis. Las largas jornadas, las conversaciones, las preocupaciones compartidas hicieron que este camino fuera mucho más bonito. Gracias por caminar a mi lado durante esta etapa, por compartir cada aprendizaje, cada dificultad, cada risa y cada logro, demostrándome siempre su apoyo incondicional, cariño y confianza. Gracias también por permitirme conocer a su familia y hacerme sentir parte de ella; sin duda fueron mi hogar lejos de casa.

Al profesor Omar, por su confianza, exigencia y el conocimiento compartido a lo largo de este proceso. Su guía, constante dedicación y compromiso fueron parte fundamental en el éxito de este trabajo.

A los amigos que encontré en el camino, a mi familia y a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron parte de este recorrido. Gracias por su apoyo, compañía, palabras de ánimo y por estar presentes en cada momento. Cada uno dejó una huella especial en este camino y fue parte importante para llegar hasta aquí.

A mí, por no rendirme jamás, por confiar en mis capacidades incluso cuando el camino se hizo difícil, y por demostrarme día a día que con esfuerzo y perseverancia puedo alcanzar todo lo que me propongo.

Adriana Sarmiento

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo General.....	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. Marco conceptual	15
2.1. Hidrógeno	15
2.2. Biomasa residual.....	15
2.3. Gasificación	16
2.4. Agua supercrítica (SCW)	16
3. Estado del arte	17
4. Metodología	19
5. Resultados	21
5.1. Revisión bibliográfica.....	21
5.2. Fuentes de biomasa Residual en el departamento de Santander	21
5.2.1. Residuos Agrícolas.....	21
5.2.2. Residuos urbanos, pecuarios y forestales	22
5.3. Características de la Biomasa Residual	23
5.4. Criterios para la selección de biomasa.....	26
5.5. Selección de la biomasa	27
5.6. Ruta de síntesis.....	27

5.7.	Capacidad de la planta	29
5.8.	Simulación del proceso en Aspen Plus	30
5.8.1.	Pretratamiento de la biomasa	31
5.8.2.	Sistema de reacción	31
5.8.3.	Sistema de separación	33
5.8.4.	Sistema de purificación	34
5.8.5.	Dimensionamiento de equipos	37
6.	Análisis Económico	40
6.1.	Costos de capital (CAPEX)	40
6.2.	Servicios industriales	40
6.3.	Costos de operación (OPEX)	41
6.4.	Indicadores Económicos	42
6.5.	Indicadores financieros	44
7.	Conclusiones	46
8.	Recomendaciones.....	48
	Referencias bibliográficas.....	49
	Apéndices.....	71

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de biomasa residual	15
Tabla 2. Disponibilidad de residuos agrícolas en Santander.....	22
Tabla 3. Características físicas de la biomasa.	23
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual	24
Tabla 5. Composición lignocelulósica de residuos de biomasa según tipo y fuente	26
Tabla 6. Componentes y criterios de definición utilizados en la simulación.....	30
Tabla 7. Equipos utilizados en la simulación del proceso en Aspen Plus.....	30
Tabla 8. Generación de hidrógeno a partir de diferentes biomasas.	36
Tabla 9. Equipos de la planta	39
Tabla 10. Costos fijos de la planta	40
Tabla 11. Servicios Industriales del Proceso.....	41
Tabla 12. Costos operativos del proceso	42

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama metodológico.	19
Figura 2. BFD del proceso	28
Figura 3. Diagrama proceso de pretratamiento.....	32
Figura 4. Sistema de reacción	32
Figura 5. Sistema de separación.....	33
Figura 6. Sistema de purificación del gas de síntesis.....	34

Lista de Apéndices

Apéndice A. Composición elemental.....	71
Apéndice B. Balances de masa	72
Apéndice C. Flujo de caja.....	76

Resumen

Título: Diseño conceptual de una planta de producción de hidrógeno a partir de biomasa residual presente en el departamento de Santander, vía gasificación en agua supercrítica*

Autores: Gerena Acevedo Gabriela, Sarmiento Ortiz Adriana Maria**

Palabras clave: Gasificación, agua supercrítica, pulpa de café, hidrógeno, diseño conceptual, biomasa residual.

Descripción: El hidrógeno se ha consolidado como una alternativa clave en la transición energética por su potencial para reducir emisiones y diversificar la matriz energética del país. En ese sentido, este trabajo tiene como objetivo el diseño conceptual de una planta de producción de hidrógeno a partir de biomasa residual disponible en el departamento de Santander por vía gasificación en agua supercrítica. La simulación del proceso se realizó en Aspen Plus V15 y contempló cuatro etapas principales: el pretratamiento de la biomasa, reacción de gasificación, separación y purificación del hidrógeno. La etapa central del proceso se da en el reactor de gasificación donde el agua alcanza las condiciones supercríticas, favoreciendo la transformación de la biomasa en un gas de síntesis rico en hidrógeno. Seguido a esto se da la separación y purificación de hidrógeno en un sistema de adsorción por oscilación de presión obteniendo una pureza del 99% de hidrógeno. Adicionalmente, se realizó el dimensionamiento de los equipos utilizados en el proceso, y un análisis económico con el fin de evaluar la viabilidad económica que tiene el proyecto en las condiciones establecidas. Los resultados obtenidos del análisis económico indican que bajo las condiciones evaluadas el proyecto no presenta viabilidad económica; sin embargo, teniendo en cuenta la cantidad de hidrógeno obtenida evidencia el potencial de la gasificación en agua supercrítica como una alternativa que se puede seguir estudiando, representando una oportunidad con potencial de desarrollo y optimización, lo que cobra relevancia pues el hidrógeno goza actualmente de un impulso creciente evidenciado en el desarrollo de múltiples proyectos en todo el mundo con el objetivo que se utilice de manera generalizada y su implementación a gran escala, marcando un cambio hacia un futuro energético sostenible.

*Trabajo de investigación – Pregrado en Ingeniería Química

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas – Escuela de Ingeniería Química

Director: Omar Andrés Benavides Prada

Abstract

Title: Conceptual Design of a Hydrogen Production Plant from Residual Biomass in the Department of Santander, via Supercritical Water Gasification*

Authors: Gabriela Gerena Acevedo, Adriana Maria Sarmiento Ortiz**

Keywords: Gasification, supercritical water, coffee pulp, hydrogen, conceptual design, residual biomass.

Description: Hydrogen has become a key alternative in the energy transition due to its potential to reduce emissions and diversify the country's energy mix. In this context, this work aims to conceptually design a hydrogen production plant using residual biomass available in the department of Santander via supercritical water gasification. The process simulation was performed in Aspen Plus V15 and included four main stages: biomass pretreatment, gasification reaction, hydrogen separation, and purification. The central stage of the process takes place in the gasification reactor, where the water reaches supercritical conditions, facilitating the transformation of the biomass into a hydrogen-rich synthesis gas. Following this, hydrogen is separated and purified in a pressure swing adsorption system, achieving 99% hydrogen purity. Additionally, the equipment used in the process was sized, and an economic analysis was conducted to evaluate the project's economic viability under the established conditions. The results obtained from the economic analysis indicate that, under the evaluated conditions, the project is not economically viable. However, considering the amount of hydrogen obtained, it demonstrates the potential of supercritical water gasification as an alternative that warrants further study. This represents an opportunity with potential for development and optimization, which is particularly relevant given the current surge in hydrogen use, evidenced by the development of numerous projects worldwide aimed at its widespread adoption and large-scale implementation, marking a shift towards a sustainable energy future.

*Research paper – Undergraduate in Chemical Engineering

**Faculty of Physical-Chemical Engineering – School of Chemical Engineering

Director: Omar Andrés Benavides Prada

Introducción

El hidrógeno se ha consolidado como un compuesto clave en la transición energética gracias a su versatilidad como materia prima industrial, fuente de energía y vector energético. Esta capacidad le permite integrarse en procesos de producción, almacenamiento y transporte de energía, lo que amplía significativamente su campo de aplicación (Iberia, A *et al.*, 2021), además de no generar emisiones de efecto invernadero (GEI) (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Según Global Market Insights, (2025), el mercado global del hidrógeno se valoró en 204,5 mil millones de USD para el año 2024, y se proyecta un crecimiento a una tasa compuesta anual del 12,2 % entre 2025 y 2034, alcanzando los 603.3 mil millones de USD. Este crecimiento responde a la necesidad de disponer de un portador de energía que, al mismo tiempo, impulse el uso de energías limpias y renovables con el fin de sustituir el uso de combustibles fósiles (Rodríguez & Kruse, 2018). En el escenario colombiano, el Gobierno Nacional planteó la Hoja de Ruta del Hidrógeno, con el fin de establecer políticas e incentivos necesarios para crear una industria nacional de hidrógeno de bajas emisiones, reforzando así los compromisos ambientales firmados en el Acuerdo de París del 2015 (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

En este contexto, la ley 1715 de 2014 promueve el desarrollo y el uso de fuentes de energía no convencionales en el sistema energético del país. Esta normativa busca integrar tecnologías limpias para la producción de energía y fomentar la eficiencia energética, así como la integración y participación de las comunidades en el acompañamiento de la transición hacia un modelo más sostenible (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2014). Al respecto, diversas tecnologías han sido desarrolladas para la generación de hidrógeno, como el reformado de gas natural, la electrólisis del agua y la gasificación en agua supercrítica (SCWG) (Cuellar *et al.*, 2024). En particular, esta última técnica se consolida como un método viable para la conversión de

biomasa residual en productos energéticos valiosos; la gasificación supercrítica opera a condiciones de 374 °C y 22.1 MPa, lo que permite descomponer las sustancias lignocelulósicas en compuestos más simples y, como resultado, obtener hidrógeno con eficiencias de conversión mayores al 55 % y una conversión alta de los sólidos (>99 %), minimizando la formación de subproductos no deseados como el alquitrán (Dávila P & Vélez V, 2025).

De acuerdo con lo anterior, implementar esta tecnología en Santander contribuiría al aprovechamiento de los residuos agrícolas e impulsaría el desarrollo de las soluciones energéticas limpias en la región. Por ello, en el presente trabajo se propone el diseño conceptual de una planta de producción de hidrógeno mediante el proceso de gasificación en agua supercrítica. A partir de este planteamiento, el documento presenta inicialmente una revisión bibliográfica centrada en la biomasa disponible en el departamento de Santander, identificando las principales fuentes de producción, la generación de residuos y las características específicas de cada tipo de desecho. Posteriormente, se desarrolla el diseño conceptual del proceso utilizando Aspen Plus como herramienta computacional y, por último, se realiza un análisis de viabilidad económica a nivel de prefactibilidad, incluyendo la estimación de costos de inversión (CAPEX), costos operativos (OPEX) y el cálculo de indicadores económicos que permiten evaluar la rentabilidad del proyecto.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Proponer un diseño conceptual para una planta de producción de hidrógeno a partir de biomasa presente en el departamento de Santander, vía gasificación en agua supercrítica.

1.2. Objetivos específicos

Identificar una fuente de biomasa residual disponible en el departamento de Santander, Colombia.

Elaborar el diseño conceptual del proceso empleando Aspen Plus como herramienta computacional.

Analizar la viabilidad financiera de la planta a través de un estudio de prefactibilidad.

2. Marco conceptual

2.1. Hidrógeno

Es el primer elemento de la tabla periódica y el más ligero que existe, pues su átomo está formado por un protón y un electrón y es estable en forma molecular (H₂). El hidrógeno no es considerado una fuente de energía directa sino un portador energético, ya que almacena energía y permite su transporte y distribución, contribuyendo a la descarbonización de procesos intensivos de energía y posicionándose como un componente clave en la transición energética (Brijaldo *et al.*, 2021). Según el artículo 5 de la Ley de Transición Energética 2099 de 2021, se considera hidrógeno verde aquel producido a partir de fuentes no convencionales de energía (FNCER) como la biomasa, pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, energía eólica, calor geotérmico, energía solar o mareomotriz, entre otras (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2021).

2.2. Biomasa residual

Constituida por materiales orgánicos que resultan como subproductos de actividades agrícolas, forestales, pecuarias, agroindustriales, urbanos o domésticas. Incluyen cáscaras, bagazo, podas, estiércol, lodos de depuradora y residuos alimentarios (UPME, 2009). En la Tabla 1 se muestran los tipos diferentes tipos de biomasa residual, clasificados según su origen y características.

Tabla 1.
Tipos de biomasa residual

Tipo de biomasa	Características
Residuos Agrícolas	Obtenidos de la producción de alimentos o el procesamiento de productos agrícolas. Se clasifican en dos grupos: residuos de cultivos, que comprende los restos de plantas que quedan en los campos después de la cosecha (RAC), y residuos agrícolas industriales (RAI), subproductos de la postcosecha y el procesamiento de alimentos (Praveen, Kumar & Luca Fiori, 2024).

Residuos Urbanos	Desechos generados en áreas urbanas como resultado de actividades cotidianas domésticas, comerciales, institucionales y de prestación de servicios. Incluyen residuos orgánicos, inorgánicos, reciclables y no reciclables, y su gestión correcta es clave para la sostenibilidad urbana y la protección ambiental (Pavlic <i>et al.</i> , 2023). Se clasifican según su naturaleza en: no aprovechables, papel y cartón, plásticos, vidrios, metal, orgánicos aprovechables, peligrosos y especiales (Pavlic <i>et al.</i> , 2023).
Residuos Forestales	Se generan como subproductos de las actividades de manejo, aprovechamiento y transformación de las zonas rurales. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, solo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20 %. Se estima que un 40 % es dejado en el campo y el otro 40 % se destina al proceso de aserrío en forma de astillas, corteza y aserrín (Pérez Sánchez, 2010).
Residuos Pecuarios	Desechos de la crianza de animales, tales como el estiércol, orín, restos de piel, plumaje, restos de alimentación y de hábitat (Gómez Soto <i>et al.</i> , 2019).

2.3. Gasificación

Proceso termoquímico en el que se transforman en gas de síntesis (*syngas*) materiales con contenido de carbono como biomasa, carbón, residuos orgánicos o plásticos, mediante la aplicación de temperaturas por encima de 700 °C con una cantidad controlada de oxígeno o agente gasificante, evitando la combustión completa (Pérez *et al.*, 2010). Las reacciones de oxidación parcial, reducción y reformación resultantes dependen del tipo de residuo introducido y del agente utilizado, ya sea aire, vapor o plasma (AIMPLAS, 2023).

2.4. Agua supercrítica (SCW)

El agua alcanza su estado crítico cuando supera, simultáneamente, una temperatura de 374.29 °C y una presión de 22.089 MPa. El punto supercrítico representa un cambio sustancial en las propiedades termo-físicas del agua, lo que permite su uso como medio de reacción para compuestos como gases, lignina y carbohidratos. Además, presenta alta densidad en comparación al vapor subcrítico, lo que favorece la reacción directa entre la celulosa y el agua para la generación de hidrógeno (Prabir Basu, 2010).

3. Estado del arte

De acuerdo con Higman, (2020), el uso de agua supercrítica es una forma de gasificación hidrotermal que se realiza, generalmente, en presencia de un alto volumen de agua para la producción de hidrógeno y metano. Por su parte, Barros *et al.*, (2022) mencionan que la gasificación vía agua supercrítica es un proceso de conversión de biomasa que opera a condiciones de presión significativamente altas (30 MPa) y temperaturas moderadas (374 °C), y Onursal *et al.*, (2015) indican que una ventaja es el poder procesar la materia prima húmeda sin necesidad de un secado previo, representando un ahorro energético considerable. Además, Kladisios & Stegov, (2022) señalan que el agua contenida en la materia prima favorece la conversión a H₂.

