

Evaluación técnica de la viabilidad de la producción de biocombustibles marítimos a partir de pellets de paja de arroz en el proceso termoquímico de pirólisis lenta en Cartagena

Leandro Bruges Alvarado

Sneyder Julián Calderón Castellanos

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Pablo Andrés Silva Ortiz

Doctor en Ciencias, Programa de Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
2. Fundamentos y Consideraciones Técnicas	19
2.1 Marco Referencial	19
2.1.1 Biomasa lignocelulósica y paja de arroz	19
2.1.2 Pirólisis.	19
2.1.3 Mejoramiento del bio-oíl.	20
2.1.4 Hidrodesoxigenación y descarboxilación	21
2.1.5 Combustibles para el sector marítimo	21
2.1.6 Balances de masa y energía	22
2.1.7 Análisis de sensibilidad	22
2.2 Marco conceptual	23
2.2.1 Bio-oíl	23
2.2.2 Biochar	23
2.2.3 Gas no condensable	23
2.2.4 Upgrading	24
2.2.5 Rendimiento	24
2.2.6 Capacidad de la planta	24
2.2.7 Viabilidad técnica	24

2.2.8 Simulación de procesos.....	25
2.3 Marco normativo.....	25
3. Metodología	27
3.1 Fase I: Determinación de los parámetros técnicos del proceso	28
3.1.1 Selección de la ubicación de la planta	29
3.1.2 Disponibilidad de materia prima.....	29
3.1.3 Caracterización de la biomasa	30
3.1.4 Identificación de los parámetros técnicos de operación del proceso.	30
3.1.5 Definición de rangos operacionales	31
3.1.6 Caso base	32
3.2 Fase II: Modelado, simulación y análisis de sensibilidad.....	33
3.2.1 Base de cálculo, límites y supuestos del modelo	33
3.2.2 Definición de componentes y corrientes.....	35
3.2.3 Caracterización de la biomasa no convencional en Aspen Plus®	37
3.2.4 Selección de los métodos termodinámicos	37
3.2.5 Modelado del proceso	39
3.2.6 Reacciones, rendimientos y conversiones.....	47
3.2.7 Balances de masa y energía	48
3.2.8 Diseño del análisis de sensibilidad	50
3.3 Fase III. Evaluación comparativa de la competitividad técnica del biocombustible frente a combustibles marítimos alternativos.....	54
3.3.1 Selección de combustibles de referencia	55
3.3.2 Recopilación de información técnica.....	55

3.3.3 Desarrollo de la evaluación comparativa	56
4. Resultados y Discusión	57
4.1 Fase I.....	57
4.1.1 Selección de la ubicación de la planta	57
4.1.2 Disponibilidad de materia prima.....	59
4.1.3 Caracterización de la biomasa	61
4.1.4 Identificación de variables técnicas claves del proceso	63
4.1.5 Análisis de las condiciones de operación reportadas en la literatura para las variables técnicas seleccionadas.....	67
4.1.6 Caso base	75
4.2 Fase II.....	76
4.2.1 Modelo implementado en aspen plus®.....	76
4.2.2 Verificación y análisis de consistencia del modelo	77
4.2.3 Balance de masa.....	78
4.2.3 Balance de energía e integración térmica	81
4.2.4 Propiedades del combustible mejorado	86
4.2.5 Análisis de sensibilidad.....	88
4.3 Fase III Comparación de la viabilidad técnica del biocombustible frente a combustibles marítimos alternativos.....	93
4.3.1 Selección de los combustibles de referencia.....	93
4.3.2 Comparación del desempeño técnico de los combustibles	95
4.3.3 Comparación de los requerimientos de infraestructura de los combustibles alternativos .	103
4.3.4 Comparación de la disponibilidad del recurso para la producción de los combustibles ...	105

4.3.5 Evaluación de la viabilidad técnica de implementación del biocombustible en el puerto de Cartagena.	107
Conclusiones y trabajos futuros	112
Referencias Bibliográficas	115
Apéndices.....	118

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Principales instrumentos normativos aplicables a la investigación.	26
Tabla 2 Clasificación y función de los componentes representativos empleados en la simulación en Aspen Plus®	35
Tabla 3 Organización del modelo implementado en Aspen Plus®.	39
Tabla 4. Variables independientes y rangos utilizados en el análisis de sensibilidad	51
Tabla 5. Variables de respuesta utilizadas en el análisis de sensibilidad.....	52
Tabla 6. Evaluación comparativa de las alternativas de ubicación de la planta.	57
Tabla 7. Producción anual de arroz en los principales departamentos de la región Caribe colombiana seleccionados para el estudio.	60
Tabla 8. Estimación de la disponibilidad potencial de paja de arroz en la región Caribe colombiana.	60
Tabla 9. Comparación de las propiedades fisicoquímicas de la paja de arroz reportadas en la literatura.	61
Tabla 10. Variables técnicas reportadas en la literatura para la producción de biocombustibles a partir de paja de arroz mediante pirólisis lenta y HDO/DCO	63
Tabla 11. Evaluación de las variables técnicas mediante los criterios de selección establecidos en la metodología.....	65
Tabla 12. Variables técnicas seleccionadas para el desarrollo de la investigación	66
Tabla 13. Temperaturas de reacción reportadas en la literatura para la pirólisis lenta de paja de arroz	68

Tabla 14. Tiempos de residencia reportados en la literatura para la pirólisis lenta de paja de arroz	68
Tabla 15. Velocidades de calentamiento reportadas en la literatura para la pirólisis lenta de paja de arroz.....	69
Tabla 16 Contenidos de humedad reportados en la literatura para la paja de arroz utilizada en procesos de pirólisis lenta.	70
Tabla 17 Tamaños de partícula reportados en la literatura para la preparación de paja de arroz destinada a procesos de pirólisis lenta.	71
Tabla 18 Temperaturas de reacción reportadas en la literatura para procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO).	72
Tabla 19 Presiones de operación reportadas en la literatura para procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO).	73
Tabla 20 Condiciones de operación seleccionadas para el caso base del proceso de producción de biocombustible marítimo.	75
Tabla 21 Verificación de la consistencia del modelo implementado.	77
Tabla 22 Distribución de productos obtenidos en la etapa de pirólisis.....	78
Tabla 23 Balance de masa de la etapa de upgrading y acondicionamiento.	79
Tabla 24 Balance global del proceso	80
Tabla 25 Balance global de energía para la condición base.	81
Tabla 26 Requerimientos y excedentes energéticos de los principales bloques.	83
Tabla 27 Recuperación interna de energía.	84
Tabla 28 Comparación de las propiedades del bio-oíl y del combustible mejorado	86
Tabla 29 Resumen de resultados en análisis de sensibilidad.....	88

Tabla 30 Comparación de los principales escenarios del análisis de sensibilidad.	92
Tabla 31 Combustibles de referencia considerados para la evaluación comparativa.	94
Tabla 32 Comparación de las principales propiedades técnicas de los combustibles evaluados.	96
Tabla 33 Comparación de los requerimientos de adaptación de la infraestructura para la implementación de combustibles alternativos en aplicaciones marítimas.....	103
Tabla 34 Comparación de los principales aspectos relacionados con la disponibilidad del recurso para la producción de combustibles alternativos.	105
Tabla 35. Elementos y bloques empleados en el modelo de simulación en Aspen Plus®	118
Tabla 36. Acciones y conversiones fraccionales implementadas en el reactor B14.....	120
Tabla 37. Resultados completos del análisis de sensibilidad.....	128

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Descripción de las diferentes fases metodologicas	28
Figura 2. Selección del modelo termodinámico en ASPEN PLUS®	38
Figura 3. Esquema general implementado en ASPEN PLUS®	41
Figura 4. Ubicación geográfica de la zona industrial de Mamonal en Cartagena.	59
Figura 5. Distribución de la eficiencia energética global del proceso para la condición base.	85
Figura 6. Efecto combinado de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia sobre el requerimiento energético externo del proceso	89
Figura 7. Rendimiento de bio-oil orgánico en función de la temperatura y el tiempo de residencia.	90
Figura 8. Variación de los rendimientos de biochar con la temperatura para tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas.	91
Figura 9. Variación de los rendimientos de gases con la temperatura para tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas.	92
Figura 10. Poder Calorífico Superior (PCS) de los combustibles analizados.	97
Figura 11. Densidad de los combustibles.	98
Figura 12. Viscosidad cinemática.	99
Figura 13. Comparación de la composición elemental de los combustibles (C, H, O).	101
Figura 14. Comparación del contenido de agua y azufre de los combustibles.	102

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Configuración del modelo de simulación en Aspen Plus®	118
Apéndice B Código de la rutina implementada en Fortran.....	122
Apéndice C Resultados completos del análisis de sensibilidad.....	128

Glosario

Análisis de sensibilidad: Procedimiento mediante el cual se evalúa cómo la modificación de una o varias variables de entrada afecta los resultados de un modelo. En este trabajo se analizaron los efectos de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia.

Biochar: Producto sólido rico en carbono obtenido durante el proceso de pirólisis de la biomasa. En el proceso estudiado, una fracción se aprovechó como fuente interna de energía y la restante se consideró un coproducto.

Biocombustible marítimo: Combustible producido total o parcialmente a partir de biomasa y destinado a suministrar energía a los sistemas de propulsión o servicios auxiliares de las embarcaciones.

Bio-oíl: Producto líquido obtenido mediante la condensación de los vapores generados durante la pirólisis de la biomasa. Está constituido por agua y una mezcla compleja de compuestos orgánicos oxigenados.

Bio-oíl orgánico: Fracción del bio-oíl constituida por los compuestos orgánicos condensables, sin incluir el agua ni los gases no condensables. En este trabajo corresponde a la fracción destinada al proceso de mejoramiento.

Biomasa lignocelulósica: Material de origen vegetal compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La paja de arroz corresponde a una biomasa lignocelulósica residual.

Bunkering: Operación de almacenamiento, manejo y suministro de combustible a una embarcación dentro de una instalación portuaria.

Componente no convencional: Sustancia que no puede representarse mediante una fórmula molecular definida en Aspen Plus[®]. Sus propiedades se calculan a partir de información de caracterización, como los análisis próximo y último.

Descarbonilación (DCO): Ruta de desoxigenación en la que el oxígeno y una parte del carbono de un compuesto orgánico se eliminan principalmente mediante la formación de monóxido de carbono.

Descarboxilación (DCO₂): Ruta de desoxigenación en la que un grupo carboxilo se elimina de un compuesto orgánico mediante la formación de dióxido de carbono.

Diésel marino (MDO): Combustible destilado derivado del petróleo empleado en motores marítimos. Su denominación en inglés es *Marine Diesel Oil*.

Fuel oil de muy bajo contenido de azufre (VLSFO): Combustible marítimo formulado para presentar un contenido de azufre igual o inferior al límite establecido por la normativa internacional. Su denominación en inglés es *Very Low Sulfur Fuel Oil*.

Fuel oil pesado (HFO): Combustible residual derivado de la refinación del petróleo, caracterizado por su elevada densidad y viscosidad. Su denominación en inglés es *Heavy Fuel Oil*.

Gas no condensable: Fracción gaseosa que permanece sin condensarse durante la separación de los productos de pirólisis. Está compuesta principalmente por monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrógeno.

Gases de efecto invernadero (GEI): Gases presentes en la atmósfera capaces de absorber y emitir radiación infrarroja, contribuyendo al calentamiento global. Entre ellos se encuentran el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso.

Hidrogenación (HID): Reacción química en la que se adiciona hidrógeno a un compuesto, generalmente para reducir enlaces insaturados y formar hidrocarburos más estables.

Hidrodesoxigenación (HDO): Proceso catalítico mediante el cual el oxígeno presente en los compuestos del bio-oíl se elimina por reacción con hidrógeno, generando principalmente agua.

Organización Marítima Internacional (OMI): Organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de establecer normas internacionales relacionadas con la seguridad, la protección ambiental y el desempeño del transporte marítimo.

Pellet: Unidad sólida compactada, generalmente de forma cilíndrica, producida mediante la densificación de biomasa. Su utilización facilita el almacenamiento, el transporte y la alimentación uniforme del material.

Peng-Robinson con modificación de Boston-Mathias (PR-BM): Método termodinámico basado en la ecuación de estado de Peng-Robinson y en la modificación de Boston-Mathias. Se utiliza para calcular el equilibrio de fases y las propiedades de mezclas que contienen hidrocarburos, hidrógeno y gases.

Resumen

Título: Evaluación técnica de la viabilidad de la producción de biocombustibles marítimos a partir de pellets de paja de arroz en el proceso termoquímico de pirólisis lenta en Cartagena*

Autor: Leandro Bruges Alvarado, Sneyder Julián Calderón Castellanos**

Palabras Clave: Biocombustible marítimo, paja de arroz, pirólisis lenta, Aspen Plus®, hidredesoxigenación/descarboxilación, análisis de sensibilidad.

La descarbonización del transporte marítimo exige la búsqueda de combustibles alternativos que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles convencionales. En este contexto, el presente trabajo evaluó la viabilidad técnica de la producción de un biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz mediante pirólisis lenta y su posterior mejoramiento por hidredesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO), considerando como escenario de estudio la zona industrial de Mamonal, en Cartagena, Colombia. La investigación se desarrolló en tres fases. En la primera se determinaron, a partir de una revisión de literatura, los parámetros técnicos clave del proceso —temperatura, tiempo de residencia, velocidad de calentamiento, humedad y tamaño de partícula— y se estableció el caso base de simulación, considerando además la disponibilidad de paja de arroz en la región Caribe. En la segunda fase se implementó un modelo de simulación en Aspen Plus® que integró el acondicionamiento de la biomasa, la pirólisis lenta, la separación de productos, el aprovechamiento energético de los subproductos y el *upgrading* del bio-*oil*, sobre el cual se ejecutó un análisis de sensibilidad de 341 escenarios variando la temperatura de pirólisis (300-600 °C) y el tiempo de residencia (1-3 h). En la tercera fase se comparó el biocombustible obtenido con combustibles marítimos de referencia (HFO, VLSFO, metanol e hidrógeno) en términos de desempeño técnico, requerimientos de infraestructura y disponibilidad del recurso. Los resultados mostraron que el proceso de HDO/DCO mejoró significativamente las propiedades del bio-*oil*, reduciendo su contenido de agua y de compuestos oxigenados, e incrementando su poder calorífico superior hasta 44,19 MJ/kg, con un error de cierre de los balances de masa y energía inferior al 1 % en todos los escenarios evaluados. Además, se obtuvo un rendimiento energético del 67,7 % para la producción de combustible mejorado. El biocombustible obtenido presentó propiedades comparables a las de los combustibles marítimos convencionales, lo que lo posiciona como una alternativa técnicamente viable para el puerto de Cartagena, aunque su implementación a escala industrial requiere estudios adicionales de escalamiento y cumplimiento normativo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Pablo Silva Ortiz. Doctor en Ciencias, Programa de Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Technical Feasibility Assessment of Marine Biofuel Production from Rice Straw Pellets through the Thermochemical Process of Slow Pyrolysis in Cartagena*

Author: Leandro Bruges Alvarado, Sneyder Julián Calderón Castellanos**

Key Words: Marine biofuel, rice straw, slow pyrolysis, Aspen Plus®, hydrodeoxygenation/decarboxylation, sensitivity analysis.

Description: The decarbonization of maritime transport requires the search for alternative fuels that reduce dependence on conventional fossil fuels. In this context, the present study evaluated the technical feasibility of producing a marine biofuel from rice straw pellets through slow pyrolysis and its subsequent upgrading by hydrodeoxygenation/decarboxylation (HDO/DCO), considering the Mamonal industrial zone in Cartagena, Colombia, as the study scenario. The research was conducted in three phases. In the first phase, the key technical parameters of the process—temperature, residence time, heating rate, moisture content, and particle size—were determined based on a literature review, and the base simulation case was established, also considering the availability of rice straw in the Caribbean region. In the second phase, a simulation model was implemented in Aspen Plus® that integrated biomass conditioning, slow pyrolysis, product separation, energy recovery from by-products, and bio-oil upgrading. A sensitivity analysis of 341 scenarios was performed on this model by varying the pyrolysis temperature (300–600 °C) and residence time (1–3 h). In the third phase, the obtained biofuel was compared with reference marine fuels (HFO, VLSFO, methanol, and hydrogen) in terms of technical performance, infrastructure requirements, and resource availability. The results showed that the HDO/DCO process significantly improved the properties of the bio-oil by reducing its water and oxygenated compound content and increasing its higher heating value to 44.19 MJ/kg, with a mass and energy balance closure error below 1% in all the evaluated scenarios. Additionally, an energy yield of 67.7% was obtained for the production of upgraded fuel. The obtained biofuel presented properties comparable to those of conventional marine fuels, positioning it as a technically feasible alternative for the Port of Cartagena, although its implementation on an industrial scale requires additional scale-up and regulatory compliance studies.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Pablo Silva Ortiz, Doctor of Science. Mechanical Engineering Program.

Introducción

El uso de combustibles fósiles en el transporte marítimo contribuye significativamente a la emisión de los gases de efecto invernadero y otros contaminantes a la atmósfera. Por este motivo se han planteado políticas internacionales orientadas a la descarbonización con respecto a este sector, por lo que en los últimos años se ha incrementado el interés por el desarrollo de combustibles alternativos que permitan reducir el impacto ambiental.

Colombia actualmente depende del Heavy Fuel *Oil* (HFO) y del Marine Diesel *Oil* (MDO), como combustibles para el transporte marítimo, razón por la cual el país participa en la generación de contaminantes ocasionando un impacto ambiental considerable.

De esta manera surgen como opciones los biocombustibles obtenidos a partir de biomasa residual, pues aprovechan materia prima que actualmente tienen poco uso y disminuyen la dependencia de combustibles convencionales. En este sentido, la paja de arroz representa una alternativa de materia prima de gran interés debido a su alta disponibilidad y a las posibilidades para ser transformada mediante procesos termoquímicos, por eso la región Caribe colombiana cobra relevancia pues se concentra gran parte de la producción de arroz a nivel nacional y se generan grandes volúmenes de este residuo que en la mayoría de los casos son desechados.

Estudios realizados hasta el momento muestran que el proceso de pirólisis de la biomasa con métodos de hidrodesoxigenación y descarboxilación, mejoran las propiedades del bio-*oil* facilitando la obtención de combustibles con características similares a las que requiere el transporte marítimo. Sin embargo, también existe evidencia que su rendimiento está ligado a factores como la calidad de la biomasa, condiciones de operación y las características propias del lugar de implementación del proceso. Por esta razón no es posible aplicar estudios internacionales

al contexto colombiano, lo que hace necesario desarrollar investigaciones que consideren la disponibilidad de la materia prima, infraestructura y demanda energética del país.

Dicho lo anterior el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar la viabilidad técnica de producir un biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz mediante un proceso de pirólisis lenta seguido de hidrogenación y descarboxilación en Cartagena, adicionalmente responde a la necesidad de generar alternativas que contribuyan a la transición energética del transporte marítimo.

Para lograr este objetivo se utilizó un enfoque cuantitativo, sustentado en la recopilación y análisis de la información científica, la simulación del proceso de producción utilizando el software Aspen Plus® y la evaluación técnica del biocombustible obtenido. Esto permitió analizar el comportamiento de la producción del biocombustible a partir de pellets de paja de arroz con posterior mejoramiento de hidrogenación/d Descarboxilación y valorar su potencial como alternativa de combustible marítimo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica de la producción de biocombustibles marítimos a partir de pellets de paja de arroz en el proceso de pirólisis lenta y subsecuente hidrodesoxigenación/descarboxilación en Cartagena, Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Determinar los parámetros técnicos claves tales como las condiciones de tamaño, humedad y densidad de los pellets, temperatura, tiempo y presión, para una planta de producción de biocombustible mejorado a partir de pellets de paja de arroz en Cartagena, Colombia.
- II. Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros técnicos para el proceso de pirolisis lenta, realizando variaciones de las variables/parámetros de entrada más críticas que influyen en la salida, que permita entender las incertidumbres y que permita comparar la eficiencia global del proceso.
- III. Comparar la competitividad de los biocombustibles mejorados obtenidos de los pellets de paja frente a otros combustibles como los marinos convencionales, recursos a base de hidrógeno y metanol, contrastando en términos de infraestructura, técnicos y disponibilidad de las materias primas.

2. Fundamentos y Consideraciones Técnicas

2.1 Marco Referencial

2.1.1 *Biomasa lignocelulósica y paja de arroz*

Biomasa lignocelulósica es el termino genérico usado para referirse a materiales de origen vegetal cuya fracción estructural está formada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, acompañadas de minerales y extractivos en menor proporción. La celulosa consiste en cadenas lineales de glucosa con alto grado de cristalinidad; la hemicelulosa es un conjunto de polisacáridos ramificados (xilanos, mananos, arabinanos, etc.) que rodean a la celulosa; y la lignina es un polímero aromático tridimensional que confiere rigidez y resistencia a la pared celular.

La paja de arroz es un residuo agrícola lignocelulósico generado en grandes cantidades tras la cosecha del cultivo de arroz. Fuentes reportan que la composición típica de esta, incluye aproximadamente 30-45% en masa de celulosa, 20-35% de hemicelulosa y 10-25% de lignina, además de una fracción inorgánica notablemente alta de cenizas y sílice (en conjunto, del orden de 15–40% en masa).

2.1.2 *Pirólisis.*

La pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica de la biomasa que ocurre en ausencia de oxígeno, produciendo simultáneamente una fracción sólida (biochar), una fracción líquida (bio-oil) y una fracción gaseosa compuesta principalmente por CO, CO₂, CH₄ e H₂. La distribución de estos productos depende de las condiciones de operación del proceso, especialmente de la temperatura, la tasa de calentamiento y el tiempo de residencia en el reactor (Basu, 2010; Mohan et al., 2006).

La temperatura es la variable operativa con mayor influencia sobre el rendimiento y las propiedades de los productos obtenidos durante la pirólisis. Asimismo, la tasa de calentamiento y el tiempo de residencia modifican la distribución entre bio-*oil*, biochar y gases, por lo que estas variables son determinantes en el desempeño del proceso (Basu, 2010; Bridgwater, 2012).

2.1.2.1 Pirólisis lenta. Se caracteriza por operar con tasas de calentamiento bajas, tiempos de residencia prolongados y temperaturas comprendidas entre 300 y 700 °C. La combinación de estas condiciones de operación influye en la distribución de los productos generados durante la conversión termoquímica de la biomasa, permitiendo controlar el rendimiento de biochar y las propiedades del bio-*oil* (Basu, 2010).

El bio-*oil* obtenido mediante pirólisis presenta propiedades fisicoquímicas que limitan su utilización directa como combustible, entre ellas un alto contenido de compuestos oxigenados, baja estabilidad química, alta acidez y un poder calorífico inferior al de los combustibles fósiles. Estas características hacen necesario un proceso de mejoramiento para adecuar sus propiedades a aplicaciones energéticas exigentes como el transporte marítimo (Bridgwater, 2012; Mohan et al., 2006).

2.1.3 Mejoramiento del bio-*oil*.

Es un conjunto de procesos termoquímicos y catalíticos orientados a reducir el contenido de oxígeno, mejorar la estabilidad del bio-*oil* e incrementar su poder calorífico, obteniendo un combustible con propiedades más cercanas a las de los combustibles convencionales. Entre las principales rutas de mejoramiento se encuentran la hidrodeshidrogenación (HDO), la descarboxilación (DCO), el craqueo catalítico, la esterificación y la emulsificación (Huber et al., 2006; Oasmaa & Czernik, 1999).

2.1.4 Hidrodesoxigenación y descarboxilación

La hidrodesoxigenación (HDO) y la descarboxilación (DCO) son las principales rutas catalíticas empleadas para reducir el contenido de oxígeno del bio-*oil* durante el proceso de mejoramiento. Ambas contribuyen a mejorar propiedades como el poder calorífico, la estabilidad química y la composición elemental del combustible, favoreciendo su aprovechamiento como biocombustible.

En la HDO se elimina el oxígeno presente en los compuestos oxigenados del bio-*oil* mediante su reacción con hidrógeno, generando agua como subproducto. Por otra parte, la DCO transforma el oxígeno en dióxido de carbono a partir de grupos oxigenados presentes en el bio-*oil*. ambas rutas pueden ocurrir de manera simultánea pero su eficiencia depende de las condiciones de operación del proceso (Bridgwater, 2012; Elliott, 2007; Huber et al., 2006).

La combinación de ambas rutas mejora las propiedades del bio-*oil* como combustible, obteniendo un producto con características más cercanas a las de los combustibles fósiles (Letoffet et al., 2024).

2.1.5 Combustibles para el sector marítimo

En el sector marítimo se utilizan diferentes tipos de combustibles, entre los cuales se encuentran combustibles fósiles convencionales como el Heavy Fuel *Oil* (HFO), el Very Low Sulfur Fuel *Oil* (VLSFO) y el Marine Diesel *Oil* (MDO); combustibles alternativos de menor impacto ambiental, entre ellos el metanol, el hidrógeno y los biocombustibles derivados de biomasa.

Las características de un combustible para aplicaciones marítimas se evalúan mediante propiedades técnicas y energéticas que influyen directamente en el desempeño de los sistemas de propulsión y en el cumplimiento de la normativa vigente. Entre las propiedades más relevantes se

encuentran el poder calorífico, la densidad, la viscosidad cinemática, el contenido de agua, el contenido de azufre y la composición elemental, parámetros que permiten comparar el comportamiento de combustibles convencionales y alternativos en aplicaciones navales. Para los combustibles derivados del petróleo, estas especificaciones se encuentran definidas principalmente por la norma ISO 8217, la cual establece los requisitos de calidad para su utilización en motores marinos. En el caso de los combustibles alternativos como el metanol, el hidrógeno y los biocombustibles, su implementación se encuentra respaldada por reglamentaciones y directrices desarrolladas por la Organización Marítima Internacional (OMI), así como por normas técnicas específicas que establecen criterios de seguridad, almacenamiento y desempeño para su empleo en aplicaciones marítimas (Mukherjee et al., 2023; Zincir & Arslanoglu, 2024).

2.1.6 Balances de masa y energía

Los balances de masa y energía son herramientas para el análisis y diseño de procesos de conversión termoquímica, ya que permiten determinar los flujos de materia y energía que ingresan, se transforman y salen en cada etapa del proceso. En la producción de biocombustibles mediante pirólisis y *upgrading*, estos balances determinan los rendimientos de los productos, el consumo de reactivos y los requerimientos energéticos del sistema, proporcionando información para evaluar el desempeño del proceso (Basu, 2010).