Por otra parte, en la gasificación en agua supercrítica (SCWG) se han empleado diversos sustratos lignocelulósicos y residuos agroindustriales, los cuales son caracterizados y transformados en gas de síntesis rico en hidrógeno. Nanda *et al.*, (2016) señalan que convertir los componentes bioactivos de los desechos en biocombustibles representa un posible enfoque de remediación ambiental, y Chico *et al.*, (2024) exponen la gasificación de celulosa en agua supercrítica en un reactor de flujo pistón (PFR), evidenciando que el aumento de la temperatura, desde condiciones subcríticas a supercríticas, favorece la conversión de la celulosa y aumenta la producción de hidrógeno en, aproximadamente, 1,5 veces. Además, trabajos como el de Panichkittikul *et al.*, (2024) analizan la producción de hidrógeno verde mediante SCWG con captura de CO₂ mediante el uso de Aspen Plus V12 como herramienta computacional, confirmando el efecto de la temperatura como parámetro operativo influyente al emplear bagazo de caña como materia prima.

Por otra parte, el uso de materiales catalíticos se ha asociado a la obtención de mayores rendimientos de hidrógeno. Demirel *et al.*, (2021) gasificaron pulpa de fruta con KOH como

catalizador, reportando un rendimiento de H_2 de 32 mol/kg de biomasa a 600 °C debido a que se favorece la reacción de desplazamiento gas-agua (WGSR). El trabajo de Ding *et al.*, (2014) también emplea el mismo catalizador para evaluar la gasificación de celulosa y madera de pino a 550 °C, reportando un aumento en el rendimiento de 7,8 veces para la celulosa y 6,7 veces para la madera de pino. Así mismo, otros autores reportan que el uso de catalizadores alcalinos, metales de transición y carbón activado contribuye al aumento del rendimiento de hidrógeno y la eficiencia de gasificación (Kladisios & Stegov, 2022; Chakinala *et al.*, 2010; Zhai *et al.*, 2013).

A pesar de los buenos resultados en cuanto a rendimientos, la gasificación en agua supercrítica enfrenta limitaciones significativas para su viabilidad industrial debido a altos costos operativos (Zhaoxia Mi *et al.*, 2025), ya que los equipos deben ser diseñados de tal manera que soporten las altas condiciones termodinámicas y el consumo energético es significativo. En este contexto, Rodgers *et al.*, (2024) exponen que el costo de producción de hidrógeno mediante el proceso de gasificación en agua supercrítica varía entre 1,66 y 18,73 USD/ kg, y Wen *et al.*, (2014) mencionan que la gasificación en aire-vapor resulta más económica: 0,4228 USD/ Nm³ de H_2 frente a 0,6537 USD/ Nm³ en agua supercrítica.

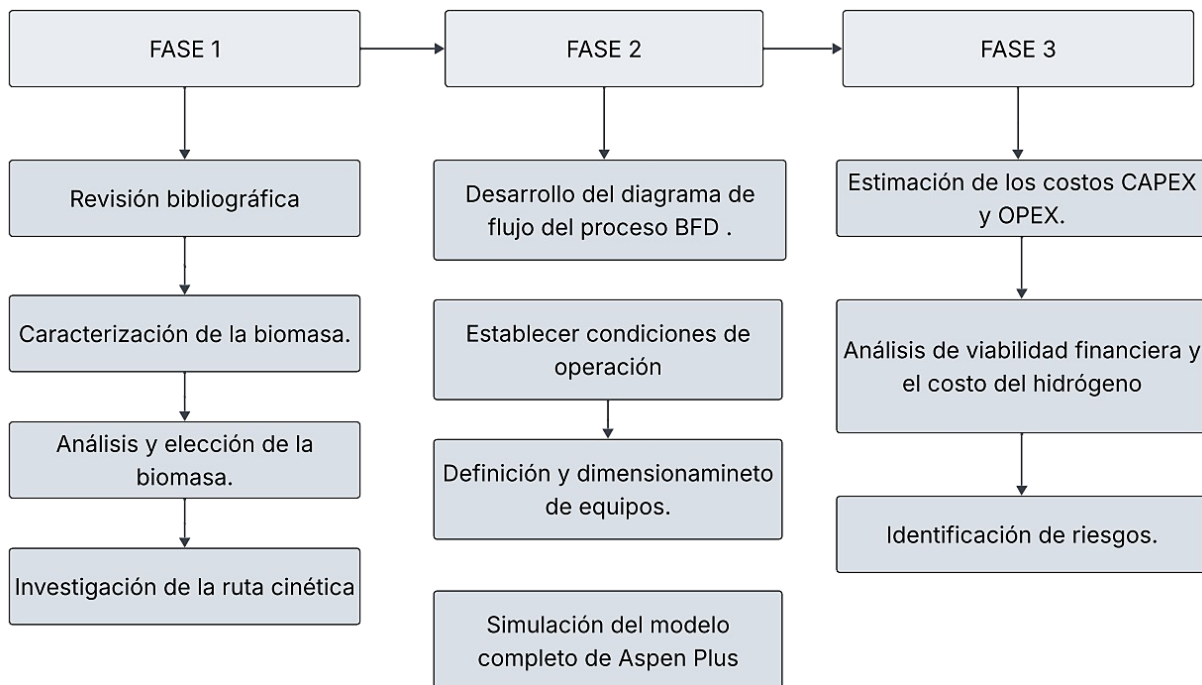
De acuerdo con lo anterior, aunque la gasificación en agua supercrítica apunta como una tecnología prometedora para la transición energética, y pese a los avances alcanzados a nivel experimental, de simulación y su validación en una planta piloto en el Karlsruhe Institute of Technology, aún existen desafíos técnicos y económicos asociados a la operación en condiciones extremas, el manejo de sales y sólidos, la selección de materiales y la adaptación del proceso a la variabilidad de la biomasa (Boukis & Stoll, 2021), lo cual limita su implementación a escala industrial y evidencia la necesidad de continuar con investigaciones que permitan la maduración del proceso.

4. Metodología

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico que se siguió en el desarrollo de este trabajo.

Figura 1.

Diagrama metodológico.



Fase 1

Se identificaron las diferentes fuentes de biomasa residual disponibles en el departamento de Santander, con el propósito de determinar aquellas que presentan un alto potencial para la producción de hidrógeno. Para ello se llevó a cabo una revisión bibliográfica a través de reportes generados según la base Agrícola EVA-Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y artículos científicos. Se realizó una comparación entre los diferentes tipos de biomasa para su aprovechamiento energético, analizando tanto las propiedades fisicoquímicas como su estado físico, ya que estos factores son determinantes para establecer la viabilidad técnica de los procesos de conversión. Este análisis permitió identificar la biomasa más adecuada para la obtención de

hidrógeno, en función de las características del proceso seleccionado. Finalmente, se precisó la ruta de síntesis para el proceso de gasificación vía agua supercrítica, definiendo las reacciones presentes, condiciones de operación y las unidades de operación necesarias para la obtención y separación del *syngas*.

Fase 2

En primer lugar, se realizó el diagrama de flujo (BFD), el cual expone las etapas que componen el sistema, y se establecieron las condiciones de operación específicas para cada etapa. Luego, se desarrolló la simulación de la planta en Aspen Plus, evaluando el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, lo que permitió determinar el dimensionamiento de los equipos.

Fase 3

Las actividades que se desarrollaron en esta etapa estuvieron encaminadas a cuantificar los costos de inversión (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX), con el fin de analizar la viabilidad económica de la planta. La estimación de la inversión de capital (CAPEX) incluye los costos asociados a adquisición de equipos y puesta en marcha, mientras que los gastos operativos (OPEX) están ligados al funcionamiento de la planta, tales como el consumo energético, suministro de biomasa húmeda, mantenimiento de los equipos, insumos operativos, y personal técnico y administrativo. Finalmente se realizó el análisis económico que incluyó el costo de producción de hidrógeno, el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), indicadores que permitieron evaluar la rentabilidad del proyecto.

5. Resultados

5.1. Revisión bibliográfica

Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos gubernamentales como el ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Departamento Nacional de Estadística (DANE) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, así como en repositorios académicos y científicos disponibles en el sistema bibliotecario virtual de la Universidad Industrial de Santander, empleando bases de datos como Scopus, Scielo, ScienceDirect y Springer. Para realizar la búsqueda se incluyeron combinaciones de palabras clave tales como *residuos*, *Santander*, *biomasa*, *hidrógeno*, *poder calorífico*, *aprovechamiento energético*, entre otras. La exploración se dirigió principalmente a informes técnicos relacionados con la producción agrícola en el departamento de Santander y artículos científicos para extraer los factores de generación de residuos, definidos como un porcentaje o fracción del producto principal.

5.2. Fuentes de biomasa Residual en el departamento de Santander

5.2.1. Residuos Agrícolas

En la Tabla 2 se muestra la disponibilidad de residuos agrícolas en el departamento de Santander durante el año 2022, provenientes de café, palma de aceite, caña panelera, plátano y maíz (UPRA, 2023). También se muestran factores de generación de residuos obtenidos de la literatura, definidos como la relación entre la masa de residuo producido y la masa del producto principal obtenido en un proceso agrícola o agroindustrial. La mayor cantidad de biomasa proviene de cultivos como la palma de aceite, la caña panelera y el plátano. En el caso del café, la pulpa representa una fracción considerable del peso total del fruto: 0,5 ton por cada ton de café producido (Santos *et al.*, 2021), mientras que el maíz aporta subproductos agrícolas en menor proporción.

Residuos de palma como el cuesco, raquis y la fibra, presentes en los racimos de fruto fresco, son también una fuente considerable de biomasa.

Tabla 2.

Disponibilidad de residuos agrícolas en Santander

Tipo de biomasa	Fuente de biomasa	Producción año 2022 [ton/año]	Tipo de Residuo	Factor Residuo	Materia prima disponible [ton/año]
Agrícola	Palma de aceite	408.601	Cuesco	0,07	28.602,07
			Raquis	0,20	81.720,2
			Fibra	0,13	53.118,13
	Café	35.775	Pulpa	0,50	17.887,5
			Cisco	0,12	4.293
	Caña panelera	234.224	Bagazo	0,25	936.896
			Hojas secas	0,25	58.556
	Plátano	99.765	Raquis	0,15	14.964,75
			Vástago	0,50	49.882,5
	Maíz	18.921	Tusa	0,12	2.270,52
			Cáscaras, semillas	0,40	7.568,4

Nota. Adaptado de; *Evaluaciones Agropecuarias Municipales - EVA | UPRA, n.d; Bayona Roa et al., 2023a; Moreno Choconta, n.d.; Peñaranda Gonzalez et al., 2017; Talero Rojas, 2017; Santos et al., 2021)*

5.2.2. Residuos urbanos, pecuarios y forestales

Para el 2022, Santander registró una disposición final promedio de residuos de 1.448,42 toneladas por día (Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios, 2022), constituidos, principalmente, por restos de poda y residuos de cocina (EMAB, 2024). Sin embargo, la materia prima de este sector presenta un gran reto debido a la poca trazabilidad y caracterización, lo que evidencia una limitación logística y la necesidad de fortalecer el sistema de separación en la fuente.

Por otra parte, según datos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), las principales especies ganaderas en el año 2022 fueron bovinos, porcinos, bufalinos, equino, ovino y caprino. De acuerdo con Peña Muñoz, (2021), una gallina puede generar, aproximadamente, 0,105 kg de estiércol por día, lo que equivale a más de 23.100 toneladas diarias de residuo avícola, siendo este

el mayor aporte dentro del sector pecuario. Los bovinos, con un inventario de 1,68 millones de cabezas, producen alrededor de 9.248 toneladas de estiércol por día, mientras que los bufalinos y equinos aportan 1.368 y 1.419 toneladas diarias, respectivamente.

Respecto a residuos forestales, el Boletín Forestal 2024 publicado por Fedemaderas muestra que el área total de plantaciones comerciales en Santander, a diciembre de 2023, fue de 20.660 hectáreas. Así mismo, la oferta provisional de residuos de bosque en el año 2021 fue de 2.390.485 toneladas, siendo el 93,6 % correspondiente a residuos madereros naturales y el 6,4 % restante los derivados de recursos madereros cultivados. Sin embargo, no se cuenta con información clara sobre este tipo de biomasa, lo que impide considerarla una alternativa viable.

5.3. Características de la Biomasa Residual

En la Tabla 3 se muestra una clasificación de biomasa según su origen, residuos asociados y sus características como el estado físico y el contenido de humedad (HR).

Tabla 3.

Características físicas de la biomasa.

Tipo de biomasa	Residuo	Características físicas
Residuos agrícolas	Cascara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, alto contenido de humedad
	Cascara y polvo de granos secos.	Polvo, HR < 25 %.
	Residuos de cosechas	Sólido, HR > 55 %
Residuos urbanos	Aguas residuales	Líquido
	Residuos domésticos orgánicos	Sólidos, alto contenido de humedad.
	Residuos orgánicos	Sólidos, alto contenido de humedad.
Residuos pecuarios	Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad.
Residuos forestales	Corteza, troncos, ramas	Sólidos, HR > 55 %

Nota. Adaptado de Biomass Users Network (BUN-CA). (2002). *Manuales sobre energía renovable* (1ª ed.) [PDF]. Recuperado de <http://www.bionica.info/biblioteca/BUNCA2002Biomasa.pdf>

Una de las características más importantes de un combustible es su contenido energético, el cual se expresa normalmente como poder calorífico inferior (PCI). Por lo general, un PCI alto indica mayor eficiencia en la conversión de biomasa en gas combustible con alto valor calorífico (Ondze, 2015). Así mismo, la humedad afecta la reactividad y la eficiencia de conversión durante la gasificación; biomasa con alto contenido de humedad puede ser gasificada sin necesidad de secado previo, lo que es una ventaja significativa del proceso con agua supercrítica, además de minimizar la formación de subproductos no deseados (carbón y alquitrán) y mejorar la eficiencia global del proceso (Martins, 2024). La Tabla 4 presenta una selección representativa de residuos de biomasa generados en los sectores agrícola, pecuario y urbano del departamento de Santander. En ella se incluyen los valores de PCI, contenido de humedad, porcentajes de ceniza, volátiles y carbono fijo correspondientes a cada tipo de residuo.

Tabla 4.

Propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual

Tipo de Residuo	PCI [Kcal/Kg]	% de humedad	% Ceniza	% Volátiles	% Carbono fijo
Cuesco	3.988	12	1,4	79	26,14
Raquis	4.021	55	6,87	79,82	13,31
Fibra	4.274	37,09	5,7	75,43	18,24
Pulpa	4.259	80-85	9,58	55,58	16,90
Cisco	4.430	30	3,91	80,34	15,38
Bagazo	4.456	50 – 60	10,09	68-70	28,7-30,7
Hojas secas	4.007	7,55	7,33	84,21	8,46
Raquis	1.808	89,6	3,31	64,89	6,4
Vástagos	2.032	8,30	11,53	89,10	18,3
Tusa	3.390	10	8,5	65,1	21,3
Capacho	3.815	7,55	0,36	87,76	11,09
Sólido orgánico	3.772	40	5,86	40-60	4-15

	5.106	67,18 - 75,13			
Estiércol	2.946,5	56,40 – 75,31	24,5	56,6	9,4
	2.946,5	18,43 – 29,42			

Nota. Adaptado de tabla poder calorífico inferior del Atlas de potencial energético de la Biomasa residual en Colombia, (Bayona Roa et al., 2023a; Sánchez Alfonso et al., n.d.); (Waldo, 2018); (Manals et al., 2015), (Assureira & Assureira, 2022) ;(Mondragón et al., 2018), (Oladeji, 2017); (Ibrahim, 2020); (Saldarriaga, 201 C.E.).