2.1.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite evaluar cómo las variaciones en determinados parámetros de entrada afectan el comportamiento y los resultados de un proceso. En procesos de conversión termoquímica de biomasa, este análisis facilita la identificación de las variables operativas que ejercen mayor influencia sobre el rendimiento y las propiedades de los

productos obtenidos, siendo una herramienta de apoyo para la selección de condiciones de operación y el desarrollo de simulaciones de procesos (Basu, 2010; Corton et al., 2016).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 *Bio-oil*

El *bio-oil*, también denominado aceite de pirólisis o fracción líquida, es el producto líquido obtenido por condensación de los vapores generados durante la descomposición termoquímica de la biomasa (Bridgwater, 2012; Mohan et al., 2006). En el contexto de este trabajo, el *bio-oil* representa la fracción de mayor interés como precursor del combustible marino mejorado, aunque en su estado crudo no cumple las especificaciones requeridas para uso directo en motores navales debido a su alto contenido de oxígeno, agua y compuestos ácidos.

2.2.2 *Biochar*

El biochar es la fracción sólida carbonosa que permanece en el reactor tras la pirólisis de la biomasa. Aunque no constituye el producto principal de interés en esta investigación, su generación es inevitable en el proceso de pirólisis lenta y su valorización como subproducto, ya sea como enmienda de suelos o como combustible sólido, puede contribuir a mejorar la viabilidad económica global de la planta (Basu, 2010; Cantrell et al., 2012).

2.2.3 *Gas no condensable*

Los gases no condensables son la fracción gaseosa producida durante la pirólisis, compuesta principalmente por CO, CO₂, CH₄ e H₂ en proporciones que varían según las condiciones operativas (Basu, 2010). En el diseño de la planta evaluada en este trabajo, estos gases representan una fuente de energía interna que puede aprovecharse para suplir parcialmente la demanda calorífica del reactor, contribuyendo a la eficiencia energética global del proceso.

2.2.4 Upgrading

El *upgrading* o mejora es el conjunto de tratamientos catalíticos aplicados al bio-*oil* crudo con el propósito de reducir su contenido de oxígeno, aumentar su estabilidad química y elevar su poder calorífico hasta niveles compatibles con los estándares de los combustibles marítimos (Huber et al., 2006; Elliott, 2007). En este trabajo, el *upgrading* se refiere específicamente a la combinación de hidrodesoxigenación y descarboxilación como ruta de mejora del bio-*oil* obtenido de la pirólisis lenta de pellets de paja de arroz.

2.2.5 Rendimiento

En el contexto de este trabajo, el rendimiento se define como la fracción másica de cada producto obtenido, bio-*oil*, biochar y gases no condensables, respecto a la masa inicial de biomasa procesada en base seca. Este parámetro es central para los balances de masa del proceso y para evaluar qué proporción de la biomasa de entrada se convierte efectivamente en el producto de interés.

2.2.6 Capacidad de la planta

La capacidad de la planta hace referencia al flujo másico de biomasa que el sistema puede procesar por unidad de tiempo, expresado típicamente en toneladas por día o por año. En este trabajo, la capacidad de la planta se determina a partir de la disponibilidad regional de paja de arroz en la región Caribe colombiana y condiciona el dimensionamiento de los equipos principales del proceso.

2.2.7 Viabilidad técnica

La viabilidad técnica es la evaluación de si un proceso puede ser implementado y operado bajo condiciones físicas y de ingeniería razonables, considerando la disponibilidad de materias primas, las condiciones de operación requeridas, el desempeño de los equipos y la calidad del

producto final obtenido. En este trabajo, la viabilidad técnica se evalúa sin incluir consideraciones económicas ni ambientales detalladas, centrándose en demostrar que la ruta pirólisis lenta-*upgrading* puede producir un biocombustible que cumpla las especificaciones marítimas bajo las condiciones del contexto colombiano.

2.2.8 Simulación de procesos

La simulación de procesos es una herramienta computacional que permite modelar matemáticamente el comportamiento de un sistema de conversión química o física a partir de balances de masa, energía y ecuaciones de equilibrio termodinámico (Basu, 2010). En este trabajo se utiliza el simulador Aspen Plus® como apoyo para la determinación de los parámetros técnicos clave del proceso y para el análisis de sensibilidad de las variables más críticas, complementando la información obtenida de la literatura científica.

2.3 Marco normativo

La producción y utilización de combustibles alternativos para el sector marítimo se encuentra regulada por un conjunto de instrumentos internacionales y nacionales que establecen requisitos ambientales, condiciones de uso y especificaciones técnicas para su implementación. Estos instrumentos constituyen el marco regulatorio que orienta el desarrollo y la evaluación de combustibles destinados a aplicaciones marítimas.

La Tabla 1 presenta las principales normativas consideradas en el desarrollo de esta investigación, indicando su alcance y la relación que guardan con los objetivos del estudio.

Tabla 1

Principales instrumentos normativos aplicables a la investigación.

Instrumento	Alcance principal	Relación con la investigación
Convenio MARPOL 73/78 – Anexo VI	Establece los límites de emisiones atmosféricas y el contenido máximo de azufre en los combustibles marítimos.	Justifica la búsqueda de combustibles alternativos con menor impacto ambiental.
Estrategia GEI de la OMI (2023)	Define la meta de alcanzar emisiones netas cero del transporte marítimo internacional hacia 2050.	Contextualiza el desarrollo de combustibles de bajas emisiones, entre ellos los biocombustibles.
Reglamento 18.3.2 del Anexo VI de MARPOL y MEPC.1/Circ.795	Regulan el empleo de biocombustibles y sus mezclas en motores marinos.	Sustentan la posibilidad de utilizar biocombustibles como alternativa en el sector marítimo.
ISO 8217:2024	Establece las especificaciones de calidad para combustibles marítimos.	Sirve como referencia para la comparación de las propiedades técnicas del biocombustible obtenido.
Ley 1715 de 2014	Promueve el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia.	Proporciona el contexto nacional para el aprovechamiento energético de la biomasa.
UPME (Plan Indicativo de Abastecimiento de Combustibles Líquidos)	Orienta la diversificación de la matriz energética y el abastecimiento de combustibles en Colombia.	Respalda el desarrollo de alternativas energéticas basadas en biomasa.

Nota. Adaptado de (International Organization for Standardization, 2024), Congreso de Colombia (2014) y (UPME, 2021) (International Maritime Organization, 2023).

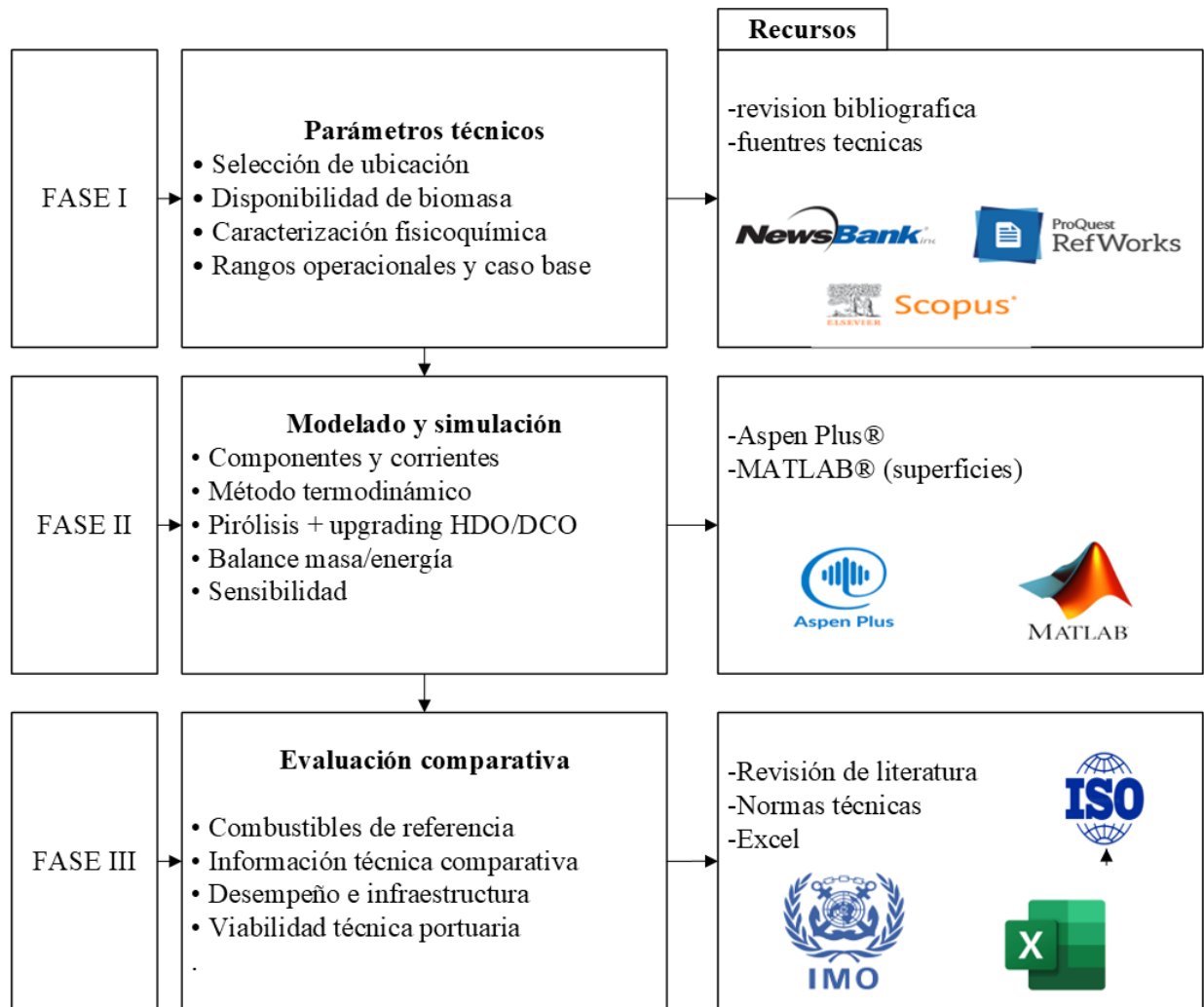
3. Metodología

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, enfocado en el análisis de la viabilidad técnica de la producción de biocombustibles marítimos a partir de pellets de paja de arroz mediante un proceso de pirólisis lenta, seguido de una etapa de mejoramiento del bio-*oil* utilizando hidrodeshidrogenación/descarboxilación (HDO/DCO). Teniendo en cuenta que este estudio no incluyó experimentación de laboratorio, la investigación se sustentó en la revisión de literatura científica, el análisis de la información técnica recopilada, y la simulación computacional del proceso por medio del software Aspen Plus®.

La metodología se organiza en tres fases ejecutadas de manera secuencial. En la **Fase I** se realizó una revisión de literatura científica con el fin de recopilar información técnica necesaria para el desarrollo de esta investigación. A partir de esta revisión fue posible conocer la disponibilidad de materia prima y las principales características de la biomasa. De la misma manera se identificaron los parámetros técnicos del proceso y se definieron las condiciones de operación que se utilizaron para definir el *caso base* utilizado en la simulación en Aspen Plus®.

La **Fase II** consistió en el desarrollo e implementación del *caso base* en Aspen Plus® para simular el proceso de producción del biocombustible. Además, a partir del modelo de simulación fue posible aplicar el análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de los parámetros establecidos en el desempeño del proceso.

Finalmente, la **Fase III** corresponde a la comparación del biocombustible analizado, en términos técnicos, de infraestructura y disponibilidad de materia prima con combustibles marítimos convencionales y otras alternativas energéticas, con el fin de evaluar la viabilidad técnica de la ruta propuesta.

Figura 1.*Descripción de las diferentes fases metodológicas*

3.1 Fase I: Determinación de los parámetros técnicos del proceso

En esta fase se determinaron los parámetros técnicos de referencia para la producción de biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz. Para ello se consideró un proceso de pirólisis lenta y una etapa posterior de mejoramiento del bio-oil mediante hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO).

3.1.1 Selección de la ubicación de la planta

La ubicación de la planta de producción de biocombustible marítimo en Colombia se estableció a partir de la evaluación de diferentes alternativas de localización. Para ello, se tuvieron en cuenta aspectos como la infraestructura industrial, la conectividad portuaria, la disponibilidad de servicios industriales, la logística de transporte y la proximidad a las zonas de abastecimiento de biomasa.

Esta información se obtuvo mediante revisión de la literatura científica, documentos técnicos y fuentes oficiales relacionadas con el desarrollo industrial y la infraestructura logística y portuaria del país. Estos datos permitieron identificar las principales alternativas de localización y caracterizar las condiciones técnicas y logísticas asociadas a cada una.

Las alternativas identificadas se compararon por medio de una matriz de evaluación construida a partir de criterios técnicos y logísticos previamente definidos. Entre los criterios que se consideraron se incluyeron la cercanía a las zonas de abastecimiento de materia prima, la infraestructura industrial disponible, la conectividad portuaria, el acceso a servicios industriales y la viabilidad logística para el transporte de insumos y productos. Cada criterio se calificó en una escala de 1 a 5, donde 1 representa el menor nivel de cumplimiento y 5 el mayor. Con estos resultados fue posible seleccionar la ubicación de referencia utilizada en el caso de estudio presentado en esta investigación.

3.1.2 Disponibilidad de materia prima

La disponibilidad de materia prima se estimó utilizando como punto de partida la producción anual de arroz registrada en los principales departamentos de la región Caribe colombiana. Posteriormente, se calculó la cantidad disponible de paja de arroz utilizando un factor de generación de 1,2 suministrado por la literatura. Este factor indica cuanta paja se produce por

cada unidad de arroz cosechado. Posteriormente, se aplicó un factor de disponibilidad para determinar la fracción de biomasa aprovechable en la producción de biocombustibles, teniendo en cuenta que parte de este residuo permanece en el campo o es destinado a otros usos.

3.1.3 Caracterización de la biomasa

Las propiedades de la biomasa utilizada en el modelo de simulación se definieron por medio de la caracterización de la paja de arroz a partir de la información recopilada en la revisión bibliográfica. Para ello, se seleccionaron estudios que reportaran propiedades fisicoquímicas determinadas mediante análisis experimentales y que fueran representativas de este residuo lignocelulósico.

Esta caracterización incluyó el análisis próximo, el análisis último, el contenido de humedad, el poder calorífico y demás propiedades necesarias para definir las corrientes de alimentación en Aspen Plus®. Cuando los valores reportados por diferentes autores presentaron diferencias, estos se analizaron de forma comparativa para seleccionar un conjunto de propiedades que constituyen los datos de entrada en el modelo de simulación.

3.1.4 Identificación de los parámetros técnicos de operación del proceso.

Los principales parámetros técnicos que influyen en el desempeño del proceso de producción de biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz por medio de pirólisis lenta y posterior mejoramiento del bio-oil mediante hidrodeshidroxigenación/descarboxilación (HDO/DCO) se seleccionaron mediante la revisión de literatura científica. Estos parámetros permitieron establecer las variables de operación que se consideraron para el caso base del proceso y para el análisis de sensibilidad. Para su selección se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

Influencia significativa sobre el rendimiento y la distribución de productos de la pirólisis.

- Incidencia sobre las propiedades fisicoquímicas del bio-*oil* y del biocombustible obtenido después del proceso de HDO/DCO.
- Frecuencia de evaluación en estudios experimentales y de simulación reportados en la literatura científica.
- Disponibilidad de información suficiente para establecer rangos operacionales representativos.

Los criterios establecidos permitieron seleccionar como parámetros de la etapa de pirólisis lenta la temperatura de reacción, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula y el contenido de humedad de la biomasa. Para la etapa de hidrodesoxigenación/descarboxilación se seleccionaron variables como la temperatura, la presión de operación y la relación hidrógeno/bio-*oil*, debido a su influencia sobre las reacciones de desoxigenación y el mejoramiento de las propiedades del biocombustible.

De igual manera estos parámetros sirven como base para recopilar los rangos operacionales reportados en la literatura, los cuales fueron utilizados posteriormente para definir el caso base y seleccionar las variables que serán estudiadas en el análisis de sensibilidad

3.1.5 Definición de rangos operacionales

Una vez seleccionados los parámetros técnicos del proceso, se definieron los rangos de operación de las variables consideradas en el estudio a partir de la información recopilada durante la revisión bibliográfica. Luego se analizaron estos valores reportados en investigaciones experimentales y de simulación relacionadas con la producción de bio-*oil* a partir de paja de arroz mediante pirólisis lenta y su posterior mejoramiento mediante hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO).

Los rangos de operación se definieron mediante un análisis comparativo de la información documentada por diferentes autores, teniendo en cuenta factores como la biomasa utilizada, las condiciones de operación, los objetivos de cada estudio y la consistencia de los resultados obtenidos. Se dio prioridad a investigaciones desarrolladas con paja de arroz y, cuando fue necesario, se complementó la información con estudios realizados sobre otras biomásas lignocelulósicas con características similares.

Cuando los valores reportados en la literatura presentaron diferencias, se evaluó la relevancia de cada estudio para establecer intervalos de operación técnicamente sustentados y acordes con el alcance de la investigación.

3.1.6 Caso base

Definidos los rangos de operación de los parámetros técnicos, se definió el modelo de simulación en Aspen Plus[®] que se denominó *caso base*. Para ello, se determinaron los parámetros que serían constantes durante el desarrollo de la investigación y los que serían estudiados en el análisis de sensibilidad.

Los parámetros que no se consideraron en el análisis de sensibilidad permanecieron con valores constantes, asignados de acuerdo con la información recopilada de la literatura científica. Por su parte, para los parámetros que se estudiaron en el análisis de sensibilidad se definieron rangos operacionales, los cuales se utilizaron posteriormente para evaluar diferentes condiciones de operación durante la Fase II de la investigación.

El *caso base* se definió a partir de las propiedades de la materia prima, las condiciones de operación fijas y los rangos operacionales establecidos para las variables evaluadas en el análisis de sensibilidad, permitiendo construir un modelo de simulación consistente y acorde con el alcance de la investigación.

3.2 Fase II: Modelado, simulación y análisis de sensibilidad

Esta fase tuvo como propósito simular el proceso de producción de biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz mediante pirólisis lenta y posterior hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO). Para ello, se desarrolló un modelo del proceso en Aspen Plus[®] V14, definiendo los componentes, los métodos termodinámicos y las unidades de operación requeridas para representar las etapas de pirólisis, separación y *upgrading*. Con base en el caso de estudio definido en la fase anterior, se ejecutó la simulación y se realizó un análisis de sensibilidad sobre las variables seleccionadas, obteniendo los balances de materia y energía, así como las propiedades fisicoquímicas del biocombustible producido.

3.2.1 Base de cálculo, límites y supuestos del modelo

La simulación se desarrolló en Aspen Plus[®] utilizando una base de cálculo de 1000 kg/h de pellets de paja de arroz. Este valor se adoptó como referencia para normalizar los balances y comparar los diferentes escenarios, por lo que no representa la capacidad industrial definitiva de la planta. La humedad de la biomasa se incorporó directamente en la corriente de alimentación y los rendimientos de los productos de pirólisis se expresaron respecto al flujo másico total de biomasa alimentada.

El modelo se delimitó desde el ingreso de los pellets previamente acondicionados hasta la obtención del combustible mejorado. Se incluyeron la pirólisis lenta, la separación de *biochar*, *bio-oil* y gases no condensables, el aprovechamiento de corrientes energéticas residuales, el *upgrading* mediante HDO/DCO y la separación final de agua y gases. La producción de los pellets y del hidrógeno, el transporte de materias primas, el almacenamiento del producto y su utilización en motores marítimos permanecieron fuera de los límites de la simulación.

Para simplificar la representación del proceso se adoptaron los siguientes supuestos:

- La planta opera de forma continua y en estado estacionario.
- La alimentación de biomasa presenta composición, humedad y flujo constantes.
- Los pellets ingresan previamente secados, por lo que no se incluyó una unidad de secado dentro del proceso.
- Las variaciones de energía cinética y potencial de las corrientes se consideraron despreciables.
- Las pérdidas de calor hacia el ambiente y las caídas de presión se despreciaron, excepto cuando fueron especificadas directamente en los bloques.
- La biomasa se representó como un componente no convencional y su descomposición se modeló mediante rendimientos obtenidos de la literatura.
- El reactor RYield no representó la cinética ni la transferencia de calor dentro de los pellets; por tanto, el tamaño y la densidad se mantuvieron como condiciones fijas del caso base.
- Las reacciones de HDO/DCO se representaron mediante conversiones estequiométricas fijas, sin considerar la desactivación del catalizador ni las limitaciones de transferencia de masa.
- Las unidades Flash2 y Decanter se consideraron en equilibrio termodinámico.
- El calor recuperado de los gases no condensables y del biochar se contabilizó una sola vez dentro del balance energético.
- El aire se consideró con composición constante y el hidrógeno como una corriente de pureza definida.
- Durante el análisis de sensibilidad únicamente variaron la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia; las demás condiciones de operación, la composición de la biomasa,

el flujo de alimentación, la presión y las conversiones del *upgrading* permanecieron constantes

3.2.2 Definición de componentes y corrientes

La definición de los componentes se realizó considerando la composición de la biomasa, los productos de la pirólisis, las especies involucradas en el *upgrading* y las sustancias requeridas para el aprovechamiento energético. Debido a la complejidad química del bio-*oil*, no fue posible representar la totalidad de los compuestos que pueden formarse. En su lugar, se seleccionó un conjunto de sustancias representativas de las principales familias químicas reportadas para la pirólisis de paja de arroz.

La paja de arroz se ingresó como un componente no convencional denominado *BIOMASS*, debido a que no posee una fórmula molecular única. El biochar y las cenizas también se representaron como componentes sólidos, de acuerdo con la clasificación utilizada en el modelo. Su caracterización fisicoquímica se efectuó posteriormente mediante los análisis próximo, último y de azufre.

Los componentes convencionales se organizaron en cuatro grupos principales mostrados en la tabla 2.

Tabla 2

Clasificación y función de los componentes representativos empleados en la simulación en Aspen Plus®.

Grupo	Componentes representativos	Función en el modelo
Gases y reactivos	H ₂ , O ₂ , N ₂ , CO, CO ₂ y CH ₄	Representar el aire, el hidrógeno, los gases de pirólisis y los productos de combustión
Compuestos oxigenados	Agua, metanol, etanol, acetona, ácido acético, ácido fórmico,	Representar las principales familias presentes en el bio- <i>oil</i>

	furfural, fenol, cresoles y levoglucosano	
Compuestos aromáticos	Benceno, tolueno y otros aromáticos seleccionados	Representar la fracción aromática del bio- <i>oil</i> y del combustible mejorado
Productos del <i>upgrading</i>	Alcanos, alquenos, aromáticos, agua, CO y CO ₂	Representar los productos generados mediante HDO, DCO

La selección de estos compuestos se basó en su presencia reportada en el bio-*oil* de paja de arroz, su disponibilidad en la base de datos de Aspen Plus® y su utilidad para representar las reacciones de *upgrading*. Para cada componente reactivo se verificó la fórmula molecular y la disponibilidad de las propiedades termodinámicas necesarias.

Las corrientes materiales se clasificaron de acuerdo con la naturaleza de los componentes que se transportaron por ellas. La corriente de alimentación de la biomasa utilizó la subcorriente no convencional NC, mientras que los gases, líquidos y compuestos convencionales se transportaron usando la subcorriente *MIXED*. Para representar sólidos convencionales, tales como carbono o cenizas, se empleó la subcorriente sólida correspondiente. Esta separación permite que el software reconociera adecuadamente las propiedades y el comportamiento de los materiales que formaron parte del proceso

Las principales corrientes de entrada correspondieron a los pellets de paja de arroz, identificada como *BIOMASS* el aire requerido para la combustión y el hidrógeno empleado en el *upgrading*. Como corrientes de salida se consideraron el combustible mejorado, el biochar disponible, los gases no condensables, la fase acuosa y los gases de combustión. También se incorporaron corrientes de calor y trabajo para representar el intercambio térmico, el enfriamiento y el consumo energético de los compresores.

Para cada corriente se especificaron el flujo másico, la temperatura, la presión, la composición y la subcorriente correspondiente. La lista completa de componentes, sus identificadores en Aspen Plus®, fórmulas moleculares y clasificación se presentan en la Tabla A1 del apéndice A.

3.2.3 Caracterización de la biomasa no convencional en Aspen Plus®

En Aspen Plus®, la paja de arroz fue clasificada como un componente no convencional (*BIOMASS*) porque no tiene una fórmula molecular específica, por lo tanto, no puede ser representada como un elemento convencional en el simulador. Para definirlo se utilizaron las herramientas de caracterización para componentes no convencionales que ofrece Aspen Plus®. Se emplearon como datos de entrada el análisis próximo, el análisis último y el contenido de azufre seleccionados en la fase I del estudio.

Seguidamente los modelos HCOALGEN y DCOALIGT se utilizaron para calcular las propiedades de densidad y entalpía del componente no convencional, respectivamente. Esta configuración permitió que el modelo de simulación reflejara la conducta de la biomasa y proporcionara los datos requeridos para las fases siguientes, como son la descomposición por pirólisis y la producción de biocombustible.

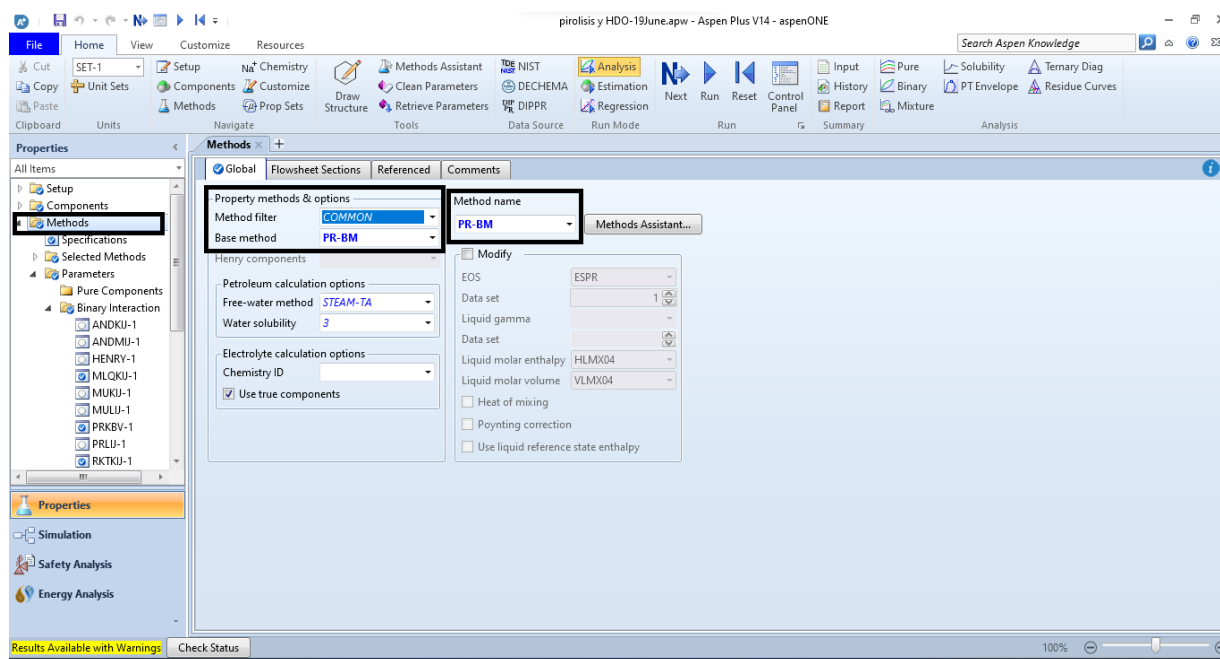
3.2.4 Selección de los métodos termodinámicos

La selección del método termodinámico se realizó considerando la naturaleza de los componentes presentes en el proceso, las condiciones de operación y las fases involucradas en la simulación. El modelo desarrollado incluye gases permanentes, hidrógeno, hidrocarburos, compuestos oxigenados, agua y corrientes generadas durante la pirólisis y el *upgrading*, por lo que fue necesario emplear un método capaz de representar adecuadamente el equilibrio de fases y las propiedades termodinámicas de estos sistemas.