Un alto contenido de cenizas puede dificultar el proceso de gasificación al causar problemas como la formación de escoria, incrustaciones y corrosión de los equipos, reduciendo la eficiencia energética global del proceso de gasificación (Wang, 2023). La materia volátil es crucial para las etapas iniciales de la gasificación, ya que se descompone rápidamente para producir gases como hidrógeno, monóxido de carbono y metano; un mayor contenido de compuestos volátiles, generalmente, conlleva mayores rendimientos de gas y una mejor eficiencia de gasificación (Hanaoka, 2002). Por último, el carbono fijo es responsable de la producción sostenida de gases una vez liberados los volátiles; experimenta reacciones de gasificación más lentas, lo que contribuye a la estabilidad a largo plazo de la producción de gas (Hongcai, 2020). Respecto a la composición elemental de los diferentes tipos de biomasa residual evaluados, estos se detallan en el apéndice A, expresados en porcentaje en peso de los principales elementos constituyentes; en general, los residuos agrícolas, particularmente los de palma de aceite, caña panelera y café, presentan un contenido elevado de carbono y oxígeno, lo que implica el considerarlos potencialmente adecuados para procesos de gasificación vía agua supercrítica.

La biomasa lignocelulósica está compuesta, principalmente, por tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina (BK Nahak & Preetam , 2022). La Tabla 5 presenta la composición lignocelulósica de diferentes tipos de biomasa residual. Un alto contenido de celulosa y hemicelulosa favorece una mejor conversión termoquímica a gas de síntesis, debido a su mayor

facilidad de degradación (Marrugo, 2017); estos componentes tienden a producir más volátiles, aumentando el rendimiento de gas (Wu, Wang, & Zhao, 2015). En contraste, la lignina forma una estructura carbonizada más difícil de descomponer, lo que resulta en una menor producción de hidrógeno (Marrugo, 2017).

Tabla 5.

Composición lignocelulósica de residuos de biomasa según tipo y fuente

Tipo de biomasa	Fuente de Biomasa	Tipo de Residuo	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa
Agrícola	Palma de aceite	Cuesco	50,7	20,8	22,7
		Raquis	10,8	47,7	21,1
		Fibra	10-25	20-30	20-30
	Café	Pulpa	20,97	36,51	12,01
		Cisco			
	Caña panelera	Bagazo	21	44	28
		Hojas secas	18	32	26
	Plátano	Raquis	23,28	30,07	34,15
		Vástagos	12,18	28,34	15,67
	Maíz	Tusa	14-19	18-40	11,34-31
		Capacho	4,03	45,7	35,8
RSU	Residuos orgánicos	Orgánico	10	45	9
Pecuario	Bovino	Estiércol	13,97-	15,31-16,67	14,05-26,12
	Porcino		15,21		
	Avícola				

Nota:(Sánchez Alfonso et al., n.d.); (Neyra-Vasquez, 2022);(Bayona Roa et al., 2023a); (David Resano, 2022), (ECB, 2022), (Vega, 2017) (Stylianou, 2020) (Siswantara, 2024) (Vega Rios & Caballero M, 2002).

5.4. Criterios para la selección de biomasa

La selección de la biomasa se fundamentó en tres criterios principales:

- **Disponibilidad de materia prima:** se basó en la cantidad anual de residuos generados [ton/año]; la disponibilidad se estimó partir de los volúmenes de producción reportados para cada cultivo en el departamento de Santander.

- **Poder calorífico inferior (PCI):** proyecta la cantidad de energía que puede ser producida; por ende, su rendimiento en aplicaciones energéticas (Demirbas, 2009).
- **Procesos agroindustriales:** evalúa la existencia de procesos agroindustriales, cooperativas o plantas de beneficio establecidos en el departamento de Santander que generen residuos agrícolas de manera continua y centralizada.

5.5. Selección de la biomasa

La pulpa de café representa una opción considerable para ser usada en el proceso de gasificación vía agua supercrítica. Este residuo representa el 29 % del peso total de la baya y tiene un PCI de 4259 [kcal/Kg], valor competitivo frente a los otros desechos agrícolas; además, su contenido de humedad, en el rango de 80 a 85 %, se encuentra dentro del adecuado para la gasificación (Martins, 2024). En cuanto a su disponibilidad, a la fecha el departamento cuenta con 55.727 hectáreas cultivadas, distribuidas en 77 de sus 87 municipios (Federación Nacional de Cafeteros , 2025), y se registra una producción de 35.755 toneladas de café en 2022, generando, aproximadamente, 15.590 toneladas anuales de pulpa, lo que garantiza el suministro constante. La pulpa contiene 36,88 % de C, 5,36 % de H₂ y 38,42 % de O₂, favorable para la formación de *syngas* con alto contenido de hidrógeno, y su estructura lignocelulósica (17,86 % de lignina, 29,11 % de celulosa, 12,01 % de hemicelulosa) facilita la descomposición térmica y la liberación de volátiles.

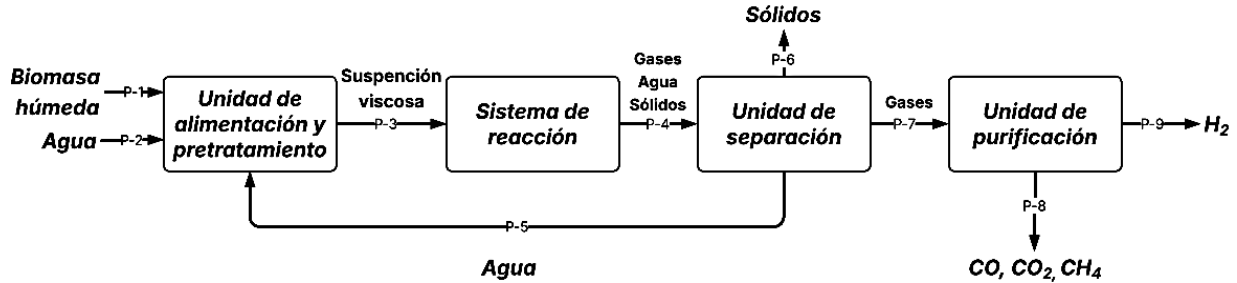
5.6. Ruta de síntesis

El proceso de generación de hidrógeno mediante gasificación en agua supercrítica consta de cuatro secciones principales: alimentación y pretratamiento, reacción, separación y purificación, como se muestra en la Figura 2. La biomasa ingresa a condiciones ambientales (25 °C y 0,1 MPa) al pretratamiento donde se mezcla con agua para crear una suspensión viscosa y facilitar el bombeo. Luego, la presión se eleva por encima del punto crítico del agua, alcanzado

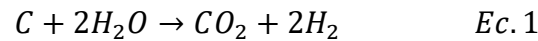
valores cercanos a 35 MPa (Boukis & Stoll, 2021b), y se fija una relación agua-biomasa de 1,25 (Alptekin & Celiktaş, 2022). Una vez presurizada la corriente, la temperatura se incrementa a 700 °C antes de ingresar al reactor, donde la biomasa se descompone térmicamente.

Figura 2.

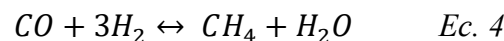
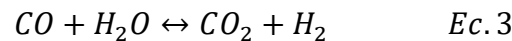
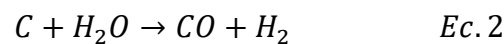
BFD del proceso



La gasificación puede describirse mediante una reacción global (Ecuación 1) y un conjunto de reacciones secundarias de equilibrio que ocurren de manera simultánea dentro de reactor.



Desde el punto de vista termodinámico, la gasificación en agua supercrítica es globalmente endotérmica, ya que requiere un aporte de energía para promover la ruptura de los enlaces químicos de la biomasa. En consecuencia, el equilibrio químico y la generación de hidrógeno se ven favorecidos a altas temperaturas (Gutiérrez Ortiz, 2022). Así mismo, las reacciones intermedias, como la reacción de reformado de vapor (Ecuación 2) y de desplazamiento agua-gas (Ecuación 3), influyen en la distribución final de los productos gaseosos, y parte del monóxido de carbono y del hidrógeno producido participan en la reacción de metanación (Ecuación 4).



Dado que el producto objetivo en la SCWG es la generación de hidrógeno, resulta conveniente favorecer la reacción de desplazamiento agua-gas y limitar la reacción de metanación (Pérez Sánchez, 2010). Una vez realizada la gasificación, el efluente del reactor reduce su temperatura a 60 °C, aproximadamente, y se somete a despresurización controlada hasta 6 MPa (Fiori *et al.*, 2012; Pérez Sánchez, 2010). Luego, la corriente se dirige a una unidad de separación gas-líquido donde se produce la segregación de fases: una fracción líquida, compuesta principalmente por agua, y una fracción gaseosa que contiene CO₂, CO, CH₄ y H₂. Con el fin de obtener hidrógeno de alta pureza, la corriente gaseosa se purifica mediante unidades de adsorción por oscilación de presión (PSA). Entre los adsorbedores más comunes se encuentran el carbón activado, zeolitas tipo 13X y 5^a, así como los tamices moleculares de carbono (CMS) que presentan alta eficiencia en la separación de hidrógeno (Augelletti *et al.*, 2017; Mulu *et al.*, 2021).

5.7. Capacidad de la planta

Según Montiel & Pérez, (2019), por cada 0,56 kg de café pergamino seco se genera 1 kg de pulpa seca; y con una tasa de crecimiento del 2,8 %, se proyecta generación de pulpa hasta el 2040. Así mismo, debido a la falta de información específica sobre gasificación de pulpa de café, se tomó como referencia el rendimiento teórico de H₂ de la pulpa de frutas reportado por Demirel *et al.*, (2021), equivalente a 32,1 mol de hidrógeno por kg de biomasa, considerando la similitud en su composición lignocelulósica. Con este dato se obtuvo la máxima producción de hidrógeno proyectada al 2040: 1,88 kilotoneladas de hidrógeno al año [ktH₂/año], valor que se encuentra limitado por la disponibilidad de materia prima residual en el área de influencia del proyecto. Para el dimensionamiento se asume recolección total de la pulpa generada en Santander, y con una operación al 80 % de capacidad durante 330 días al año (Turton *et al.*, 2018), el nivel de producción se establece en 2,36 ktH₂/año, que equivalen a 297,95 kg/h de hidrógeno. Frente a una demanda

nacional estimada de 350 ktH₂/año, la producción proyectada permitiría cubrir, aproximadamente, el 0,67 % del total (IDOM, 2025).

5.8. Simulación del proceso en Aspen Plus

Para la simulación en Aspen Plus se consideraron los componentes que se presentan en la Tabla 6. La biomasa y la ceniza se caracterizaron a partir de las herramientas HCOALGEN para el cálculo de la entalpía y DCOALIGT para la densidad de la biomasa y la ceniza. Esta caracterización requiere el análisis último y próximo de la biomasa (Apéndice A). Así mismo, para la ejecución de la simulación se utilizaron los equipos que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 6.

Componentes y criterios de definición utilizados en la simulación.

ID COMPONENTE	NOMBRE	TIPO
C	Carbono	Convencional
H ₂	Hidrógeno	Convencional
O ₂	Oxígeno	Convencional
N ₂	Nitrógeno	Convencional
CO	Monóxido de carbono	Convencional
CO ₂	Dióxido de carbono	Convencional
H ₂ O	Agua	Convencional
CH ₄	Metano	Convencional
Biomasa	Pulpa de café	No Convencional
Ash	Ceniza	No Convencional

Tabla 7.

Equipos utilizados en la simulación del proceso en Aspen Plus

BLOQUE	DESCRIPCIÓN
CRUSHER Triturador	Modifica el tamaño de partícula de los materiales sólidos en este caso la pulpa del café.
MIXER Mezclado	Mezcla de corrientes líquidas y sólidas mediante proceso de agitación generando una mezcla homogénea entre la pulpa y el agua.
PUMP Bomba	Aumento de presión de la corriente líquida.
HEATER Calentador	Equipo modelado para aumento de temperatura en varias secciones del proceso.
RYIELD Reactor Químico	Reactor no estequiométrico basado el rendimiento de la reacción

RGIBBS Reactor Químico	Calcula la composición de equilibrio químico, minimizando la energía libre de Gibbs.
RSTOIC Reactor Químico	Reactor estequiométrico basado en la estequiometría de la reacción
HEATER Enfriador	Equipo modelado para disminución de temperatura en varias secciones del proceso.
FLASH Separación Líquido- Gas	Utilizado para separar el agua restante de la corriente del gas para recirculación.
SEP Separación sólido-líquido	Modela la separación de fluidos y sólidos en el proceso.
VALVE Válvula	Instrumentos utilizados para cambios de presión en el sistema de separación
SEP2 PSA	El equipo simula el proceso de Adsorción por oscilación de presión.
HIDROCICLÓN Separador de sólidos	Se usa para la separación de fases sólidas restantes y líquidas mediante el proceso de decantación.

5.8.1. Pretratamiento de la biomasa

Al sistema ingresan 2041 kg/h de pulpa de café con una humedad de 82 %, la cual se somete a un proceso de trituración para reducir el tamaño de partícula y facilitar su transporte. Este tratamiento favorece la formación de una suspensión viscosa al mezclarse con agua. La suspensión biomasa/agua se conduce a un sistema de bombeo donde se incrementa la presión hasta 22 MPa, para luego atravesar una serie de intercambiadores de calor donde la temperatura se eleva de manera gradual hasta 750 °C (Figura 3).

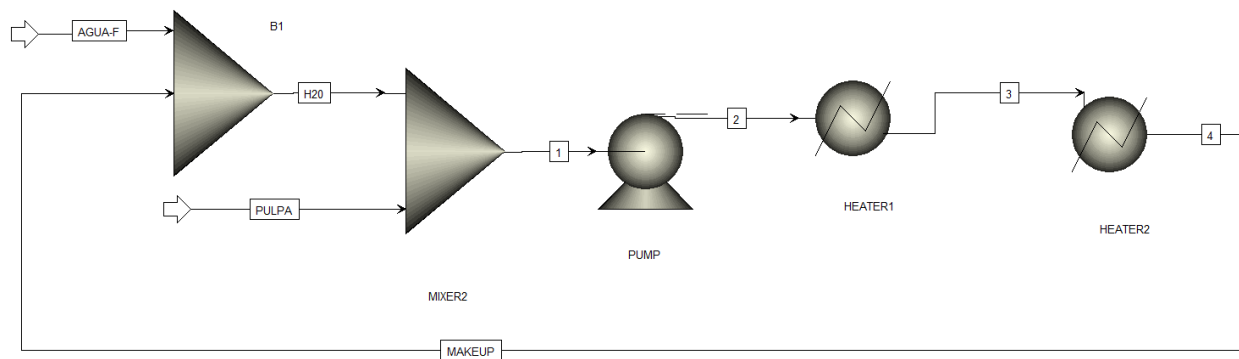
5.8.2. Sistema de reacción

La suspensión obtenida luego es alimentada a un sistema de reacción configurado como un tren de reactores (Figura 4). El primer reactor corresponde a un modelo de tipo *Yield*, el cual permite representar la descomposición térmica de la biomasa en sus componentes elementales. Para su configuración, se empleó un bloque calculador con el fin de estimar los rendimientos de los productos generados. La definición de los parámetros se realizó a partir de los resultados del análisis último y próximo de la biomasa. Posteriormente, la corriente es alimentada a un reactor

de tipo Gibbs, el cual calcula la composición de equilibrio basando en la minimización de la energía libre de Gibbs. Dado que las reacciones involucradas en el proceso de gasificación son complejas, este enfoque permite evitar la definición de la estequiometría y velocidades de reacción, proporcionando una estimación termodinámicamente consistente de la distribución de los productos en el sistema.