Como método termodinámico base se seleccionó la ecuación de estado Peng-Robinson con la modificación de Boston-Mathias (PR-BM), (Figura 1) debido a su amplia aplicación en sistemas que contienen hidrocarburos, hidrógeno y gases como CO, CO₂, CH₄, O₂ y N₂ bajo condiciones de temperatura y presión similares a las empleadas en este estudio. Este método se utilizó para el cálculo del equilibrio de fases y de las propiedades termodinámicas de los componentes convencionales en las etapas de pirólisis, separación de gases, combustión y *upgrading*. No obstante, debido a la presencia de compuestos oxigenados en el *bio-oil*, los resultados obtenidos en los bloques *Flash2* y *Decanter* se interpretaron considerando las limitaciones de las ecuaciones de estado cúbicas para representar el equilibrio líquido-líquido de mezclas altamente polares.

Figura 2.

Selección del modelo termodinámico en ASPEN PLUS®



3.2.5 Modelado del proceso

La simulación se desarrolló en estado estacionario empleando los bloques Heater, RYield, SSplit, FSplit, Flash2, Mixer, RGibbs, Compressor, HeatX, RStoic y Decanter para representar las operaciones de conversión, separación y acondicionamiento del proceso.

El diagrama de flujo (Figura 3) se organizó en tres secciones principales. La primera comprende el acondicionamiento térmico de la biomasa, la pirólisis lenta y la separación primaria del biochar, el bio-oil y los gases no condensables. La segunda comprende el aprovechamiento energético de los gases y de una fracción del biochar con el propósito de recuperar parte del calor requerido por el proceso. La tercera comprende la mezcla del bio-oil con hidrógeno, el *upgrading* mediante HDO/DCO y la separación final del combustible, el agua y los gases remanentes.

La Tabla 3 resume la organización general del modelo implementado en Aspen Plus®, indicando las principales secciones del proceso, los bloques empleados y la función que desempeñan dentro de la simulación.

Tabla 3

Organización del modelo implementado en Aspen Plus®.

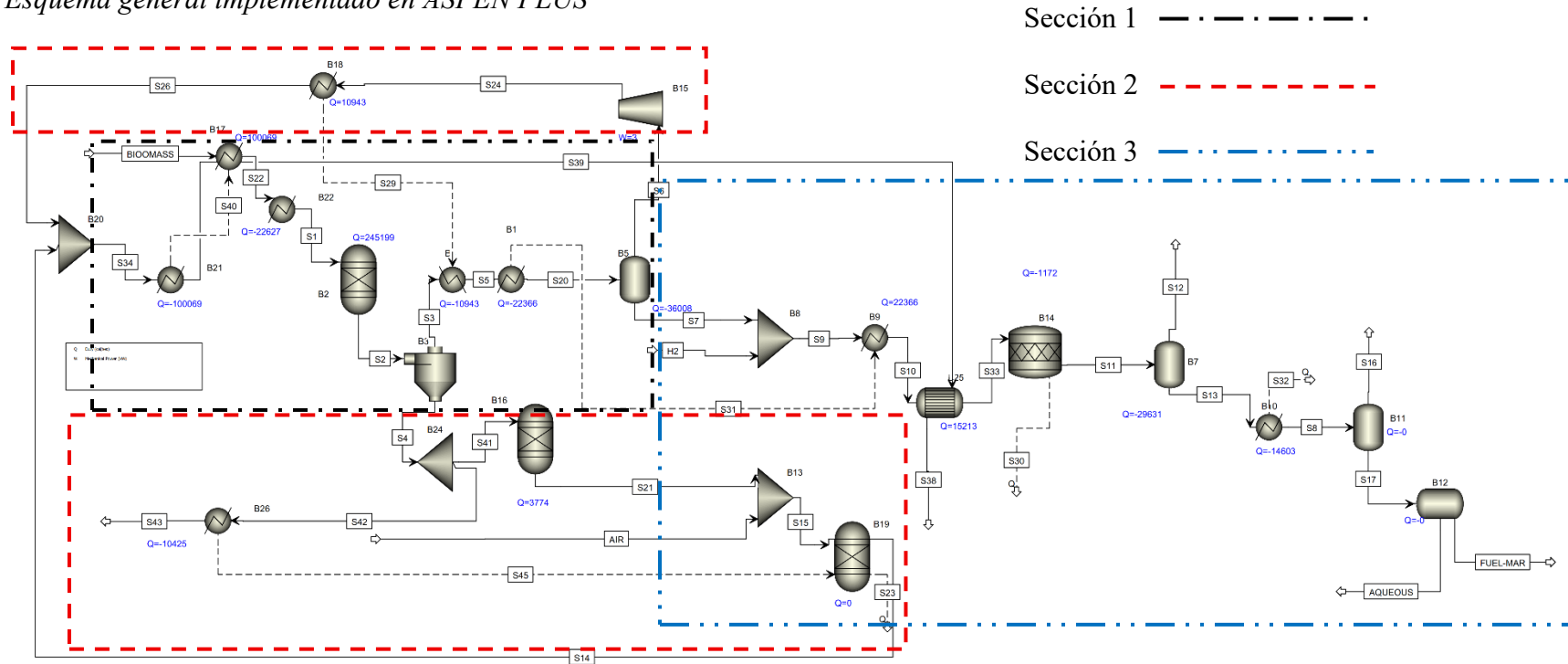
Sección del proceso	Bloques principales	Resultado obtenido
Alimentación y acondicionamiento	B17 y B22	Biomasa acondicionada a las condiciones de pirólisis
Cálculo de rendimientos	CALPYR	Rendimientos calculados según temperatura y tiempo
Pirólisis lenta	B2 (RYield)	Biochar, bio-oil, agua y gases
Separación primaria	B3, B5 y B24	Separación y distribución de las fracciones sólida, líquida y gaseosa
Aprovechamiento energético	B16, B19, B13, B20, B15, B25, B26 y B18	Combustión de gases y biochar y recuperación de calor
Mezcla y acondicionamiento para <i>upgrading</i>	B8 y B9	Mezcla de bio-oil e hidrógeno a las condiciones de reacción
<i>Upgrading</i>	B14 (RStoic)	Hidrocarburos, agua, CO, CO ₂ y gases remanentes

Separación final	B7, B11 y B12	Combustible mejorado, fase acuosa y corriente gaseosa
-------------------------	---------------	---

Las corrientes se conectaron siguiendo la secuencia física del proceso y se configuraron de acuerdo con su flujo, composición, temperatura, presión y tipo de subcorriente. Cada bloque se configuró según las condiciones de operación definidas para el caso base, mientras que los rendimientos y conversiones se establecieron a partir de la información seleccionada durante la revisión bibliográfica.

Figura 3

Esquema general implementado en ASPEN PLUS®



Nota. Los elementos empleados para la elaboración del esquema general, así como su clasificación y la función específica que desempeñan dentro de la propuesta, se presentan en la Tabla 35 del Apéndice A.

3.2.5.1 Alimentación y acondicionamiento de la biomasa. La alimentación correspondió a una corriente de 1000kg/h de pellets de paja de arroz, definida en ASPEN como un componente no convencional. La corriente se especificó con una humedad de 9.8% y con los valores de *proxanal*, *ultanal* y *sulfanal* presentados previamente en la tabla 2. Las condiciones físicas de los pellets se mantuvieron constantes, de acuerdo con las condiciones establecidas en el caso base.

Se asumió que los pellets ingresaron a la planta con la humedad definida para el caso base, por lo que el modelo no incluyó una etapa de secado. En consecuencia, el acondicionamiento previo a la pirólisis consistió únicamente en el calentamiento de la biomasa hasta las condiciones de entrada al reactor.

El acondicionamiento térmico se representó mediante los bloques B17 y B22, configurados como equipos Heater. En ambos bloques se incrementó progresivamente la temperatura de la alimentación, manteniendo constante la presión del proceso. El calentamiento se dividió en dos etapas para diferenciar el precalentamiento suministrado mediante el aprovechamiento energético de los gases no condensables y de una fracción del biochar, del aporte de energía externa requerido antes del ingreso al reactor de pirólisis.

3.2.5.2 Pirólisis lenta. La pirólisis se representó con el bloque B2, configurado como un reactor del tipo RYield. Se seleccionó este modelo ya que permite transformar un componente no convencional en un conjunto de compuestos convencionales y sólidos mediante rendimientos especificados con anterioridad.

Los productos especificados en el reactor se agruparon en tres fracciones principales. La fracción sólida formada por Biochar y cenizas; la fracción gaseosa no condensable que contiene principalmente CO, CO₂, CH₄ e H₂ y la fracción condensable que contiene agua y compuestos

característicos del bio-oil, como ácidos, orgánicos, alcoholes, cetonas, furfural, fenoles, aromáticos y levoglucosano.

El reactor se configuró con la temperatura y presión del caso base. El software Aspen Plus® calcula el requerimiento térmico para mantener estas condiciones a partir de la entalpía de la biomasa y de los productos. Este valor se incorporó posteriormente en el balance de energía y en el análisis de aprovechamiento del calor procedente de los gases no condensables y el biochar.

Debido a que el bloque RYield no contiene un modelo cinético, los rendimientos no son calculados directamente por Aspen Plus® a partir de la temperatura o del tiempo de residencia. En el caso base se utilizaron los rendimientos seleccionados de la literatura, mientras que para el análisis de sensibilidad estos valores se actualizaron mediante la rutina de cálculo vinculada al modelo para cada combinación de temperatura y tiempo evaluada.

3.2.5.3 Separación de biochar, bio-oil y gases. La corriente que se obtiene a la salida del bloque B2 estuvo conformada por Biochar, cenizas, agua, compuestos orgánicos condensables y gases no condensables. Para recuperar estas fracciones se implementó una separación secuencial basada inicialmente en el tipo de subcorriente y posteriormente en el equilibrio de fases.

En primer lugar, la corriente proveniente del reactor ingreso al bloque B3, configurado como un separador del tipo *SSplit*. Esta etapa permite retirar la subcorriente solida formada principalmente por el biochar y las cenizas, logrando separarla de la subcorriente *MIXED*, entre las cuales había gases, agua y los compuestos orgánicos. Las fracciones de separación se establecieron de manera que la totalidad de los sólidos fuera enviada a la corriente de biochar, evitando su ingreso a los equipos de condensación.

La corriente solida se dirigió a el bloque B24 el cual es del tipo *FSplit*, donde se dividió entre una fracción destinada al aprovechamiento energético y otra parte considerada como biochar

disponible. Posterior a retirar los sólidos, la corriente de vapores se enfrió en los bloques B1 y B4 para favorecer la condensación del agua y de los compuestos orgánicos. Luego la corriente de salida ingreso al bloque B5, configurado como *Flash2*, en el cual se realizó la separación entre las fases liquidas y gaseosa a partir de la temperatura y presión seleccionadas.

3.2.5.4 Aprovechamiento energético de los gases y el biochar. El proceso de pirólisis genera gases no condensables y biochar con contenido energético aprovechable. En el modelo, una fracción de estas corrientes se destinó como combustible interno con el fin de reducir el requerimiento de energía externa para el acondicionamiento de la biomasa y el suministro de calor al proceso de pirólisis.

Los gases no condensables provenientes de la pirólisis atravesaron inicialmente los bloques B1 y B4, donde se recuperó parte de su energía sensible antes de la separación realizada en el bloque B5. La corriente gaseosa obtenida, compuesta principalmente por CO, CH₄, H₂ y CO₂, se condujo al bloque B15, configurado como un Compresor, para incrementar su presión antes de mezclarse con las demás corrientes destinadas a combustión.

Por su parte, el biochar separado en el bloque B3 ingreso al bloque B24, configurado como un *FSplit*, donde se dividió entre una fracción destinada al aprovechamiento energético y otra considerada como coproducto del proceso. Debido a que el biochar se definió como un componente no convencional, la corriente destinada a combustión se transformó previamente en componentes convencionales mediante el bloque B16, configurado como un reactor *RYield*.

Posteriormente, los componentes procedentes del biochar se mezclaron con los gases no condensables y con la corriente de aire en los bloques B13 y B20. La mezcla resultante se ingreso en el reactor *RGibbs* Como posibles productos se incluyeron CO₂, CO, H₂O, O₂ y N₂, permitiendo que Aspen Plus® realizara los balances elementales y determinara la composición de equilibrio.

Los gases calientes obtenidos a la salida del reactor se dirigieron a los equipos B25, B26 y B18, donde se recuperó parte de su energía térmica para cubrir parcialmente los requerimientos de calentamiento de otras corrientes del proceso. La energía recuperada se calculó a partir de la diferencia de entalpía entre la entrada y la salida de los equipos, de acuerdo con la ecuación (1):

$$\dot{Q}_{\text{recuperado}} = \dot{m}_{\text{gases}}(h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}}) \quad (1)$$

La contribución de esta recuperación al abastecimiento térmico del proceso se evaluó mediante:

$$\text{Cobertura térmica} = \frac{\dot{Q}_{\text{recuperado}}}{\dot{Q}_{\text{requerido}}} \times 100 \quad (2)$$

Donde $\dot{Q}_{\text{requerido}}$ corresponde a la suma de las demandas térmicas de los equipos que reciben calor. Cuando la energía recuperada fue inferior a la requerida, la diferencia se consideró como demanda de una fuente externa.

La recuperación térmica se cuantificó a partir de las cargas térmicas de los intercambiadores y equipos de calentamiento asociadas a la transferencia efectiva de calor entre corrientes del proceso. Para evitar la doble contabilización de energía, el calor recuperado se registró únicamente en el equipo donde fue aprovechado, sin adicionar nuevamente la energía liberada durante la combustión de los gases no condensables y del biochar.

3.2.5.5 Upgrading mediante HDO y DCO La corriente orgánica obtenida después de la separación primaria se sometió a una etapa de *upgrading* con el propósito de reducir el contenido de oxígeno del bio-*oil* y obtener un combustible con mejores propiedades para su aplicación como combustible marítimo.

Inicialmente el bio-oil se mezcló con una corriente de hidrogeno, en el mixer llamado B8. El flujo de hidrogeno se determinó de acuerdo con los requerimientos estequiométricos de las reacciones y el exceso definido para caso base. Posteriormente, la mezcla ingreso al Heater, donde se aumentó la temperatura hasta alcanzar la condición establecido para el reactor.

La etapa de *upgrading* se representó en el reactor RStoic B14. Se selecciono este modelo porque las reacciones y conversiones fueron especificadas previamente a partir de la información recopilada en la literatura, sin disponer de expresiones cinéticas suficientes para implementar un reactor catalítico más detallado. Para cada reacción se definieron el compuesto reactivo, los coeficientes estequiométricos, la conversión fraccional y los productos generados correspondientes.

En el reactor se incorporaron las reacciones representativas de hidrodesoxigenación (HDO), hidrogenación y descarboxilación (DCO). Para cada una se especificaron el compuesto reactivo, los coeficientes estequiométricos, la conversión fraccional y los productos de reacción correspondientes. Las conversiones empleadas fueron las definidas para el caso base a partir de la literatura especializada.

3.2.5.6 Separación y acondicionamiento del combustible mejorado. La corriente proveniente del reactor B14 estuvo compuesta por hidrocarburos mejorados, agua generada durante las reacciones de HDO, CO, CO₂, hidrógeno no reaccionado y compuestos que no alcanzaron la conversión establecida. Para recuperar la fracción orgánica de interés se implementó una secuencia de separación basada en operaciones de equilibrio de fases.

Inicialmente, el efluente ingresó al bloque B7, configurado como un separador del tipo *Flash2*, donde se realizó una primera separación entre la corriente líquida y los gases no condensables. Posteriormente, la corriente líquida se condujo al bloque B11, también configurado

como un Flash2, en el cual se efectuó una segunda separación bajo diferentes condiciones de temperatura para favorecer la recuperación de la fracción condensable.

La corriente obtenida se dirigió al bloque B12, configurado como un *Decanter*, donde se representó la separación entre la fase acuosa y la fase orgánica mediante equilibrio líquido-líquido. La fase acuosa estuvo constituida principalmente por el agua generada durante el proceso de *upgrading* y una fracción de los compuestos polares solubles, mientras que la fase orgánica concentró los hidrocarburos y los demás compuestos correspondientes al combustible mejorado.

3.2.5.7 Determinación de las propiedades del combustible mejorado. Las propiedades del combustible mejorado se determinaron a partir de la corriente orgánica recuperada en el decantador B12, considerada como el producto final del proceso. A partir de esta corriente se obtuvieron las propiedades reportadas por Aspen Plus®, incluyendo la composición elemental, el contenido de agua, la densidad y el poder calorífico. La viscosidad cinemática se calculó posteriormente a partir de las propiedades físicas de la corriente mediante las correlaciones implementadas en el software y se reportó a 40 °C, mientras que la densidad se expresó a 15 °C, con el fin de facilitar la comparación con combustibles marítimos comerciales. Estas propiedades se utilizaron posteriormente para evaluar el desempeño técnico del combustible mejorado y realizar su comparación con combustibles alternativos

3.2.6 Reacciones, rendimientos y conversiones

Los parámetros empleados para representar las transformaciones de la biomasa y del *bio-oil* se definieron a partir de la información recopilada durante la revisión bibliográfica. De acuerdo con el enfoque de modelado seleccionado para cada etapa, se implementaron rendimientos máxicos en la pirólisis, equilibrio químico en la combustión y reacciones estequiométricas con conversiones fraccionales en el proceso de *upgrading*.

Los rendimientos máxicos utilizados en el reactor B2 (RYield) para representar la distribución de biochar, bio-oíl y gases no condensables se obtuvieron a partir de los resultados experimentales reportados por (Sakhiya et al., 2021), específicamente de la información presentada en las Tablas 4 y 5 del estudio. Estos valores fueron empleados como caso base para definir la distribución inicial de productos en la simulación y constituyeron el punto de partida para el posterior análisis de sensibilidad.

Las reacciones implementadas en el reactor B14 (RStoic), junto con sus coeficientes estequiométricos y conversiones fraccionales, se presentan en la Tabla A.2 del Apéndice A. Estas reacciones representan las rutas de hidrodesoxigenación (HDO), hidrogenación y descarboxilación (DCO) consideradas durante la etapa de *upgrading* del bio-oíl.

Finalmente, se verificó la consistencia de las reacciones implementadas mediante los balances de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, así como la correcta definición de las fórmulas moleculares de los componentes utilizados en la simulación.

3.2.7 Balances de masa y energía

Los balances de masa y energía se desarrollaron con el propósito de verificar la consistencia del modelo de simulación implementado en Aspen Plus® y evaluar el comportamiento del proceso de producción de biocombustible a partir de pellets de paja de arroz. Para ello, se aplicaron los principios de conservación de la masa y de la energía a las principales etapas del proceso y al sistema global, utilizando la información de las corrientes y equipos obtenida durante la simulación.

3.2.7.1 Balance de masa. El balance de masa se formuló bajo condiciones de estado estacionario, aplicando el principio de conservación de la materia a cada una de las etapas del proceso y al sistema global, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\sum \dot{m}_{entrada} = \sum \dot{m}_{salida} \quad (3)$$

Para el balance global se consideraron únicamente las corrientes que cruzaron la frontera del proceso, correspondientes a las alimentaciones y productos finales. Las corrientes internas de transferencia, separación, recirculación y recuperación energética no se incluyeron con el fin de evitar la doble contabilización de materia.

Adicionalmente, se verificó la conservación de los principales elementos químicos involucrados en las reacciones del proceso (carbono, hidrógeno y oxígeno), con el propósito de comprobar la coherencia estequiométrica del modelo implementado.

El grado de consistencia del balance se evaluó mediante el cálculo del error relativo entre el flujo másico total de entrada y el flujo másico total de salida, empleando la siguiente expresión:

$$Error\ relativo\ \% = \frac{|\sum \dot{m}_{entrada} - \sum \dot{m}_{salida}|}{\sum \dot{m}_{entrada}} * 100 \quad (4)$$

3.2.7.2 Balance de energía. El balance de energía se formuló despreciando las variaciones de energía cinética y potencial:

$$\sum \dot{m}h_{entrada} + \dot{Q}_{externo} + \dot{W}_{entrada} = \sum \dot{m}h_{salida} + \dot{W}_{salida} \quad (5)$$

Donde $\dot{m}h$ representa el flujo de entalpía de las corrientes, $\dot{Q}$ el calor transferido y $\dot{W}$ el trabajo asociado al compresor. Los valores de entalpía, carga térmica y potencia fueron obtenidos de los resultados calculados por Aspen Plus®.

El requerimiento térmico del sistema se calculó mediante la suma de las cargas de los calentadores y los reactores que demandan energía durante el proceso. A este valor se le restó el calor recuperado mediante los intercambiadores y la combustión de gases y biochar:

$$\dot{Q}_{\text{externo,neto}} = \dot{Q}_{\text{requerido}} - \dot{Q}_{\text{recuperado}} \quad (6)$$

Para evaluar el aprovechamiento térmico se calculó la fracción de la demanda térmica cubierta por las corrientes internas:

$$\text{Cobertura térmica} = \frac{\dot{Q}_{\text{recuperado}}}{\dot{Q}_{\text{requerido}}} \times 100 \quad (7)$$

De igual forme, se determinó la eficiencia energética global, teniendo en cuenta la energía química contenida en el combustible mejorado y en el biochar que se obtiene como coproducto:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{energética}} &= \frac{\dot{m}_{\text{combustible}} PCS_{\text{combustible}}}{\dot{m}_{\text{biomasa,seca}} PCS_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{H}_2,\text{consumido}} PCS_{\text{H}_2} + 3,6(\dot{Q}_{\text{externo}} + \dot{W}_{\text{externo}})} \\ &\times 100 \end{aligned} \quad (8)$$

Para todos los cálculos se empleó el poder calorífico superior (PCS). La fracción de biochar utilizada como combustible interno y los gases no condensables destinados al aprovechamiento energético no se contabilizaron como productos energéticos, debido a que su contenido energético fue reutilizado dentro del propio proceso.

3.2.7.3 Criterios de aceptación del modelo. La validación del modelo se estableció mediante criterios relacionados con la consistencia numérica y física de la simulación. Para aceptar cada escenario se requirió un error relativo de cierre de los balances globales de masa y energía inferior al 1 %, convergencia de todos los bloques del modelo, ausencia de flujos o composiciones negativas y conservación de los balances atómicos en las reacciones implementadas.

3.2.8 Diseño del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó para evaluar el efecto de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia sobre la distribución de productos y el desempeño técnico del proceso de

producción de biocombustible. Para ello, se definieron las variables independientes y sus rangos de evaluación, las variables de respuesta empleadas para comparar los escenarios y el procedimiento de cálculo implementado para ejecutar las simulaciones y analizar los resultados

3.2.8.1 Variables independientes y rangos de variación. Como variables independientes fueron seleccionadas la temperatura de pirólisis y el tiempo residencia (Tabla 4), debido a su efecto sobre la descomposición de la biomasa y los rendimientos de bio-oil, biochar y gases no condensables.

La temperatura se evaluó entre 300 y 600 °C, utilizando incrementos de 10 °C. Este intervalo permitió analizar desde condiciones de descomposición térmica inicial hasta temperaturas en las que adquieren mayor importancia las reacciones secundarias de craqueo y la formación de gases. El caso base se estableció en 500 °C.

El tiempo de residencia se evaluó entre 1 y 3 horas, utilizando incrementos de 12 minutos, equivalentes a 0,2 horas, lo cual produjo 11 niveles. El valor de 1 horas estableció como condición base.

Tabla 4.

Variables independientes y rangos utilizados en el análisis de sensibilidad

Variable independiente	Símbolo	Intervalo	Incremento	Caso base	Unidad
Temperatura de pirólisis	T_p	300-600	10	500	°C
Tiempo de residencia	t_r	1-3	0,2	1	h

El número total de simulaciones se determinó mediante la ecuación (9):

$$N = n_T n_t \quad (9)$$

La combinación de los 31 niveles de temperatura con los 11 niveles de tiempo produjo un total de 341 escenarios de simulación. Para cada uno de estos escenarios, el bloque CALPYR actualizó los rendimientos correspondientes a la combinación de tiempo y temperaturas evaluadas.

3.2.8.2 Variables de respuesta. Con el fin de evaluar el efecto de las variables independientes sobre el proceso, para cada escenario se registraron variables asociadas a la pirólisis, al combustible mejorado, al proceso de *upgrading* y al desempeño energético del sistema. Las variables consideradas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.

Variables de respuesta utilizadas en el análisis de sensibilidad

Categoría	Variable de respuesta	Símbolo o expresión	Unidad
Pirólisis	Rendimiento de bio-oil orgánico	$Y_{\text{bio-oil}}$	% base seca
Pirólisis	Rendimiento de biochar total	Y_{biochar}	% base seca
Pirólisis	Rendimiento de gases no condensables	Y_{gases}	% base seca
Producto final	Rendimiento de combustible mejorado	$Y_{\text{combustible}}$	% base seca
Producto final	Poder calorífico superior	$PCS_{\text{combustible}}$	MJ/kg
Energía	Requerimiento térmico neto	$\dot{Q}_{\text{neto}}$	kW
Energía	Eficiencia energética global	η_{global}	%

El rendimiento del combustible mejorado se calculó mediante la ecuación (10):

$$Y_{\text{combustible}} = \frac{\dot{m}_{\text{fase orgánica de B12}}}{\dot{m}_{\text{biomasa seca}}} \times 100 \quad (10)$$

Durante el análisis de sensibilidad, las variaciones se aplicaron únicamente a la etapa de pirólisis mediante la actualización de los rendimientos en el reactor B2 a través del bloque CALPYR y la rutina desarrollada en Fortran. Las demás condiciones del modelo, incluyendo el

flujo de alimentación, la composición de la biomasa, la presión de operación, el esquema de recuperación energética y las conversiones definidas para el reactor de *upgrading* B14, permanecieron constantes en todos los escenarios. En consecuencia, las diferencias entre los escenarios se atribuyeron exclusivamente a las variaciones de la temperatura y del tiempo de residencia de la pirólisis.