Figura 3.

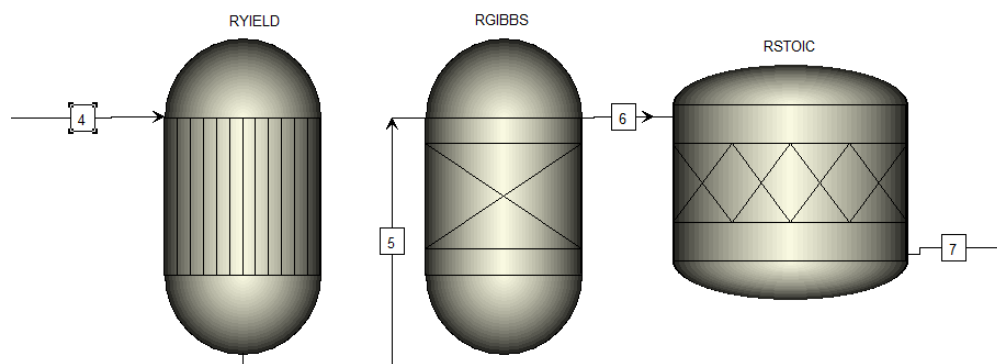
Diagrama proceso de pretratamiento



Nota. Tomado de Aspen Plus V15

Figura 4.

Sistema de reacción



Nota. Tomado de Aspen Plus V15

Finalmente, un reactor tipo *Stoic* es utilizado como una herramienta de ajuste para representar las reacciones específicas con conversiones previamente definidas. Este reactor

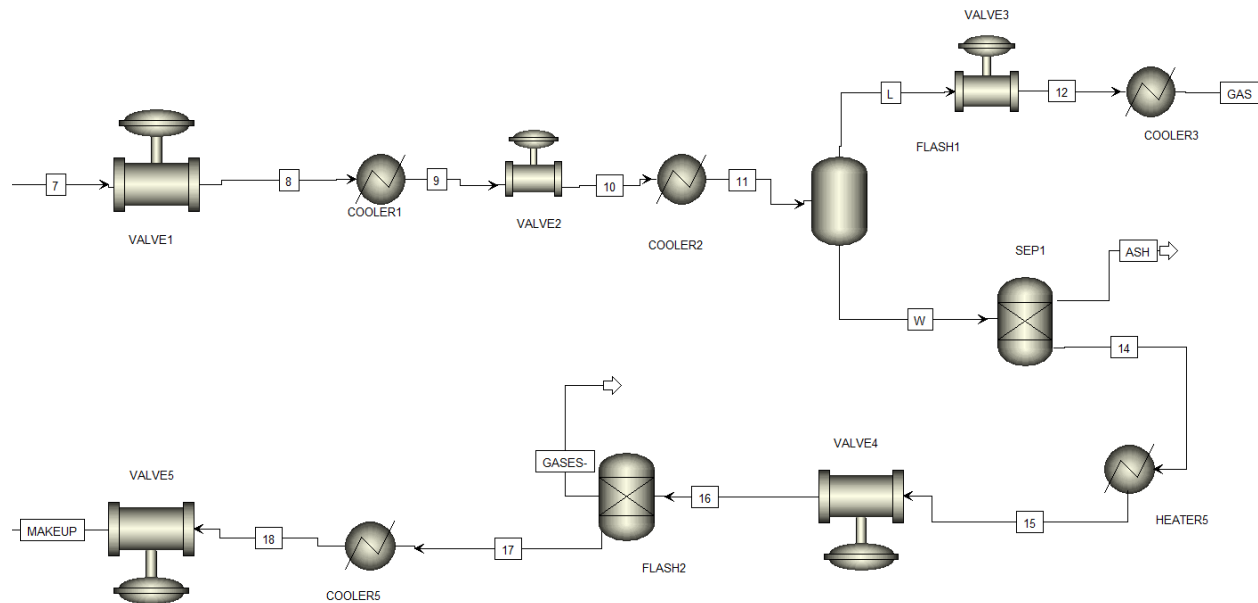
permite refinar el comportamiento del modelo termodinámico global, controlando de forma más precisa las rutas reactivas clave y ajustando rendimientos de productos de interés, acercando la simulación a comportamientos esperados en un escenario experimental.

5.8.3. Sistema de separación

En la Figura 5 se muestra la simulación de esta etapa del proceso, donde el *syngas* obtenido en el proceso de reacción debe pasar por un proceso de ajuste termodinámico.

Figura 5.

Sistema de separación



Nota. Tomado de Aspen Plus V15

Se usan dos válvulas para disminuir la presión de manera controlada y dos enfriadores para reducir la temperatura, alcanzando 60 °C y 60 bar, condiciones adecuadas para ingresar a un flash y promover la separación gas-líquido: agua y gas rico en hidrógeno. La corriente líquida se envía a un separador sólido-líquido que, para efectos de la simulación, se empleó el bloque Sep-1 como modelo de separación de un hidrociclón, obteniendo una corriente de sólidos de 22 kg/h que

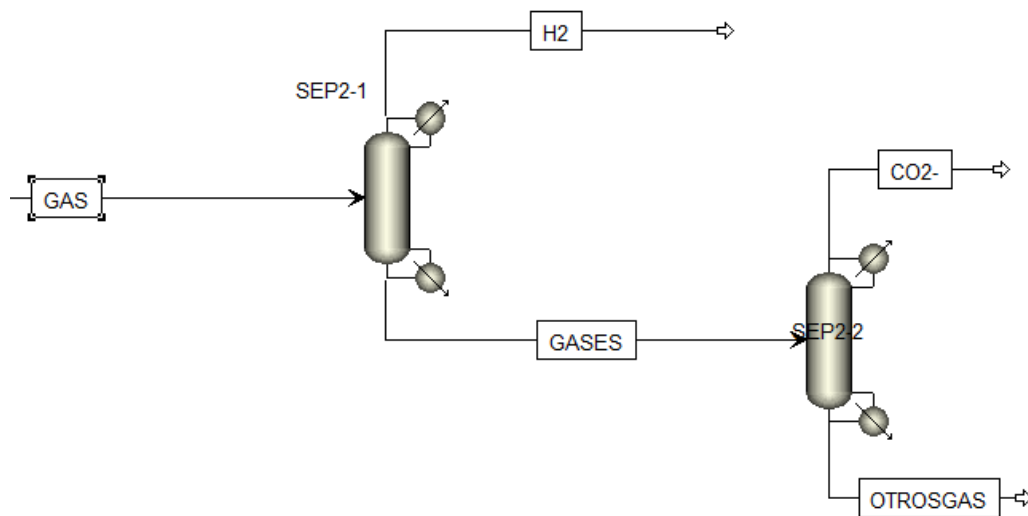
corresponden, principalmente, a cenizas y compuestos no orgánicos que no se convirtieron en la gasificación, y una corriente de agua que se recircula, la cual ingresa a un segundo flash, que opera a 150 ° C y 2 bares, con el fin de eliminar trazas de gases que aún permanecen disueltos en el agua. El gas que sale del primer flash se acondiciona (35 bares y 35 °C) antes ingresar al sistema de purificación.

5.8.4. Sistema de purificación

De acuerdo con lo propuesto por Streb & Mazzotti, (2021), una alternativa a emplear es un sistema de adsorción por oscilación de presión (PSA).

Figura 6.

Sistema de purificación del gas de síntesis



Nota. Tomado de Aspen Plus V15

La PSA permite la separación del hidrógeno presente en el gas de síntesis basándose en la diferencia de afinidad de los componentes hacia el material adsorbente sólido, en este caso Zeolitas 13X. Cuanto mayor es la presión se favorece la adsorción de gases en el sólido, mientras que a baja presión se promueve la desorción para la regeneración del lecho. Para una alimentación de 2834 kg/h de gas de síntesis, se obtienen 247 kg/h de H₂ al 99 %. Debido a que Aspen Plus V15

no modela adecuadamente el comportamiento dinámico real de la adsorción cíclica, y lo que se busca es evaluar el comportamiento global de la planta, se optó por emplear el bloque de simulación Sep2 (Üresin, 2026), el cual permite especificar directamente las fracciones de separación y se emplea como una aproximación simplificada de la etapa de separación. La corriente de gas adsorbido (2587 kg/h) se envía al bloque Sep2-2 para separar el dióxido de carbono presente en la mezcla, ya que se considera un subproducto valioso con potencial de comercialización (Figura 6).

A partir de la pulpa de café se obtienen 247 kg/h de hidrógeno con un rendimiento de 0,12 kg H₂/kg pulpa. La literatura reporta que la composición química de la biomasa es un factor importante en la eficiencia de la gasificación en agua supercrítica. En particular, la composición lignocelulósica, el contenido de hemicelulosa y celulosa contribuyen directamente en el rendimiento del hidrógeno (Maceda *et al.*, 2021), debido a que estos polisacáridos se descomponen de manera más eficiente bajo condiciones supercríticas, favoreciendo las reacciones de reformado de vapor y de desplazamiento agua-gas; por el contrario, la lignina es un componente más resistente a la degradación térmica y química debido a la compleja estructura aromática (Wang *et al.*, 2023). Para la pulpa de café, al ser una biomasa emergente en procesos termoquímicos, no existe evidencia reportada sobre su comportamiento en el proceso SCWG. Por esta razón, resulta necesario contrastar su desempeño frente a otras biomásas residuales como bagazo de caña, raquis del plátano y raquis de la palma de aceite.

Para cada biomasa se simuló el proceso de transformación bajo las mismas condiciones del caso base, lo que permite atribuir las diferencias en el rendimiento de generación de hidrógeno a la naturaleza de la materia prima. Esta metodología de comparación se sustenta con la práctica estándar en investigaciones de SCWG, como la reportada por Li *et al.*, (2024), quienes evaluaron

el rendimiento de hidrógeno de distintas biomásas bajo condiciones equivalentes de proceso para identificar el sustrato con mayor potencial. Al realizar la comparación se obtuvo que el bagazo de caña presenta la mayor generación de hidrógeno (516 kg/h), lo que puede atribuirse a su composición lignocelulósica: alto contenido de celulosa y hemicelulosa, y cantidad moderada de lignina. Los rendimientos obtenidos para cada biomasa se muestran en Tabla 8.

Tabla 8.

Generación de hidrógeno a partir de diferentes biomásas.

Biomasa	Generación (kg H₂/h)	Rendimiento kg H₂/kg pulpa
Pulpa de café	247	0,12
Bagazo de caña	516	0,25
Raquis de plátano	212	0,10
Raquis de palma	256	0,13

Es pertinente señalar que, aunque el raquis de plátano ha sido ampliamente estudiado en procesos termoquímicos como pirólisis, su estudio específico en SCWG aún es limitado en la literatura, por lo que su inclusión representa un aporte adicional al conocimiento sobre el comportamiento de esta biomasa regional bajo condiciones supercríticas. La pulpa de café, con un rendimiento similar al raquis de palma, tampoco ha sido reportada en la literatura como posible materia prima para el proceso SCWG.

Respecto a otros tipos de residuo, Kanchanatip *et al.*, (2020) reportan un rendimiento 0,016 kg H₂/kg de biomasa empleando desperdicios de alimentos como materia prima a una temperatura de 480 °C, y Liao *et al.*, (2020) obtuvieron un rendimiento de 0,006 kg H₂/kg de biomasa utilizando el mismo tipo de residuo a 420 °C. Por su parte, Yildirim *et al.*, (2020) alcanzaron 0,06 kg H₂/kg de biomasa a partir de puerro y coliflor, y Gökkaya *et al.*, (2021) alcanzaron 0,077 kg H₂/kg biomasa al emplear residuos de la industria vinícola a 600 °C. Estos últimos autores también concluyen que, al trabajar con residuos de la generación de aceite de oliva a 780 °C, se obtienen 0,225 kg

H₂/kg biomasa. Al contrastar el desempeño de la pulpa de café, es claro que se superan los valores reportados para desperdicios de alimentos, exceptuando el aceite de oliva; esto se explica por su composición: su elevado contenido lipídico favorece la generación de hidrocarburos y metano (Costa *et al.*, 2025). Las diferencias observadas sugieren que la composición de la biomasa y las condiciones de operación influyen significativamente en el desempeño del proceso.

5.8.5. Dimensionamiento de equipos

Se tomaron los resultados obtenidos de la simulación, teniendo en cuenta variables como caudales, composiciones, condiciones termodinámicas y requerimientos energéticos de cada unidad de proceso. Se seleccionó la simulación correspondiente al bagazo de caña, debido a que esta materia prima presenta mayor generación de hidrógeno. El dimensionamiento se realizó bajo un enfoque de diseño conceptual, orientado principalmente a la estimación de costos de capital mediante dimensiones representativas de los equipos. En este sentido, el cálculo de las variables características de diseño se llevó a cabo de acuerdo con lineamientos heurísticos presentados por Seider *et al.*, (2009) y Towler & Sinnott, (2013). Así mismo, se fijó un sobredimensionamiento con un margen de seguridad del 20 %, asegurando robustez y flexibilidad.

Para los mezcladores el parámetro principal de diseño corresponde a la capacidad volumétrica del equipo, expresada en términos de volumen útil requerido para el procesamiento del material. Para los separadores flash, la variable de diseño es el peso del equipo en libras (lb), debido a que se modelan como recipientes de presión verticales. Para su cálculo se requieren tres parámetros: diámetro interno (D_i), longitud o altura (L) y el espesor de pared (t_s). El espesor de pared se fijó en 10 mm, un valor estándar de rigidez para equipos de diámetro medio, y la relación longitud- diámetro (L/D) del separador se estableció en 3, adoptado como criterio inicial de diseño en recipientes a presión.

En cuanto las torres de adsorción, el parámetro para la estimación de costos es también el peso del recipiente (lb). El tamaño del equipo se basa, principalmente, en el lecho necesario para adsorber la cantidad deseada de soluto antes de alcanzar la condición de ruptura. Su diámetro se estimó a partir el área transversal, calculada con base en la velocidad superficial del fluido (100 ft/min para gases según Seider *et al.*, 2009). Además, se fijó una relación altura (L)/diámetro (D) de 3, dado que la literatura indica que las alturas típicas de los lechos de adsorbentes en fase gaseosa varían de 1 a 3 veces el diámetro, adicionando un margen de seguridad de 2 ft sobre el valor calculado. El costo del adsorbente se estimó tomando como base su volumen a granel en ft³.