3.2.8.3 Procedimiento de cálculo y comparación. El análisis de sensibilidad se ejecutó mediante una secuencia automatizada que integró el bloque de cálculo CALPYR, la rutina desarrollada en Fortran y el reactor RYield de Aspen Plus®. Este procedimiento permitió actualizar los rendimientos de la pirólisis para cada combinación de temperatura y tiempo de residencia y ejecutar posteriormente el modelo completo de simulación.

Inicialmente, se definió el caso base y se generaron los 341 escenarios de simulación a partir de las combinaciones de las variables independientes. Para cada escenario, el bloque CALPYR transfirió los valores de temperatura y tiempo de residencia a la rutina desarrollada en Fortran, la cual calculó los rendimientos correspondientes de biochar, bio-*oil* y gases no condensables. Posteriormente, dichos rendimientos fueron asignados automáticamente al reactor RYield antes de la ejecución de la simulación. Previamente se verificó que las fracciones calculadas fueran positivas y que su suma correspondiera a la unidad.

Una vez actualizados los rendimientos, Aspen Plus® ejecutó el modelo completo, incluyendo las etapas de pirólisis, separación de productos, aprovechamiento energético, *upgrading* y acondicionamiento final del combustible. Para cada escenario se comprobó la convergencia de la simulación, el cierre de los balances de masa y energía y la ausencia de resultados físicamente inconsistentes.

Finalmente, los resultados obtenidos se organizaron en matrices y se exportaron a MATLAB® para la elaboración de superficies tridimensionales. La comparación entre escenarios se realizó considerando simultáneamente el rendimiento de bio-*oil*, la producción de combustible mejorado, la eficiencia energética y el requerimiento neto de energía, con el propósito de identificar las regiones de operación más favorables. Este procedimiento correspondió a un análisis de sensibilidad y no a una optimización matemática, por lo que permitió identificar tendencias y condiciones de operación favorables sin establecer un óptimo global.

3.3 Fase III. Evaluación comparativa de la competitividad técnica del biocombustible frente a combustibles marítimos alternativos.

Una vez obtenidas en la Fase II las propiedades y el desempeño técnico del biocombustible mejorado producido a partir de pellets de paja de arroz mediante simulación en Aspen Plus®®, se desarrolló una evaluación comparativa con otras alternativas energéticas utilizadas o propuestas para el transporte marítimo. Esta fase tuvo como propósito determinar la competitividad técnica del biocombustible obtenido frente a combustibles marinos convencionales y alternativas de bajas emisiones, considerando su desempeño técnico, los requerimientos de infraestructura y la viabilidad de su implementación en el contexto del puerto de Cartagena.

Para alcanzar este objetivo, la metodología comprendió tres etapas principales: la selección de los combustibles de referencia, la recopilación de la información técnica necesaria para la comparación y el desarrollo de la evaluación comparativa a partir de los criterios definidos para la investigación. Las actividades desarrolladas en esta fase se describen en los apartados siguientes.

3.3.1 Selección de combustibles de referencia

Inicialmente se realizó una revisión de literatura científica, informes técnicos y documentos publicados por organismos internacionales relacionados con el transporte marítimo y la transición hacia combustibles de bajas emisiones. La información recopilada fue analizada considerando aspectos como el nivel de implementación actual de cada combustible en el sector marítimo, su grado de madurez tecnológica, su participación en las estrategias internacionales de descarbonización y la disponibilidad de información técnica necesaria para realizar una comparación objetiva.

Con base en estos criterios, se seleccionaron como combustibles de referencia el fueloil pesado (HFO), el fueloil de muy bajo contenido de azufre (VLSFO), el metanol y el hidrógeno, debido a que representan las principales alternativas actualmente utilizadas o consideradas para la transición energética del transporte marítimo.

3.3.2 Recopilación de información técnica

Una vez definidos los combustibles de referencia, se recopiló la información técnica necesaria para desarrollar la evaluación comparativa. Para ello, se integraron las propiedades del biocombustible obtenidas mediante la simulación desarrollada en la Fase II con la información reportada en literatura científica, normas técnicas e informes elaborados por organismos nacionales e internacionales relacionados con combustibles marinos, infraestructura portuaria y estrategias de descarbonización del transporte marítimo.

La información recopilada fue organizada de acuerdo con las propiedades técnicas, los requerimientos de infraestructura y las condiciones de implementación reportadas para cada combustible, garantizando el empleo de fuentes técnicas confiables y la comparabilidad entre las diferentes alternativas energéticas evaluadas.

3.3.3 *Desarrollo de la evaluación comparativa*

La evaluación comparativa se desarrolló mediante tres criterios principales. En primer lugar, se comparó el desempeño técnico de los combustibles a partir de sus propiedades energéticas, físicas y de composición química, utilizando las propiedades obtenidas para el biocombustible mediante simulación y la información reportada para los combustibles de referencia. Posteriormente, estas propiedades fueron analizadas considerando su influencia sobre el desempeño energético, el almacenamiento, el transporte, el suministro y la utilización del combustible en aplicaciones marítimas.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos en los análisis anteriores, se evaluó la viabilidad técnica de implementación del biocombustible en el contexto del puerto de Cartagena, considerando las condiciones de infraestructura existentes y las principales implicaciones técnicas para su incorporación como combustible alternativo en el transporte marítimo.

4. Resultados y Discusión

4.1 Fase I

En esta etapa se presentan los resultados relacionados con la disponibilidad de materia prima, la caracterización de la biomasa, la identificación de los principales parámetros técnicos de operación, la definición de sus rangos operacionales y la selección del caso base que sirvió como referencia para el desarrollo de la simulación en Aspen Plus®.

4.1.1 Selección de la ubicación de la planta

Con el propósito de definir la ubicación de referencia para el desarrollo del escenario de estudio, se evaluaron tres zonas con vocación industrial ubicadas en la ciudad de Cartagena: Mamonal, El Bosque y Pasacaballos. Siguiendo la matriz multicriterio descrita en la sección 4.2.2, la Tabla 6 presenta los resultados obtenidos para cada una de las alternativas evaluadas.

Se presenta en forma exacta el aporte del desarrollo del trabajo en concordancia a la justificación presentada. Se describe en forma lógica, los resultados del trabajo, dando respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Basado en los resultados recolectados, incluido el tratamiento estadístico o cualitativo. Se muestra en forma concisa los productos y/o resultados y se resaltan las contribuciones del trabajo al contexto local, regional, nacional e internacional, cuando aplique.

Tabla 6.

Evaluación comparativa de las alternativas de ubicación de la planta.

Criterio	(%)	Mamonal	El Bosque	Pasacaballos
Disponibilidad de servicios industriales (energía, agua, gas)	20	5	4	3
Conectividad logística terrestre	15	5	4	3
Cercanía a infraestructura portuaria	20	5	4	4
Acceso a materia prima (biomasa)	15	4	4	5

Compatibilidad con uso industrial	10	5	4	3
Disponibilidad de terreno	10	3	3	5
Condiciones para expansión futura	10	3	3	5
Puntaje ponderado	100	4,6	3,9	3,9

Nota. La valoración de cada criterio se realizó mediante una escala de 1 a 5, donde 1 corresponde a un nivel muy bajo de cumplimiento y 5 a un nivel muy alto. El puntaje ponderado se obtuvo considerando la importancia relativa asignada a cada criterio.

Los resultados muestran que Mamonal obtuvo el mayor puntaje ponderado (4,6), superando a El Bosque y Pasacaballos, que alcanzaron una calificación de 3,9. La diferencia se debe a que tiene mayor disponibilidad de servicios industriales, mejor conectividad logística, cercanía a la infraestructura portuaria y alta compatibilidad con actividades industriales, criterios que poseen la mayor ponderación dentro de la matriz de evaluación.

Aunque Pasacaballos obtuvo una mejor puntuación en los criterios relacionados con el acceso a la biomasa, la disponibilidad de terreno y las posibilidades de expansión, estas ventajas no compensan las limitaciones asociadas a la infraestructura industrial y logística requerida para una planta de producción de biocombustible marítimo. Por su parte, El Bosque presentó un comportamiento intermedio en la mayoría de los criterios evaluados, sin destacar significativamente sobre las demás alternativas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz, se seleccionó la zona industrial de Mamonal como ubicación de referencia para el desarrollo de la presente investigación. Esta alternativa reúne las condiciones más favorables para la implementación del proceso, debido a su infraestructura industrial consolidada, disponibilidad de servicios, cercanía al puerto de Cartagena y facilidad para la recepción de biomasa proveniente de los departamentos productores de la región Caribe, así como para la posterior distribución del biocombustible obtenido.

La Figura 4 muestra la localización de Mamonal, ubicada al sur de la ciudad de Cartagena. Esta zona concentra gran parte de la infraestructura industrial de la ciudad y tiene conexión directa

al puerto y a las principales vías terrestres, características que respaldan su selección como ubicación de referencia para el desarrollo del proceso.

Figura 4

Ubicación geográfica de la zona industrial de Mamonal en Cartagena



Nota. La figura muestra la ubicación geográfica de la zona industrial de Mamonal en Cartagena.

Google Maps (2026)

4.1.2 Disponibilidad de materia prima

Siguiendo la metodología planteada, en la Tabla 7 se presenta la producción anual de arroz registrada en los principales departamentos de la región Caribe colombiana, estos fueron seleccionados considerando su cercanía a la ciudad de Cartagena y su potencial como proveedores de paja de arroz para el abastecimiento de biomasa.

Tabla 7.

Producción anual de arroz en los principales departamentos de la región Caribe colombiana seleccionados para el estudio.

Departamento	Producción de arroz (ton/año)
Bolívar	120,000
Córdoba	450,000
Sucre	300,000
Cesar	280,000
Total	1,150,000

Nota. Adaptado de (DANE, 2024; Departamento Administrativo Nacional de Estadística & Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), 2024).

Los departamentos analizados registran una producción conjunta de 1.150.000 toneladas de arroz/año. Córdoba concentra la mayor producción, seguido por Sucre, Cesar y Bolívar. A partir de estos datos se estimó la cantidad de paja de arroz generada como residuo de cosecha, utilizando un factor de generación de 1,2 toneladas de paja por cada tonelada de arroz producida y un factor de disponibilidad de 0,5, para estimar que tanta biomasa puede ser aprovechable. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Estimación de la disponibilidad potencial de paja de arroz en la región Caribe colombiana.

Concepto	Valor
Producción total de arroz	1,150,000 ton/año
Factor de generación	1.2
Paja generada (teórica)	1,380,000 ton/año
Factor de disponibilidad efectiva	0.5
Paja disponible (real)	690,000 ton/año

Nota. Adaptado de (DANE, 2024; Departamento Administrativo Nacional de Estadística & Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), 2024).

La disponibilidad de paja de arroz se estimó en aproximadamente 690.000 toneladas de paja de arroz por año, cantidad suficiente de biomasa para el escenario planteado en la presente investigación. Además, la cercanía de los departamentos productores a la ciudad de Cartagena representa una ventaja logística para el transporte y el abastecimiento de la materia prima.

4.1.3 Caracterización de la biomasa

La Tabla 9 presenta una comparación de las propiedades fisicoquímicas de la paja de arroz reportadas por Biswas et al. (2017), Park et al. (2014) y Sakhiya et al. (2020). Estos estudios fueron seleccionados por presentar resultados experimentales representativos de esta biomasa. Esta información permitió analizar la variabilidad de las propiedades y establecer los valores de referencia que se utilizaron en el desarrollo de la investigación

Tabla 9.

Comparación de las propiedades fisicoquímicas de la paja de arroz reportadas en la literatura.

Parámetro	Biswas et al. (2017)	Park et al. (2014)	Sakhiya et al. (2020)
Análisis próximo			
Humedad (%)	11,69	7,3	—
Materia volátil (%)	78,07	60,84	76,32
Carbono fijo (%)	6,93	16,61	13,91
Cenizas (%)	15	22,55	9,08
Análisis último			
C (%)	36,07	48,75	37,18
H (%)	5,2	5,98	5,81
O (%)	—	43,28	56,39
N (%)	0,64	1,99	0,62
S (%)	0,26	—	—
Propiedades físicas			
Tamaño de partícula (mm)	0,5–2,0	0,425-1,25	< 2
PCS (MJ/kg)	14,87	13,45	15,76

Nota. Adaptado de(Park et al., 2014; Sakhiya et al., 2020 Biswas et al. 2017).

Al comparar los estudios se obtiene que las propiedades fisicoquímicas de la paja de arroz reportadas en la literatura muestran diferencias entre los estudios consultados. Estas variaciones pueden estar relacionadas con la variedad del arroz, las condiciones de cultivo, las características

del suelo, el clima, las prácticas de cosecha, el tratamiento previo de la biomasa y los procedimientos experimentales empleados para su caracterización.