En la trituradora la variable de diseño corresponde a la capacidad o caudal de procesamiento de sólidos; por esta razón, se consideró la velocidad de alimentación de sólidos al equipo, expresada ton/h. De manera similar, en el hidrociclón el costo se estimó en función del caudal de alimentación en gpm; a partir de este valor se calculó el diámetro de cámara (D_c), considerado el principal parámetro geométrico del equipo (Towler & Sinnott, 2013). La bomba empleada es de tipo centrífuga radial, y su factor de tamaño se determina en función del flujo volumétrico que circula a través del equipo, expresado L/s.

El gasificador se caracterizó como un reactor de flujo pistón (PFR), una aproximación válida para SCWG debido a la naturaleza del proceso (Pinkard *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2024): operación a 750 °C y 22 bar con flujo en régimen continuo sin mezcla axial significativa, lo cual se garantiza mediante una relación L/D de 6 según las heurísticas de diseño reportadas por Seider *et al.*, (2009). Así mismo, en ausencia de datos cinéticos, su dimensionamiento se estimó con base en el flujo volumétrico de entrada (61,65 m³/h) y un tiempo de residencia de 1 min, valor seleccionado con base por Reddy *et al.*, (2024), que reportan valores entre 15 a 60 segundos para temperaturas de 600 a 765 °C. Se obtuvo un volumen de 1,23 m³. El reactor se costea como un

recipiente a presión fabricado con Inconel 625, ya que esta aleación compuesta de níquel, cromo y molibdeno se usa, generalmente, en procesos hidrotermales debido a su gran resistencia mecánica a condiciones de temperatura y presión elevadas, y presenta una resistencia química suficiente a la corrosión (Castello *et al.*, 2013). El espesor de pared de 0,07 m fue verificado mediante la ecuación de pared delgada del código ASME Section VIII, División 1 (ASME, 2023).

Finalmente, en los intercambiadores de calor la variable de diseño corresponde al área de transferencia de calor estimada a partir de la carga térmica, el coeficiente global de transferencia y la diferencia de temperatura media logarítmica (Seider *et al.*, 2009). Los resultados se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9.

Equipos de la planta

Equipo	Variable de diseño	Valor	Unidad
Mixer 1	Capacidad del tanque	34,163	ft ³
Mixer 2	Capacidad del tanque	1,8543	ft ³
Heater 1	Área	2227,586	ft ²
Heater 2	Área	562,933	ft ²
Cooler 1	Área	680,297	ft ²
Cooler 2	Área	2519,243	ft ²
Cooler 3	Área	313,620	ft ²
Heater 3	Área	764,366	ft ²
Cooler 5	Área	4470,399	ft ²
Flash	Carcasa del equipo	700,325	lb
Flash	Carcasa del equipo	539,097	lb
SEP2-1	Carcasa del equipo	660,999	lb
SEP2-2	Carcasa del equipo	195,139	lb
Trituradora	Flujo másico	2,449	Ton/h
Hidrociclón	Flujo másico	24,766	gpm
Bomba	Flujo volumétrico	43,580	gpm
Reactor SCWG	Carcasa del equipo	15208,54	lb

6. Análisis Económico

6.1. Costos de capital (CAPEX)

El costo total de capital se estimó en 13.839.978 USD. Los costos base de los equipos se calcularon en función de sus variables de diseño y condiciones de operación específicas. Adicionalmente, se incluyeron costos asociados al montaje e instalación, sistemas de tuberías, instrumentos de control, obras civiles y sistemas eléctricos siguiendo metodologías reportada en la literatura (Turton *et al.*, 2018; Seider *et al.*, 2009). La actualización de los costos de los equipos se realizó mediante el índice de costos de ingeniería química (CEPCI). De acuerdo con Turton *et al.*, (2018), el índice representa un valor base de 500 para el año 2006. Para el año 2025, el CEPCI reportó un valor de 859,29 (Jenkins, 2026). Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.

Costos fijos de la planta

Equipo	Variable de diseño	Costo Base USD	Costo Actualizado USD
Mezcladores	Capacidad del tanque	1.721,99	136.907
Intercambiadores de calor	Área	113.987,87	8.651.086
Separadores	Carcasa del equipo	4.515,90	493.519
Bomba	Flujo volumétrico	9.078,22	780.930
Triturador	Flujo másico	7.642,27	372.095
Hidrociclón	Flujo másico	1.194,38	63.202
Reactor de gasificación	Carcasa del equipo	32.747,14	3.342.236
CAPEX TOTAL			13.839.978

6.2. Servicios industriales

Los costos de los servicios industriales fueron estimados a partir de valores de referencia reportados Turton *et al.*, (2018). La energía eléctrica constituye la principal fuente de energía y su uso se concentra en equipos de tipo rotatorio y mecánico; el costo de este servicio fue estimado a partir de la tarifa reportada en la literatura: 16,8 USD/GJ, que al actualizar resultó en 0,098 USD/kWh. En cuanto al agua de enfriamiento, su costo reportado en términos energéticos es 0,354

USD/GJ, actualizado a $2,07 \times 10^{-3}$ USD/kWh. Por otra parte, el proceso emplea vapor de media presión (de 100 a 200 psig) como servicio térmico; el costo del vapor reportado es 14,83 USD/GJ, equivalente a 0,0867 USD/kWh actualmente. El costo anual de los servicios industriales (C_{UT}) se calculó a partir del consumo energético de los equipos, el costo unitario de cada servicio, y las horas de operación, las cuales se establecieron en 7920 h/año, según lo recomendado por Turton *et al.*, (2018). Los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11.

Servicios Industriales del Proceso.

Servicio	Equipo	Consumo anual	Unidad	Costo Unitario (USD)	Costo anual (USD)
Energía Eléctrica	Mixer 1	702,0832673	kWh/año	0,10	68,98
	Mixer 2	1343,492672	kWh/año	0,10	132,00
	Trituradora	356325,288	kWh/año	0,10	35.010,68
	Bomba	359263,872	kWh/año	0,10	35.299,41
Enfriamiento	Cooler 1	23652367,2	kWh/año	0,002	48.969,148
	Cooler 2	29547698,4	kWh/año	0,002	61.174,664
	Cooler 3	518887,512	kWh/año	0,002	1.074,289
	Cooler 5	27891943,2	kWh/año	0,002	57.746,638
	Sep2-1	65260,404	kWh/año	0,002	135,113
	Sep2-2	8387,8344	kWh/año	0,002	17,366
Calentamiento	Heater 1	21939271,2	kWh/año	0,086	1.902.865,18
	Heater 2	15887757,6	kWh/año	0,086	1.377.997,50
	Heater 3	4218073,2	kWh/año	0,086	365.847,37
	Flash	21785306,4	kWh/año	0,086	1.889.511,31
	Reactor de gasificación	224114616	kWh/año	0,086	19.438.198,12

6.3. Costos de operación (OPEX)

Los costos de operación de la planta se estimaron con base en la metodología propuesta por Turton *et al.*, (2018), la cual define el costo de manufactura (COM) como la suma de gastos variables y fijos asociados a la operación del proceso. Dentro de los costos variables se consideraron las materias primas (CRM), los servicios industriales (CUT), la mano de obra (COL),

así como costos de mantenimiento e insumos requeridos para el buen funcionamiento de la planta. Por otra parte, los gastos fijos incluyen los impuestos, depreciación y gastos generales de la planta. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12.*Costos operativos del proceso*

ITEM	TOTAL (USD/año)
COSTOS VARIABLES	
Materias primas CRM	85,54
Servicios industriales CUT	22.796.262
Supervisión y trabajo de oficina	33.179
Mano de obra COL	184.328
Mantenimiento	83.039
Insumos de operación	26.278
Laboratorio	27.649
COSTOS FIJOS	
Depreciación	291.982
Impuestos y obligaciones	93.434
Gastos generales de la planta	235.618
OPEX TOTAL	23.771.859

6.4. Indicadores Económicos

Con el fin de evaluar el desempeño económico del proyecto, se determinaron los potenciales económicos, los cuales permiten analizar la rentabilidad del proceso, considerando tanto los ingresos generados por la venta de los productos principales como los costos asociados a la operación del sistema. En primer lugar, se calculó el potencial económico 2 (PE2), el cual corresponde a la diferencia entre ingresos obtenidos y costos de las materias prima.

$$PE2 = \text{Ingresos} - \text{Materia prima} \quad Ec.5$$

Se consideró como fuentes de ingreso la comercialización de hidrógeno y dióxido de carbono. El precio de venta del hidrógeno fue establecido en 3.000 USD/ton con base en la información reportada por el Instituto Global para el Crecimiento Verde, (2025), y el valor

comercial del dióxido de carbono se fijó en 23,15 USD/ton, basado en los lineamientos y referencias económicas reportadas por el Ministerio de Minas y Energía, (2021), representando un total de ingresos de 12.324.515 USD/año. En cuanto a los costos de la materia prima, se incluyó el agua utilizada en el proceso de gasificación, con un valor total de 85,54 USD/año. Como resultado, se obtuvo un PE2 de 12.324.429 USD/año.

$$PE3 = PE2 - CAPEX_{anual} - OPEX \quad Ec. 6$$

Posteriormente, el Potencial Económico 3 (PE3) se determinó teniendo en cuenta el costo anualizado equivalente de la inversión del capital ($CAPEX_{anual}$) y el costo total de operación (OPEX). El cálculo del $CAPEX_{anual}$ se realizó mediante la Ecuación 7, considerando el costo total de capital y el factor de recuperación de capital (CRF), parámetro que depende de la tasa de descuento ($i = 10\%$) y el periodo de recuperación del proyecto ($n = 20$) (Turton *et al.*, 2018; Seider *et al.*, 2009). El CRF obtenido es de 0,12 para un $CAPEX_{anual}$ es de 1.619.277 USD/año. El potencial económico 3 calculado es de -13.066.707 USD/año.

$$CAPEX_{anualizado} = CAPEX * CRF \quad Ec. 7$$

Adicionalmente, se estimó el Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH), indicador económico de referencia ampliamente utilizado para la evaluación y comparación de tecnologías de generación de hidrógeno. El LCOH (Ecuación 8) expresa el costo unitario de producción por kilogramo de hidrógeno a lo largo de la vida útil del proyecto, con base en el $CAPEX_{anual}$, OPEX y la producción anual de hidrógeno generado (De la Ossa & Isabella, 2026)

$$LCOH = \frac{CAPEX_{anual} + OPEX_{anual}}{Producción\ anual\ de\ H_2} \quad Ec. 8$$

El LCOH es de 6,21 USD/kg H₂. Al comparar este resultado con los valores reportados en la literatura para tecnologías termoquímicas de producción de hidrógeno a partir de biomasa, se observa que se encuentra dentro del rango actual de variación reportado para Colombia (3,24 – 8,06 USD/ kg H₂), pero es superior al costo actual de producción, estimado entre 4 y 6 USD/ kg H₂. Si bien este resultado supera la meta establecida para el país, que busca alcanzar costos de producción de hidrógeno entre 1,7 – 3,1 USD/ kg H₂, el valor que se obtuvo se mantiene por debajo del umbral de competitividad de 7 USD/ kg H₂ (Niño, 2025). Esta diferencia respecto a los valores de referencia se atribuye, principalmente, a los elevados costos de inversión y las altas condiciones de operación, factores que impactan directamente sobre el LCOH, consistente con lo reportado en estudios similares (Dávila & Vélez, 2025).

6.5. Indicadores financieros

El análisis financiero se proyectó en un periodo de 20 años y se incorporó el efecto de la inflación del país mediante el índice de precios al consumidor (IPC), reportado por el DANE para marzo de 2026 (5,56 %). El valor actual neto (VAN) obtenido fue de -79.745.050 USD, lo que indica que el proyecto no genera valor económico bajo el escenario establecido. De igual manera, no fue posible obtener una Tasa Interna de Retorno (TIR) debido a que los flujos de caja acumulados permanecen negativos durante todo el periodo en el que se realizó el análisis. El índice de rentabilidad (IR), indicador que relaciona el valor actual de los flujos de efectivo y la inversión inicial, presento un valor de 0,50 porque los ingresos generados no son suficientes para cubrir la inversión ni los gastos asociados a la operación del sistema.

Con base en estos resultados, se identifica que el principal factor que afecta la viabilidad económica del proyecto corresponde al elevado costo de los servicios industriales. El consumo de energía y agua representan una fracción significativa de los costos operaciones, alcanzando un

valor aproximado de 22.796.262 USD/año, superando los ingresos generados por la comercialización de los productos. Como lo indican otros autores (Dávila & Vélez, 2025), gran parte del consumo energético está asociado al acondicionamiento térmico de la alimentación, ya que tanto la biomasa y el agua deben calentarse a temperaturas superiores a 374 °C y presiones mayores a 221 bar para alcanzar condiciones supercríticas. Además, otras investigaciones señalan que el alto costo operativo representa uno de los principales obstáculos para el desarrollo e implementación de esta tecnología a escala industrial (Ciuffi *et al.*, 2020; Barros *et al.*, 2022b; Munawar *et al.*, 2023); por ejemplo: el reactor de gasificación debe fabricarse con materiales resistentes no solo a la corrosión, sino también a las altas temperaturas y presiones, incrementando considerablemente los costos de inversión.

Las memorias de cálculo que incluyen dimensionamiento de equipos, evaluación económica detallada y simulaciones realizadas para el proceso pueden ser consultadas en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1kmxFjIifQcNn6eL7IHON6DMZyVtvyf1X?usp=sharing>

7. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se identificó que la pulpa de café es una materia prima técnicamente viable para la producción de hidrógeno mediante el proceso de gasificación en agua supercrítica en el departamento de Santander. Su poder calorífico, composición elemental y estructura lignocelulósica favorecen la generación del gas de síntesis con alto contenido de hidrógeno; además, presenta un alto contenido de humedad (82 %, aproximadamente), lo cual es adecuado para la SCWG. Adicionalmente, su elevada disponibilidad (15.590 Ton/año) y generación constante como residuo agroindustrial garantizan la sostenibilidad del suministro.

Aspen Plus V15 como herramienta computacional permite integrar las etapas de acondicionamiento de la biomasa, reacción, separación y purificación. A partir de la pulpa de café se obtuvo un rendimiento de 0,12 kg H₂/kg biomasa; al comparar este desempeño frente a otras biomásas disponibles en Santander, se encontró que el bagazo de caña presenta mayor rendimiento (0,25 kg H₂/kg biomasa), valores similares respecto al raquis de palma (0,13 kg H₂/kg biomasa) y un desempeño superior al obtenido con raquis de plátano (0,10 kg H₂/kg biomasa), lo que posiciona a la pulpa como materia prima viable para la producción de hidrógeno mediante SCWG. Es a resaltar que, a la fecha, no se identifican estudios empleando pulpa de café como materia prima; por lo tanto, este trabajo constituye una contribución al estado del arte y supone un punto de partida para el estudio de valorización como fuente de H₂.

En lo referente al análisis económico, se obtuvo que la planta no es financieramente viable bajo las condiciones establecidas para el proceso. Los ingresos anuales por la comercialización del hidrógeno y dióxido de carbono ascienden a 12.324.515 USD/año, mientras que los costos operacionales alcanzan 23.771.859 USD/año, casi el doble de los ingresos generados. Esta brecha

se explica, principalmente, por el costo de los servicios industriales (22.796.262 USD/año). En consecuencia, el valor actual neto (VAN) resultó negativo (-79.745.050 USD) y el costo nivelado de hidrógeno es de 6,21 USD/Kg H₂, el cual supera el costo actual de producción estimado entre 4 y 6 USD/ Kg H₂, aunque dentro del rango reportado para tecnologías termoquímicas a partir de biomasa en Colombia (3,24 – 8,06 USD/Kg H₂). Estos resultados indican que la inviabilidad económica responde a una limitación estructural asociada al alto requerimiento energético de las condiciones supercríticas y no a una debilidad intrínseca de la tecnología.

8. Recomendaciones

Se recomienda implementar una red de intercambiadores de calor (HEN) con el fin de maximizar la recuperación de energía térmica entre las corrientes del proceso. Esta integración permite aprovechar el calor de corrientes calientes para precalentar otras corrientes del sistema, reduciendo así el consumo energético y mejorando la eficiencia global del proceso. Además, el diseño de este tipo de redes puede apoyarse en metodologías como el análisis Pinch, el cual identifica y aprovecha el potencial calorífico de las corrientes calientes del proceso, minimizando así el consumo de utilidades externas.

Referencias bibliográficas

- AIMPLAS. (2023). Gasificación: método termoquímico para el tratamiento sostenible de residuos.
- Alptekin, F. M., & Celiktaş, M. S. (2022). Review on Catalytic Biomass Gasification for Hydrogen Production as a Sustainable Energy Form and Social, Technological, Economic, Environmental, and Political Analysis of Catalysts. *ACS Omega*, 7(29), 24918–24941. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01538>
- Assureira, E., & Assureira, M. (2022). Transformación de las hojas de caña de azúcar en biocarbón para su uso como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa de minerales de hierro. *Información Tecnológica*, 33(3).
- Augelletti, R., Conti, M., & Annesini, M. C. (2017). Pressure swing adsorption for biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1390–1398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.013>
- Ayhan Demirbas. (2009). Avances y tendencias recientes de los combustibles biodiésel. *Conversión y Gestión de Energía*, 50(1), 14–34.
- Barros, T. V., Lopez, G. de S., Santos, R. J. dos, Parizi, M. P. S., Cardozo-Filho, L., & Ferreira-Pinto, L. (2022a). Gaseificação da biomassa em água supercrítica como tecnologia de produção de hidrogênio. *Research, Society and Development*, 11(9), e32511931296. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31296>
- Bayona Roa, C. A., García Navarro, J. G., Jeisson, G., & Ricaurte, H. (2023a). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. *Palmas*, 44(1), 51–64. <https://doi.org/10.56866/01212923.13806>

- BBVA. (2024). ¿Qué es el hidrógeno verde? Solución y desafío para la descarbonización. Sostenibilidad.
- Bedoya Betancur, S., Amar Gil, S., Barrera Zapata, R., Villaseñor Arriola, E., & Ardila Arias, A. (2021). Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia. (SciElo, Ed.) Ingeniería, 26(3).
- BK Nahak, S., & Preetam , D. (2022). Advancements in net-zero pertinency of lignocellulosic biomass for climate neutral energy production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Recuperado el 1 de 11 de 2025, de <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.rser.2022.112393>
- Boese Cortés, I., & Soto, I. (2023). Renewable Hydrogen in Latin America And The Caribbean: opportunities, challenges, and pathways. LAC Green Hydrogen Action. www.h2chile.cl
- Boukis, N., & Stoll, I. K. (2021b). Gasification of Biomass in Supercritical Water, Challenges for the Process Design—Lessons Learned from the Operation Experience of the First Dedicated Pilot Plant. Processes, 9(3), 455. <https://doi.org/10.3390/pr9030455>
- Brian R. Pinkard, David J. Gorman, Kartik Tiwari, Elizabeth G. Rasmussen, John C. Kramlich, Per G. Reinhall, & Igor V. Novosselov. (2019). Gasificación de agua supercrítica: estrategias prácticas de diseño y desafíos operativos para reactores de flujo continuo a escala de laboratorio. Cornell University.
- Brijaldo, M., Castillo, C., & Pérez , G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. Ingeniería y Competitividad. doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.11155>

Café de Santander - Federación Nacional de Cafeteros Santander. (n.d.). Retrieved February 26, 2026, from <https://santander.federaciondecafeteros.org/cafe-de-santander/>

Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para uso en la alimentación animal. (2024).

Carranza Rojas, E. (2015). Pirólisis de la fibra de la palma africana de aceite.

CENICAFÉ. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Recuperado el 30 de 10 de 2025, de <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0393.pdf>

Chakinala, A. G., Brilman, D. W. F. (Wim), van Swaaij, W. P. M., & Kersten, S. R. A. (2010). Catalytic and Non-catalytic Supercritical Water Gasification of Microalgae and Glycerol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(3), 1113–1122. <https://doi.org/10.1021/ie9008293>

Chen, W.-H., & Chen, C.-Y. (2020). Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: A review. *Applied Energy*, 258, 114078. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114078>

Chico, S., Romero, M., Chulde, D., & Narváez, R. (2024). Kinetic study of supercritical water gasification of cellulose from Biomass. 3(02). <https://doi.org/https://doi.org/10.53591/easi.v3i2.1051>

Chukwudi O. Onwosi . (2022). Cattle manure as a sustainable bioenergy source: Prospects and environmental impacts of its utilization as a major feedstock in Nigeria. 19. [doi:https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101151](https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101151)

- Ciuffi, B., Chiaramonti, D., Rizzo, A. M., Frediani, M., & Rosi, L. (2020). A Critical Review of SCWG in the Context of Available Gasification Technologies for Plastic Waste. *Applied Sciences*, 10(18), 6307. <https://doi.org/10.3390/app10186307>
- Coperativa de caficultores de Santander. (2023). Informe de Gestión y balance social . <https://coopsantander.com/wp-content/uploads/2024/06/Informe-de-Gestion-Ano-2023-comprimido.pdf>
- DANE. (2026, March). Índice de precios al consumidor (IPC).
- David Resano, O. G. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción.
- Dávila, S., & Vélez, Y. (2025). Producción De Hidrógeno Mediante Gasificación Del Bagazo De Caña En Agua Supercrítica. Escuela Colombiana de estudios intermedio.
- De la Ossa, C., & Isabella, J. (2026). Evaluación técnica-económica de tres tipos de electrólisis para la generación de hidrógeno verde. Universidad Industrial de Santander.
- Demirel, E., Erkey, C., & Ayas, N. (2021). Supercritical water gasification of fruit pulp for hydrogen production: Effect of reaction parameters. *The Journal of Supercritical Fluids*, 177, 105329. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105329>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2014). Ley 1715 de 2014. Función Pública.
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2021, July 10). Ley 2099 de 2021. https://www.funcionpublica.gov.co/Eva/Gestornormativo/Norma_pdf.php?I=166326.

- Ding, N., Azargohar, R., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2014). Catalytic gasification of cellulose and pinewood to H₂ in supercritical water. *Fuel*, 118, 416–425. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.021>
- Dorine D. Washaya , & Soul Washaya. (14 de novimebre de 2023). Beneficios, preocupaciones y perspectivas del uso de estiércol de cabra en el África subsahariana. *Pastoralismo*. <https://doi.org/10.1186/s13570-023-00288-2>
- ECB. (2022). Palm kernel shell activated carbon using phosphoric acid for crude palm oil clarification: properties and application. <https://doi.org/10.31838/ecb/2022.11.04.001>
- EMAB. (2024). Aprovechamiento y disposición de residuos. . Indicadores.
- EMAB. (2024). Indicadores. Obtenido de Aprovechamiento y disposición de residuos: <https://emab.gov.co/aprovechamiento-y-disposicion-de-residuos/>
- Escalante Hernández, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2011). Atlas del potencial Energético de la biomasa residual en Colombia. Recuperado el 12 de 7 de 2025
- Evaluaciones Agropecuarias Municipales - EVA | UPR. (n.d.). Retrieved February 27, 2026, from <https://upra.gov.co/es-co/eva>
- FEDEMADERAS. (2024). Boletín Estadístico Forestal.
- Federación Nacional de Cafeteros . (2025). Café de Santander. Recuperado el 3 de Febrero de 2026, de <https://santander.federaciondecafeteros.org/cafe-de-santander/>
- Ferreira-Pinto, L., Feirhrmann, A. C., Corazza, M. L., Fernandes-Machado, N. R. C., dos Reis Coimbra, J. S., Saldaña, M. D. A., & Cardozo-Filho, L. (2015). Hydrogen production and

- TOC reduction from gasification of lactose by supercritical water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(36), 12162–12168. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.092>
- Fiori, L., Valbusa, M., & Castello, D. (2012). Supercritical water gasification of biomass for H₂ production: Process design. *Bioresource Technology*, 121, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.116>
- Fortune Business Insights. (2025, August 11). Tamaño del mercado de hidrógeno a energía participación e análisis de la industria, por tecnología y pronóstico 2024-2032.
- Fred Kelly, & Michael L. Westendorf, (s.f.). Almacenamiento de estiércol en pequeñas granjas de caballos y ganado. Obtenido de New Jersey Agricultural experimet station: https://esc.rutgers.edu/fact_sheet/storing-manure-on-small-horse-and-livestock-farms/
- Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo. (s.f.). Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, 1.
- Global Market Insights. (2025, April 11). Tamaño del mercado del hidrógeno: por tipo (gris, azul, verde) y por aplicación (refinación de petróleo, productos químicos), 2025-2034.
- Gómez, C. (2024). Revisión del Estado Tecnológico de Electrolizadores para la Producción de Hidrógeno. Universidad Industrial de Santander.
- Guarnizo, F. A. (2012). Azúcares del pseudotallo de plátano: una opción para la obtención de alcohol de segunda generación. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. Recuperado el 30 de 10 de 2025, de <https://www.redalyc.org/pdf/903/90326398009.pdf>

- Gutiérrez Ortiz, F. J. (2022). Biofuel production from supercritical water gasification of sustainable biomass. *Energy Conversion and Management*: X, 14, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100164>
- Hanaoka, T. (2002). Effect of chemical property of waste biomass on air-steam gasification. *Journal of the Japan Institute of Energy*. doi: <https://doi.org/10.3775/jie.84.1012>
- Hayashi, S., & Siemanond, K. (2018). Compact and Multi-Stream Heat Exchanger Design (pp. 663–668). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50118-2>
- Hernán Américo Peretti, & Arnaldo Visintin. (n.d.). *HIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO: ¿POR QUÉ, ¿CÓMO Y DÓNDE?* Universidad Nacional de La Plata.
- Higman, C. (2020). En Problemas de ingeniería de combustión para sistemas de combustibles sólidos. Editorial Académica, 423–468.
- Hongcai, S. (2020). Assessment of supercritical water gasification of food waste under the background of waste sorting: Influences of plastic waste contents. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.ijhydene.2020.05.256>
- Ibarra Vallejo, M. A., & Marquéz Muñoz, L. I. (s.f.). Identificación de usos potenciales para el aprovechamiento de los residuos generados en el proceso de beneficio del plátano (*Musa paradisiaca*) var. Hartón. *CEI Boletín Informativo Ingenierías*, 9(2-2022). <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/download/3179/3479/7851>

- Ibrahim, M. (2020). Preparation and characterization of cornhusk/sugar palm fiber reinforced Cornstarch-based hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1).
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.045>
- IDOM. (2025). Análisis de las cadenas de valor de derivados del hidrógeno y la regulación habilitante en Colombia.
https://www.minenergia.gov.co/documents/14249/60.Consultoria_IDOM_Cadena_valor_H2_derivados.pdf
- IMPLAS. (2023). Gasificación: método termoquímico para el tratamiento sostenible de residuos.
- Insights, F. b. (2025). Tamaño del mercado de hidrógeno a energía, participación e análisis de la industria, por tecnología (celdas de combustible, turbinas de gas y otras), por usuario final (transporte, industrial, plantas de energía y otras), y pronóstico regional, 2024-2032. Fortune Business Insights.
- Instituto Global para el Crecimiento Verde. (2025). Viabilidad del Artículo 6 para hidrógeno verde en Colombia. Colombia: GGGI.
- International Energy Agency, I. (2023). Global Hydrogen Review 2023. www.iea.org
- James Andrés Gómez Soto, Óscar Julián Sánchez Toro, & Luis Gerónimo Matallana Pérez. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28.
- JEE. (2022). Experimental Investigation and Simulation of Slow Pyrolysis Process of Arabica Coffee Agroindustry Residues in a Pilot-Scale Reactor. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/367674674_Experimental_Investigation_and_S

imulation_of_Slow_Pyrolysis_Process_of_Arabica_Coffee_Agroindustry_Residues_in_a_Pilot-Scale_Reactor/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjojX2

Jenkins, S. (2026). Las presiones inflacionarias elevan la media anual de CEPCI 2025 por encima de la de 2024. Chemical Engineering.

Jiménez, L., Larreal, M., & Noguera, N. (2004). Efectos del estiércol bovino sobre algunas propiedades químicas de un Ultisol degradado en el área de la Machiques Colon, estado Zulia. Revista de La Facultad de Agronomía , 21(4).

Juan C. Acevedo, Erika Arenas, Zulamita Zapata Benabithé, & Fausto Posso. (2019). La importancia de los catalizadores en la gasificación de biomasa: Una revisión de la literatura. Instituto Antioqueño de Investigación.

Juan Pérez, David Borge, & Juan Agudelo. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.

Juan Pérez, David Borge, & Juan Agudelo. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.

Kladisios, P., & Stegov Sagia, A. (2022). Una revisión sobre la gasificación de biomasa con agua supercrítica. 3(4).

- Kumar, P., & Fiori, L. (2024). Rutas termoquímicas y biológicas para la producción de biohidrógeno: una revisión. *Conversión y gestión de energía*:X.
- Lebling, K., Gangotra, A., Hausker, K., & Byrum, Z. (2025). Captura, uso y secuestro de carbono.
- Lee, I.-G., Kim, M.-S., & Ihm, S.-K. (2002). Gasification of Glucose in Supercritical Water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(5), 1182–1188.
<https://doi.org/10.1021/ie010066i>
- Li, H., Zhang, M., Wang, H., Han, X., Zeng, Y., & Xu, C. C. (2024). Comparison study of supercritical water gasification for hydrogen production on a continuous flow versus a batch reactor. *Bioresource Technology*, 391, 129923.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129923>
- Londoño Londoño, J., Sierra, J., Álvarez, R., Restrepo Duque, A., & Pássaro Carvalho, C. (s.f.). Aprovechamiento de los subproductos citrícolas. Repository unilasallista. Obtenido de <https://repository.unilasallista.edu.co/server/api/core/bitstreams/6092751a-d146-4270-a94a-1eea90c548e2/content>
- Luberti, M., & Ahn, H. (2022). Review of Polybed pressure swing adsorption for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(20), 10911–10933.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.147>
- M. P. KURNIAWAN, A. D. GURITNO, B. PURWANTANA, & W. SUPARTONO. (2022). Enfoque de costos de producción y contabilidad de costos del flujo de materiales como un paso hacia el aumento de la responsabilidad, la eficiencia y la sostenibilidad (RES): el caso de una planta de beneficio de aceite de palma en Banten, Indonesia. FEDEPALMA.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13842/13637#toc>

- MA1, A.-N. (1998). Palm oil mills - Process Control. PALMAS, 19. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/672/672>
- Maíia H.Brijaldo, Cristian Castillo, & Gerónimo Pérez. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. Ingeniería y Competitividad.
- Manals, E., Penedo, M., & Salas, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. Tecnología Química , 35(2).
- Manrique, W., & Raiza, J. (30 de 09 de 2018). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/c390f327-69f5-4295-9c5f-cd5da305c86d>
- Marrugo, G. (2017). Gasificación de biocarbón: Estudio experimental sobre residuos de biomasa agroindustrial colombiana en lecho fluidizado. Energía y combustibles. <https://pubs-acsc-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/doi/10.1021/acs.energyfuels.7b00665>
- Martins, A. (2024). Production of Green Hydrogen From Supercritical Water Gasification of High-Moisture Biomass Using Aspen Plus®. AIP Conference Proceedings. de <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1063/5.0210538>
- Mendes dos Santos, É., Malvezzi de Macedo, L., Lacalendola Tundisi, L., & Artem Ataide, J. (mayo de 2021). Subproductos del café en formulaciones tópicas: Una revisión. (Elsevier, Ed.) Tendencias en ciencia y tecnología de los alimentos, 111, 280-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.064>
- Minambiente. (2024). Plan de gestión integral de residuos. Recuperado el 16 de 7 de 2025

- Ministerio de Minas y energía. (2021). Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia. https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrógeno_Colombia_2810.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). Hidrógeno verde: Cadena productiva, potenciales usos y beneficios para el Perú. Proyecto Hidrógeno Verde, 02.
- Ministerio de Minas y Energía. (2025). Fuentes No Convencionales de Energía Renovable - FNCER. Energía.
- Mondragón, J., Serna, J., García, L., & Jaramillo, M. (2018). Caracterización fisicoquímica de los subproductos cáscara y vástago del plátano Dominicano Harton. Revista ION.
- Montiel, N., & Pérez, J. (2019). Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas. Información Tecnológica, 30(1).
- Montilla-Pérez, J., Arcila-Pulgarín, J., Aristizábal-Loaiza, M., Montoya-Restrepo, E. C., Puerta-Quintero, G. I., Carlos, Oliveros-Tascón, E., & Cadena -Gómez, G. (n.d.). Propiedades Físicas Y Factores De Conversión Del Café En El Proceso De Beneficio Gerencia Técnica / Programa de Investigación Científica / abril de 2008.
- Moreno Chocontá, L. (2024). Aprovechamiento del bagazo de la caña procedente de la industria panelera, a través del tratamiento hidrotermal. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/items/96389e6a-e145-4e90-995e-6533915f7df4>

- Muhammad Iberia Aydin, Ali Erdogan Karaca, Ali MMI Qureshy, & Ibrahim Dicer. (2021). Una revisión comparativa sobre la producción de hidrógeno limpio a partir de aguas residuales. *Revista de Gestión Ambiental*, 279, 111793.
- Mulu, E., M'Arimi, M. M., & Ramkat, R. C. (2021). A review of recent developments in application of low cost natural materials in purification and upgrade of biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111081. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111081>
- Munawar, M., Li, P., Ma, Q., Haque, A., & Ting Chen, W. (2023). Conversiones termoquímicas de residuos sólidos urbanos en combustibles y productos químicos. *Avances En Bioenergía.*, 239–305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2023.02.002>
- Nanda, S., Isen, J., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2016). Gasification of fruit wastes and agro-food residues in supercritical water. *Energy Conversion and Management*, 110, 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.060>
- Neyra-Vasquez, J. Y. (2022). Caracterización física y química: biomasa residual de la palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) en la Amazonia peruana1. *Agronomía Mesoamericana*. doi: <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48170>
- Ngwa M. Ngwabie, Fabrice L. Yengong b, & N. Chungong. (2018). Caracterización del estiércol de cerdo para la modelización de las emisiones de metano en el África subsahariana. *Ingeniería de Biosistemas*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.009>
- Nhamo Nhamo , Kyalo, G., & Dinheiro, V. (s.f.). El estiércol de ganado como fuente sostenible de bioenergía: perspectivas e impactos ambientales de su utilización como materia prima principal en Nigeria. *Informes sobre tecnología de biorrecursos*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101151>

- Nikolaos Boukis, & Katharina Stoll. (2021). Gasificación de biomasa en agua supercrítica: desafíos para el diseño del proceso: lecciones aprendidas de la experiencia operativa de la primera planta piloto dedicada. 455.
- Niño, N. (2025). Análisis de ciclo de vida comparativo entre los diferentes métodos de producción de hidrógeno: Implicaciones para la sostenibilidad energética. [Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos]. Universidad Industrial de Santander.
- Oladeji. (2017). Studies on characterization of corn cob for application in a gasification process for energy production. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/317542161>
- Ondze, F. (2015). Gasificación de residuos de remolacha con agua supercrítica: del reactor discontinuo al reactor continuo. Ciencias de la ingeniería química. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.ces.2014.11.026>
- Onursal Yakaboylu, Juan Harinck, KG Smith, & Wiebren De Jong. (2015). <https://doi.org/10.3390/en8020859>. Energias.
- Orlando Salcedo, C. M. (6 de 11 de 2024). Residuos sólidos de la cadena productiva del cacao: Evaluación de rutas de valorización termoquímica. Reseñas de energía renovable y sostenible. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124007743>
- Ovinos y caprinos. (s.f.). Universidad nacional agraria, 9. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/<https://cenida.una.edu.ni/textos/nl01s127o.pdf>

- Oxana, F. (2023). Supercritical water gasification of chicken manure continuously supplied into the reactor. *The Journal of Supercritical Fluids*, 200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2023.105998>
- Panichkittikul, N., Mariyappan, V., Wu, W., & Patcharavorachot, Y. (2024). Improvement of biohydrogen production from biomass using supercritical water gasification and CaO adsorption. *Fuel*, 361, 130724. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130724>
- Paucar Caiza, W., & Rubio Aguiar, R. (2021). Caracterización físico-química del cuesco y fibra obtenidos del procesamiento de palma africana para un aprovechamiento eficiente de la energía térmica en calderas. *Perspectivas*, 6(21). Obtenido de <https://revistas.uniminuto.edu/index.php/>
- Pavlic, B., Acimovic M, Sjneonek A, Miletic D, Cvetanovic Kljakic A, & Jerkovic J. (2023). Materias primas sostenibles para la valorización y recuperación eficientes de compuestos bioactivos. *Cultivos y Productos Industriales*, 193.
- Peñaranda Gonzalez, L., Montenegro Gómez, S., & Giraldo Abad, P. (s.f.). Aprovechamiento de residuos agroindustriales. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6285350.pdf>
- Pérez Sánchez, J. T. (2010). ¿La Producción De Hidrógeno A Partir De Biomasa Vía Gasificación Es Una Alternativa Ambientalmente Viable Para Reemplazar La Energía De Los Combustibles Fósiles? [Especialización]. Universidad Industrial de Santander.
- Pinos Rodríguez, J., & *et al.* (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4). Obtenido de

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000400004

Planeación, D. N. (2022). Guía Nacional para la adecuada separación de residuos sólidos.

Prabir Basu. (2010). Gasificación hidrotermal de biomasa. Gasificación y Pirólisis de Biomasa, 229–267.

Praveen Kumar, & Luca Fiori. (2024). Rutas termoquímicas y biológicas para la producción de biohidrógeno: una revisión. *Conversión y Gestión de Energía: X*, 23, 100659.

Pública., D. A. (2021). Función pública.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

Pushpa S, M., & M, M. N. (2012). Gestión sostenible de los subproductos de la industria del café y valor añadido: una revisión. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 45-48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>

Quintero Quintana, M., Ortiz Muñoz, D., Murcia Palacios, J., & Villaseñor, E. (marzo 2022). Aprovechamiento de residuos agroindustriales de la piña. *Boletín CAMER*. Obtenido de <https://www.politecnicojic.edu.co/images/downloads/investigacion/grupos/camer/productos/aprovechamiento-de-residuos-agroindustriales-pina.pdf>

Ramírez Conteras, N., Silva Ramírez, Á., Garzón Gonzalez, E., & Yáñez Angarita, E. (Dicimebre de 2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. *Cenipalma*. Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgicfindmkaj/https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1327/64440_62171.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1327/64440_62171.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Raúl Botero Botero MVZ, & Golfredo Mendoza. (23 de septiembre de 2022). El búfalo de agua (*Bubalus bubalis*), otra opción ganadera para América tropical. Obtenido de Engormix: https://www.engormix.com/lecheria/manejo-bufalos/bufalo-agua-bubalus-bubalis_a51224/
- Renovable Hydrogen in Latin America And The Caribbean: opportunities, challenges, and pathways. (n.d.).
- Residuos de cultivo de maíz. (s.f.). Obtenido de Pasturas de américa: <http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/>
- Ricaurte Galvis, J. (2023). Desarrollo de infusión a base de pulpa de café en el municipio del Socorro Santander.
- Roa, C. B. (2023). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. FEDEPALMA. doi: <https://doi.org/10.56866/01212923.13806>
- Rodgers, S., Bowler, A., Wells, L., Lee, C. S., Hayes, M., Poulston, S., Lester, E., Meng, F., McKechnie, J., & Conradie, A. (2024). A surrogate model for the economic evaluation of renewable hydrogen production from biomass feedstocks via supercritical water gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 277–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.016>
- Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). Tablas con valores del Poder Calorífico de combustibles y otros materiales. Ingemecánica.
- Rodríguez Valencia, N., Antonio, D., & Franco, Z. (2013). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/351>

- Rodríguez, C., & Kruse, A. (2018). Gasificación de biomasa con agua supercrítica para la producción de hidrógeno-. Revisión. *Revisa de Fluidos Supercriticos* , 573–590.
- Rosendahl, L. (2010). Recursos de biomasa, preparación y utilización de combustible para mejorar la flexibilidad del combustible en centrales eléctricas avanzadas. *Materiales, diseño y tecnología avanzados para centrales eléctricas*.
- Rural, S. d. (s.f.). Plan departamental de extensión agropecuaria 2020-2023.
- SADR. (s.f.). Plan departamental de extensión agropecuaria 2020-2023. Recuperado el 12 de 7 de 2025
- Saeb Gilani, B., & Morosuk, T. (2025). Heat Exchanger Networks: Applications for Industrial Integrations. *Energies*, 18(12), 3021. <https://doi.org/10.3390/en18123021>
- Saldarriaga, J. (201 C.E.). *Compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el proceso de compostaje de los residuos sólidos urbanos y sus efectos en la salud urbana*. Universidad de Medellín Ciencia y Libertad.
- Sanchez Alfonso, R. A. (2017). Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. INGENIUM. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6333250.pdf>
- Sánchez Alfonso, R. A. A. Y. V., Duran Peralta, H. A., Aguiar Urriago, L. M., Uribe Aldana, N., & Rojas Forero, A. Y. V. (n.d.). Model for the Gasification of the Oil Palm Kernel Shell.
- Santos, É. M. dos, Macedo, L. M. de, Tundisi, L. L., Ataíde, J. A., Camargo, G. A., Alves, R. C., Oliveira, M. B. P. P., & Mazzola, P. G. (2021). Coffee by-products in topical formulations: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.064>

- Seider, W., Seader, J. D., Lewin, D., & Widagdo, S. (2009). Product and process design principles. Synthesis, Analysis and Evaluation (John Wiley & Sons, Ed.; 3rd ed).
- Sellin, O. (2013). Use of banana culture waste to produce briquettes. Chemical Engineering Transactions. Recuperado el 30 de 10 de 2025, de <https://doi.org/10.3303/CET1332059>
- Siswantara. (2024). Investigating kinetic and thermodynamic parameters in sheep manure biomass. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Obtenido de <https://www.sdewes.org/jsdewes/pid12.0493>
- Sousa Santos, V., Barreara Hernandez, J., Cabello Eras, J., & Sagastume Gutierrez , A. (s.f). Estado del arte del proyecto: “Evaluación del potencial energético de la biomasa residual. Stadítico Forestal. Recuperado el 17 de 10 de 2025, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://fedemaderas.org/wp-content/uploads/2024/09/09_BOLETIN_FORESTAL_DICIEMBRE_2023.pdf
- Streb, A., & Mazzotti, M. (2021). Adsorption for efficient low carbon hydrogen production: part 1—adsorption equilibrium and breakthrough studies for H₂/CO₂/CH₄ on zeolite 13X. Adsorption, 27(4), 541–558. <https://doi.org/10.1007/s10450-021-00306-y>
- Stylianou. (2020). Evaluation of organic fractions of municipal solid waste as a suitable substrate for value-added bioproducts. Biotechnology for Biofuels. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01708-w>
- Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios. (2022). Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios. Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos.

- Talero Rojas, G. F. (2017). Torrefacción de tusa y fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) procedente de los Llanos Orientales de Colombia: Determinación del efecto de la temperatura de torrefacción en las características de los productos. PALMAS. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/12043/11997>
- Titus, B., Brown, K., Helmisaari, H.-S., Vanguelova, E., Stupak, I., Evans, A., . . . Reece, P. (2021). Biomasa forestal sostenible: una revisión de las directrices actuales de aprovechamiento de residuos. *Energia, sostenibilidad y sociedad*.
- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design -Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (ELSEVIER, Ed.; Second Editon).
- Turton, R., Bailie Richard C, Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2018). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes* (Pearson, Ed.; 5th Ed).
- UPME. (2009). *Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia*. SIAME.
- UPRA. (2023). *Microanálisis Evaluaciones Agropecuarias- EVAs*.
- Üresin, E. (2026). Integrated PSA Hydrogen Purification, Amine CO₂ Capture, and Underground Storage: Mass–Energy Balance and Cost Analysis. *Processes*, 14(2), 319. <https://doi.org/10.3390/pr14020319>
- V.Velmurugan. (2022). Revisión de la investigación y el desarrollo sobre el proceso de pirólisis. *Materiales*, 49(8), 3679-3686. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.542>
- Vega Rios, A., & Caballero M, P. (2002). Caracterización Química En Estado Fresco De Desechos Agroindustriales Y Efecto De La Pasteurización Para Su Utilización Como Sustratos En El Cultivo De Hongos Comestibles. *Panamá. Ciencia Agropecuaria*, 14, 1-14.

<http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/314>

- Vega, K. M. (2017). Determinación de parámetros cinéticos en la combustión de raquis de banano y tallos de rosas. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química.
- Waldo, R. J. (2018). Estudio de la combustión de Pélet de cisco de café. Obtenido de Chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/7bc35487-2759-428f-af6c-c5a74c0319fe/content
- Wang, Q., Zhang, X., Cui, D., Bai, J., Wang, Z., Xu, F., & Wang, Z. (2023). Advances in supercritical water gasification of lignocellulosic biomass for hydrogen production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, 105934. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105934>
- Wang, X. (2023). Experiment on high temperature preheating and decarbonization process of coal gasification slag and cement properties of solid phase products. *Tecnología de carbón limpio*.
- Wen, S., Wang, S. Z., Li, Y. H., & Wang, Y. Z. (2014). Technical and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Biomass Gasification in Supercritical Water and in Air-Steam Media. *Advanced Materials Research*, 953–954, 267–270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.267>
- Wu, Z., Wang, S., & Zhao, J. (2015). Product distribution during co-pyrolysis of bituminous coal and lignocellulosic biomass major components in a drop-tube furnace. *Energía y combustibles*.

Yohan Gerardo Cuellar Pérez, Jose Ricardo Bermúdez Santaella, & Daniel Andrey Herrera Susa. (2024). Hidrógeno verde: revisión del estado del arte de las tecnologías de generación para la descarbonización del sector energético. *Ingeniería y Competividad*, 26(3), 123–3033.

Zhai, Y., Wang, C., Chen, H., Li, C., Zeng, G., Pang, D., & Lu, P. (2013). Digested sewage sludge gasification in supercritical water. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 31(4), 393–400.
<https://doi.org/10.1177/0734242X12471097>

Zhaoxia Mi, Shuzhing Wang, Xinyue Huang, Chengcheng Yang, Fan Zhang, & Yanhui Li. (2025). Revisión del sistema de gasificación de agua supercrítica: Componentes, desafíos y sostenibilidad. *Conversión y Gestión de Energía*, 13(2), 115554.

Apéndices

Apéndice A. Composición elemental

A.1 Composición elemental

En este apéndice se presenta la composición elemental de diferentes tipos de biomasa y residuos lignocelulósicos reportados en la literatura. La información incluye el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y otros elementos relevantes, parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento termodinámico de las biomásas en el proceso de conversión, como la gasificación en agua supercrítica. Estos datos permiten analizar la influencia de la composición de la materia prima sobre la producción de gases y eficiencia del proceso.

Tabla A1

Composición elemental de los tipos de Biomasa.

Tipo de biomasa	Fuente de Biomasa	Tipo de Residuo	% C	%H	%O	%N	%K	%S	%Mg	%Ca
Agrícola	Palma de aceite	Cuesco	52,8	5,7	40,5	0,08	--	0,16	--	--
		Raquis	43,8	6,2	42,65	0,44	--	--	--	--
		Fibra	43,4	5	16,27	1,21	--	--	--	--
	Café	Pulpa	36,88	5,36	38,42	2,10	57,5	0,4	1,6	4,1
		Cisco	47,30	5,87	46,68	3,81		0,18		
	Caña panelera	Bagazo	48,58	5,97	38,94	0,20	--	--	--	--
		Hojas secas	42,06	6,16	43,67	0,35	--	0,43	--	--
	Plátano	Raquis	36	5,3	57	0,93	--	0,35	--	--
		Vástagos	38,92	5,92	54,29	0,38	--	0,49	--	-
	Maíz	Tusa	40	5,6	48,27	0,43	1,53	1,3	0,42	0,11
Capacho		44,4	5,6	48,27	0,43	1,53	1,3	0,42	0,11	
RSU	Residuos orgánicos	Sólido orgánico	49,24	6,51	36,09	1,99	--	0,31	--	--
Pecuario	Bovino									
	Porcino Avícola	Estiércol	42,6	4,9	51,8	0,9	--	--	--	--

Nota: (Manals et al., 2015), (JEE, 2022); Assureira & Assureira, 2022; (ECB, 2022);(Mondragón et al., 2018), (Oladeji, 2017); Jiménez et al., 2004, (Sellin, 2013), (Guarnizo, 2012)(Sánchez Alfonso et al., n.d.)(Bayona Roa et al., 2023b)(Rodríguez Valencia et al., 2013)

Apéndice B. Balances de masa

En este apéndice se presentan las tablas detalladas de los balances de masa correspondientes al proceso de gasificación en agua supercrítica (SCWG) de las diferentes biomásas evaluadas en esta investigación: pulpa de café, bagazo de caña de azúcar, raquis de plátano y residuos de palma de aceite. Los balances de masa constituyen una herramienta fundamental para la validación y comprensión del comportamiento del proceso, ya que permiten verificar la conservación de la materia y cuantificar la distribución de los componentes a lo largo de las diferentes unidades operativas del sistema.

Las tablas incluidas muestran los flujos másicos de entrada y salida de cada corriente involucrada en el proceso, considerando las etapas de alimentación, reacción, separación, purificación de productos y recirculación de corrientes. Asimismo, se presenta la composición de las corrientes principales y secundarias generadas durante la conversión termoquímica de cada biomasa, permitiendo identificar el destino de los diferentes compuestos.

La información recopilada en este apéndice sirve como soporte para los resultados presentados en el cuerpo principal del documento, proporcionando el detalle necesario para la reproducción y verificación de los cálculos realizados. Además, estos balances constituyen la base para el desarrollo de los análisis energéticos y económicos efectuados en el estudio, ya que permiten determinar los rendimientos de producción de hidrógeno y las corrientes de subproductos.

Tabla B1.

Balance de masa del proceso con pulpa de café

Stream Name	Units	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	AGUA-F	ASH	CO2- SEP2-2	GAS COOLER3	GASES SEP2-1	GASES- FLASH2	H2 SEP2-1	H2O B1
From To		MIXER2 PUMP	PUMP HEATER1	HEATER1 HEATER2	HEATER2 RYIELD	RYIELD RGIBBS	RGIBBS RSTOIC	RSTOIC VALVE1	VALVE1 COOLER1	COOLER1 VALVE2	VALVE2 COOLER2	COOLER2 FLASH1	FLASH1 COOLER3	COOLER3 COOLER4	COOLER4 VALVE4	VALVE4 FLASH2	FLASH2 COOLERS	COOLERS VALVE5	B1	ASH	CO2- SEP2-2	GAS COOLER3	GASES SEP2-1	GASES- FLASH2	H2 SEP2-1	H2O B1
Stream Class		MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD
Temperature	K	295	297	623	750	1023	1023	1023	1017	99	499	333	328	333	423	395	395	293	298	333	308	308	308	395	308	294
Pressure	atm	1	217	217	217	217	217	217	99	59	59	28	59	59	59	2	2	2	1	59	28	28	28	2	28	1
Mass Vapor Fraction		0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0
Mass Liquid Fraction		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1
Mass Solid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Mass Enthalpy	cal/gm	-3941	-3936	-3602	-3364	-1425	-2257	-2097	-2097	-2387	-2387	-2724	-1709	-3761	-3662	-3662	-3709	-3820	-3815	-185	-2140	-1719	-1846	660	-422	-3819
Mass Density	gm/cc	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	3	0	0	0	0	0	0	1
Enthalpy Flow	cal/sec	-6220466	-6212302	-5685349	-5310466	-2248652	-3562528	-3310007	-3310007	-3767514	-3767514	-4298803	-1345299	-2952369	-2874737	-2874737	-2902181	-2988836	-874240	-1135	-1143255	-1353429	-1326419	1710	-28993	-386281
WATER	kg/hr	3641	3641	3641	3641	3845	3231	2828	2828	2828	2828	2828	12	2817	2817	2817	2817	2817	825	0	0	12	12	0	0	3641
CO2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	1748	1984	1984	1984	1984	1982	2	2	2	0	0	0	0	1923	1982	1942	2	40	0
CO	kg/hr	0	0	0	0	0	176	503	503	503	503	503	0	0	0	0	0	0	0	0	0	503	478	0	25	0
N2	kg/hr	0	0	0	0	39	39	39	39	39	39	39	39	0	0	0	0	0	0	0	0	39	39	0	0	0
C	kg/hr	0	0	0	0	845	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4	kg/hr	0	0	0	0	0	390	117	117	117	117	117	0	0	0	0	0	0	0	0	117	115	0	0	2	0
ASH	kg/hr	0	0	0	0	22	22	22	22	22	22	22	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0
PULPA	kg/hr	2041	2041	2041	2041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H2	kg/hr	0	0	0	0	97	68	182	182	182	182	182	182	0	0	0	0	0	0	0	182	2	0	0	180	0
O2	kg/hr	0	0	0	0	827	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SULFU-01	kg/hr	0	0	0	0	7	7	7	7	7	7	7	0	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0
Mass Fractions																										
WATER		1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
CO2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
CO		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CH4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASH		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
PULPA		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
O2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SULFU-01		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Volume Flow	U/min	118	118	172	788	1858	1848	2106	4539	2036	3334	1293	2629	49	54	2610	52	47	14	0	567	2453	991	13	1409	61

Nota. Obtenido de Aspen Plus V15

Tabla B2

3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	AGUA-F	ASH	BAGA20	CO2	CO2
WATER1	HEATER2	RYIELD	RHBBS	RSTOC	VALVE1	COOLER1	VALVE2	COOLER2	VALVE3	1-sep	COOLER3	VALVE4	FLASH2	COOLERS			1-sep		SEP2-1	SEP2-

Nota. *Obtenido de Aspen Plus V15*

Balance de masa del proceso con el raquis de plátano

Nota. *Obtenido de Aspen Plus V15*

Tabla B4

Balance de masa del proceso con el raquis de palma de aceite

Stream Name	Units	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	AGUA-F	ASH	CO2	GAS	GASES	GASES-	H2	H2O
From		MIXER2	PUMP	HEATER1	HEATER2	RYIELD	RGIBBS	RSTOIC	VALVE1	COOLER1	VALVE2	COOLER2	FLASH1	COOLER3	COOLER4	VALVE4	FLASH2	COOLERS	COOLERS	1-sep	SEP2-2	COOLER3	SEP2-1	FLASH2	SEP2-1	
To		PUMP	HEATER1	HEATER2	RYIELD	RGIBBS	RSTOIC	VALVE1	COOLER1	VALVE2	COOLER2	FLASH1	COOLER3	COOLER4	VALVE4	FLASH2	COOLERS	VALVES	B1	1-sep	SEP2-2	COOLER3	SEP2-2	FLASH2	SEP2-1	
Stream Class		MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	MIXNCPSD	
Temperature	K	295	298	623	750	1023	1023	1023	1020	523	512	333	329	333	423	395	395	293	298	333	308	308	308	395	308	
Pressure	atm	1	217	217	217	217	217	217	99	99	59	59	28	59	59	2	2	2	1	59	28	28	28	2	28	
Mass Vapor Fraction		0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
Mass Liquid Fraction		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
Mass Solid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Mass Enthalpy	cal/gm	-4037	-4033	-3718	-3497	-1091	-2118	-1895	-1895	-2163	-2163	-2475	-1663	-3775	-3676	-3676	-3710	-3820	-3815	-185	-2125	-1674	-1810	-2091	-392	
Mass Density	gm/cc	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	3	0	0	0	0	0	
Enthalpy Flow	cal/sec	-5379664	-5373482	-4659371	-4659097	-1453136	-2622829	-2524417	-2524417	-2682254	-2682254	-3297966	-1259943	-2031190	-1977861	-1977861	-1994888	-2054431	-868841	-6833	-629492	-1268328	-1242338	-705	-27886	
Mass Flows	kg/hr	4797	4797	4797	4797	4797	4797	4797	4797	4797	4797	4797	2727	1937	1937	1937	1936	1936	820	133	1066	2727	2471	1	256	
WATER	kg/hr	2756	2756	2756	2756	2866	2406	1948	1948	1948	1948	1948	12	1936	1936	1936	1936	1936	820	0	0	12	12	0	0	
CO2	kg/hr	0	0	0	0	0	1551	1791	1791	1791	1791	1791	1790	1	1	0	0	0	0	0	1053	1790	1754	1	36	
CO	kg/hr	0	0	0	0	0	177	589	589	589	589	589	589	0	0	0	0	0	0	0	11	589	560	0	29	
N2	kg/hr	0	0	0	0	0	8	8	8	8	8	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	0	0	
C	kg/hr	0	0	0	0	0	845	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CH4	kg/hr	0	0	0	0	0	0	460	138	138	138	138	138	0	0	0	0	0	0	0	3	138	135	0	3	
ASH	kg/hr	0	0	0	0	133	133	133	133	133	133	133	0	0	0	0	0	0	133	0	0	0	0	0	0	
PULPA	kg/hr	2041	2041	2041	2041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
H2	kg/hr	0	0	0	0	0	122	57	190	190	190	190	190	0	0	0	0	0	0	0	0	190	2	0	188	
O2	kg/hr	0	0	0	0	0	823	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SULFU-O1	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mass Fractions																										
WATER		1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	
CO2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
CO		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
C		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CH4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ASH		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
PULPA		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
H2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
O2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SULFU-O1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Volume Flow	l/min	103	103	144	610	1598	1518	1816	3912	1886	3119	1305	2685	34	37	1793	36	32	14	1	320	2503	982	8	1471	

Nota. Obtenido de Aspen Plus V15

Apéndice C. Flujo de caja

Dentro de los ingresos del proyecto se consideró la comercialización del hidrógeno y del dióxido de carbono, obteniéndose ingresos de aproximadamente 12.324.515 USD/año. A partir de estos, ingresos y considerando los gastos asociados a la inversión inicial y operación del proceso, se estimó un flujo neto anual para el proyecto de 13.839.978 USD/año.

Con estos resultados se realizó el análisis de viabilidad económica, cuyos resultados se presentan en las tablas C1 y C2. Para la evaluación financiera se consideró un horizonte de análisis de 20 años, una tasa de descuento del 10 % y una inflación del 2026 en 5,56 % correspondiente al valor reportado por el (DANE, 2026).

De acuerdo con los flujos de caja obtenidos, se evidencia que el proyecto no alcanza a recuperar la inversión inicial dentro del periodo de evaluación establecido.

Tabla C1.*Flujo de caja durante los primeros 5 años*

AÑO	0	1	2	3	4
INGRESOS (USD)	-	\$ 12.324.515	\$ 13.009.758	\$ 13.733.100	\$ 14.496.66
OPEX		\$ 23.771.859	\$ 25.093.574	\$ 26.488.777	\$ 27.961.55
Flujo neto	-\$ 13.839.978	-\$ 11.447.344	-\$ 12.083.816	-\$ 12.755.676	-\$ 13.464.89
Factor de descuento	1	\$ 0,90909	\$ 0,82645	\$ 0,75131	\$ 0,68301
Flujo descontado		-\$ 10.406.676,75	-\$ 9.986.625	-\$ 9.583.528	-\$ 9.196.702
Inversión inicial	-\$ 13.839.978				
Flujo acumulado	-\$ 13.839.978	-\$ 24.246.655,32	-\$ 34.233.280	-\$ 43.816.809	-\$ 53.013.51

Tabla C2*Flujo de caja durante los últimos 5 años*

AÑO	15	16	17	18	19
INGRESOS (USD)	\$ 26.288.220	\$ 27.749.845	\$ 29.292.736	\$ 30.921.412	\$ 32.640.643
OPEX	\$ 50.705.433	\$ 53.524.655	\$ 56.500.626	\$ 59.642.060	\$ 62.958.159
Flujo neto	-\$ 24.417.212	-\$ 25.774.810	-\$ 27.207.889	-\$ 28.720.648	-\$ 30.317.516
Factor de descuento	\$ 0,23939	\$ 0,21763	\$ 0,19784	\$ 0,17986	\$ 0,16351
Flujo descontado	-\$ 5.845.286	-\$ 5.609.349	-\$ 5.382.935	-\$ 5.165.661	-\$ 4.957.156
Inversión inicial					
Flujo acumulado	-\$ 132.692.677	-\$ 138.302.026	-\$ 143.684.962	-\$ 148.850.623	-\$ 153.807.780

Además, se calculó el valor neto actual (VAN), asimismo no se logró determinar la Tasa Interna de Retorno (TIR), los resultados se relacionan en la Tabla C3.

Tabla C3*Indicadores Financieros*

Criterio	Valor
VPN	-\$ 678.914.571
TIR	-
VAN	-\$ 79.745.050
IR	0,50