Los resultados del análisis próximo muestra que la materia volátil corresponde a la fracción predominante de la biomasa, con valores comprendidos entre 60,84 % y 78,07 %, mientras que las cenizas varían entre 9,08 % y 22,55 %, lo que refleja el contenido de material inorgánico característico de la paja de arroz. Por su parte, el contenido de carbono fijo presenta valores entre 6,93 % y 16,61 %, lo que sugiere diferencias en la composición sólida remanente después de la liberación de los compuestos volátiles. Respecto a la humedad, solo dos de los estudios reportan esta propiedad, registrando valores de 7,3 % y 11,69 %, correspondientes a biomasa previamente acondicionada para su caracterización.

En cuanto al análisis último se observa que el carbono es el componente principal de la biomasa, con valores entre 36,07 % y 48,75 %, seguido por el oxígeno, cuyos valores registrados alcanzan hasta 56,39 %. El hidrógeno presenta valores comprendidos entre 5,20 % y 5,98 %, mientras que el nitrógeno y el azufre se encuentran en bajas concentraciones, lo que resulta favorable para los procesos de conversión termoquímica debido a la baja probabilidad de formación de compuestos contaminantes.

Respecto con las propiedades físicas, el poder calorífico superior (PCS) reportado en los estudios analizados se encuentra entre 13,45 y 15,76 MJ/kg, estos valores son consistentes con los reportados para otras biomásas lignocelulósicas empleadas para fines energéticos. Aunque algunos autores reportan el tamaño de partícula utilizado en los ensayos experimentales, este depende de la preparación de la muestra y no de las características propias de la biomasa. Por tal motivo, su análisis se aborda posteriormente dentro de la evaluación de las variables operativas del proceso.

Aunque los estudios consultados presentan diferencias en los valores, la comparación realizada permitió seleccionar aquellas propiedades utilizadas como datos de entrada para simular el *caso base* en Aspen Plus®.

4.1.4 Identificación de variables técnicas claves del proceso

A partir de la revisión bibliográfica se seleccionaron las variables técnicas que se evaluaban con mayor frecuencia en las investigaciones relacionadas con la producción de biocombustibles a partir de paja de arroz mediante pirólisis lenta y posterior mejoramiento con hidrodeshidrogenación/descarboxilación (HDO/DCO). Estas variables corresponden a las condiciones de operación y a las características de la biomasa que influyen en el desarrollo del proceso. La Tabla 10 resume las variables reportadas con mayor frecuencia en la literatura para ambas etapas del proceso.

Tabla 10.

Variables técnicas reportadas en la literatura para la producción de biocombustibles a partir de paja de arroz mediante pirólisis lenta y HDO/DCO

Etapas del proceso	Variables reportadas en la literatura
Preparación de la biomasa	Contenido de humedad, tamaño de partícula
Pirólisis lenta	Temperatura de reacción, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, flujo de gas inerte
HDO/DCO	Temperatura de reacción, presión de hidrógeno, tipo de catalizador, relación H ₂ /bio-oil, tiempo de residencia

Nota. Adaptado de Park et al. (2014), Biswas et al. (2017), Sakhiya et al. (2020), Routray et al. (2016), Lv et al. (2018), Oh et al. (2019), Xiao et al. (2010), Phuong et al. (2008) y Tuppurainen et al. (2026).

La mayoría de las variables que se identificaron corresponden a la etapa de pirólisis, lo que puede asociarse a la cantidad de transformaciones termoquímicas que ocurren durante la descomposición de la biomasa. En contraste, la etapa de preparación de la biomasa comprende menos variables; sin embargo, el contenido de humedad y el tamaño de partícula son considerados debido a su influencia sobre la transferencia de calor y el comportamiento de la biomasa durante la conversión térmica.

Para la etapa de mejoramiento con HDO/DCO se consideran variables relacionadas con las condiciones de reacción y el sistema catalítico, como la temperatura de reacción, la presión de hidrógeno, la relación H_2 /bio-*oil*, el tipo de catalizador y el tiempo de residencia. Estas variables son seleccionadas debido a su influencia sobre el grado de desoxigenación del bio-*oil* y las propiedades del combustible obtenido.

Una vez identificadas las variables técnicas se analizaron a partir de los criterios de selección definidos en la metodología. Esta evaluación permitió determinar cuáles variables se considerarían para el desarrollo del estudio, teniendo en cuenta su relevancia técnica, la disponibilidad de información bibliográfica y su coherencia con el alcance de la investigación. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11.

Evaluación de las variables técnicas mediante los criterios de selección establecidos en la metodología

Variable técnica	Influencia en el proceso	Frecuencia en la literatura	Información suficiente
Humedad	✓	✓	✓
Tamaño de partícula	✓	✓	✓
Temperatura (pirólisis)	✓	✓	✓
Tiempo de residencia (pirólisis)	✓	✓	✓
Velocidad de calentamiento	✓	✓	✓
Flujo de gas inerte	✓	△	×
Temperatura (HDO/DCO)	✓	✓	✓
Presión de hidrógeno	✓	✓	✓
Relación H ₂ /bio-oil	✓	✓	✓
Tipo de catalizador	✓	✓	×
Tiempo de residencia (HDO/DCO)	✓	△	×

Nota. ✓: criterio cumplido; la variable presenta información suficiente en la literatura. △: criterio parcialmente cumplido; la información disponible es limitada. ×: criterio no cumplido; la información es insuficiente para su análisis.

Como resultado de la evaluación se seleccionaron la temperatura de reacción, el tiempo de residencia y la velocidad de calentamiento durante la pirólisis, así como la temperatura, la presión de hidrógeno y la relación H₂/bio-oil para la etapa de HDO/DCO, por ser las variables que mejor cumplieron los criterios establecidos en la metodología. Asimismo, el contenido de humedad y el tamaño de partícula se consideraron por la influencia que ejercen sobre la conversión termoquímica de la biomasa.

En contraste, variables como el flujo de gas inerte, el tipo de catalizador y el tiempo de residencia en la etapa de HDO/DCO no fueron incluidas dentro del análisis posterior, debido a que su estudio requiere condiciones experimentales específicas que no hacen parte del alcance de la presente investigación.

La aplicación de estos criterios de selección permitió definir las variables técnicas utilizadas en esta investigación. Para esto se priorizaron aquellas que tenían mayor influencia en el proceso, información bibliográfica disponible y coherencia con el alcance del estudio. La Tabla 12 representa las variables seleccionadas.

Tabla 12.

Variables técnicas seleccionadas para el desarrollo de la investigación

Etapas del proceso	Variable técnica	Influencia principal
Preparación de la biomasa	-Humedad	Condiciona el comportamiento de la biomasa durante la pirólisis y el consumo energético asociado al secado.
	-Tamaño de partícula	Influye en la transferencia de calor y en la uniformidad de la conversión térmica de la biomasa.
Pirólisis lenta	-Temperatura de reacción	Determina la distribución de productos y el rendimiento de bio-oil.
	-Tiempo de residencia	Influye en el grado de conversión de la biomasa y en la composición de los productos obtenidos.
	-Velocidad de calentamiento	Afecta la velocidad de descomposición térmica y la distribución de los productos de reacción.
HDO/DCO	-Temperatura de reacción	Controla el grado de desoxigenación del bio-oil.
	-Presión de operación	Favorece las reacciones de hidrogenación y desoxigenación.
	-Relación hidrógeno/bio-oil	Influye en la calidad del biocombustible obtenido y en el consumo de hidrógeno.

Las variables seleccionadas se distribuyen en tres etapas principales del proceso evaluado. En la preparación de la biomasa se consideraron el contenido de humedad y el tamaño de partícula ya que influyen sobre las condiciones de alimentación al reactor de pirólisis. Para la etapa de pirólisis lenta se seleccionaron la temperatura de reacción, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, al ser las variables que los estudios consultados señalan como determinantes en la distribución de productos y el rendimiento de bio-oil.

Para la etapa de HDO/DCO se seleccionaron la temperatura de reacción, la presión de hidrógeno y la relación H_2 /bio-oil, debido a su influencia sobre las reacciones de desoxigenación y las propiedades finales del biocombustible.

Una vez seleccionadas las variables técnicas, se analizaron los rangos operacionales reportados en la literatura para cada una de ellas.

4.1.5 Análisis de las condiciones de operación reportadas en la literatura para las variables técnicas seleccionadas

Una vez identificadas las variables técnicas, se analizaron las condiciones de operación reportadas en la literatura para cada una de ellas. Para la temperatura de reacción y el tiempo de residencia en la etapa de pirólisis lenta se establecieron intervalos de evaluación, ya que fueron seleccionadas para aplicar el análisis de sensibilidad desarrollado en la Fase II. Las demás variables técnicas obtuvieron valores de operación a partir de los reportes que aparecieron con mayor frecuencia en la literatura.

4.1.5.1 Temperatura de pirólisis La temperatura de reacción fue la variable que se encontró con mayor frecuencia en los estudios revisados sobre pirólisis lenta. De acuerdo con esto se pudo determinar que se utilizaron temperaturas que oscilan los 300 y 700 °C, sin embargo, la

mayoría trabajó con valores comprendidos entre 300 y 600°C como se muestra en la Tabla 13. Estas diferencias pueden asociarse a que cada estudio evaluó diferentes condiciones de acuerdo con el objetivo planteado de cada estudio.

Tabla 13.

Temperaturas de reacción reportadas en la literatura para la pirólisis lenta de paja de arroz

Autor	Intervalo evaluado (°C)	Objetivo del estudio
Park et al. (2014)	300–700	Evaluar el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de bio-oil
Biswas et al. (2017)	350–600	Analizar la distribución de productos de la pirólisis
Sakhiya et al. (2020)	300–600	Determinar las condiciones de operación para la producción de bio-oil

Nota. Adaptado de Park et al. (2014), Phuong et al. (2008) y Sakhiya et al. (2020).

Con base en los estudios revisados, se estableció un intervalo de 300 a 600 °C como rango de evaluación para el análisis de sensibilidad desarrollado en la Fase II. Este intervalo comprende las temperaturas reportadas con mayor frecuencia en la literatura, para poder analizar el efecto de la temperatura sobre el proceso.

4.1.5.2 Tiempo de residencia La Tabla 14 presenta los intervalos de tiempo de residencia reportados en los estudios analizados para la producción de bio-oil mediante pirólisis lenta de paja de arroz.

Tabla 14.

Tiempos de residencia reportados en la literatura para la pirólisis lenta de paja de arroz

Autor	Intervalo de tiempo de residencia en horas (h)
Park et al. (2014)	[1 – 3]
Biswas et al. (2017)	1
Sakhiya et al. (2020)	1

Nota. Adaptado de Park et al. (2014), Biswas et al. (2017) y Sakhiya et al. (2020).

El tiempo de residencia empleado en la pirólisis lenta de paja de arroz se encuentra comprendido entre 1 y 3 horas. Se observa que dos de los estudios consultados utilizaron un tiempo de residencia de 1 hora, mientras que Park et al. (2014) evaluó un intervalo más amplio, entre 1 y 3 horas, con el propósito de analizar el efecto de esta variación en el proceso.

En consecuencia, se adoptó el intervalo de 1 a 3 horas como rango de evaluación para el análisis de sensibilidad desarrollado en la Fase II, para evaluar la influencia de esta variable sobre el proceso.

4.1.5.3 Velocidad de calentamiento La velocidad de calentamiento es una de las variables importantes para el proceso de pirólisis lenta, debido a su influencia sobre la velocidad de descomposición térmica de la biomasa y la distribución del bio-*oil*, biochar y gases. La Tabla 15 presenta las velocidades de calentamiento que se utilizaron en los estudios analizados para la producción de bio-*oil* a partir de paja de arroz, junto con el contexto en el que fueron utilizadas.

Tabla 15.

Velocidades de calentamiento reportadas en la literatura para la pirólisis lenta de paja de arroz

Referencia	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Contexto de evaluación
Xiao et al. (2010)	5	Utilizada durante la pirólisis de paja de arroz como etapa previa a la gasificación en flujo arrastrado.
Phuong et al. (2008)	5 y 20	Evaluación del efecto de la temperatura y del catalizador Al-SBA-15 sobre los productos de pirólisis de paja de arroz.
Biswas et al. (2017)	20	Empleada en un estudio comparativo de residuos agrícolas, incluida la paja de arroz.
Sakhiya et al. (2020)	10	Utilizada para evaluar el efecto de la temperatura (300–600 °C) y del tiempo de residencia (1–3 h) sobre la producción de bio- <i>oil</i> .
Sakhiya et al. (2021)	10	Empleada en la evaluación de la producción de biochar a partir de paja de arroz.

Nota. Adaptado de Xiao et al. (2010), Phuong et al. (2008), Biswas et al. (2017), Sakhiya et al. (2020) y Sakhiya et al. (2021)

Teniendo en cuenta los estudios analizados se muestra que las velocidades de calentamiento utilizadas en la pirólisis lenta de paja de arroz se encuentran comprendidas entre 5 y 20 °C/min. En particular, las velocidades de 10 y 20 °C/min son empleadas en investigaciones que se enfocan en la producción de bio-oil, mientras que la velocidad de 5 °C/min se utiliza principalmente en estudios de análisis térmico y en aplicaciones específicas del proceso.

4.1.5.4 Humedad El contenido de humedad resulta importante en el proceso debido a que la biomasa se acondiciona previamente para garantizar condiciones homogéneas durante el proceso de conversión termoquímica. La Tabla 16 presenta los contenidos de humedad reportados en la literatura analizada para la producción de bio-oil a partir de paja de arroz.

Tabla 16

Contenidos de humedad reportados en la literatura para la paja de arroz utilizada en procesos de pirólisis lenta.

Referencia	Humedad (%)	Contexto de evaluación
Phuong et al. (2008)	7,08	Biomasa previamente secada antes de los ensayos de pirólisis catalítica.
Sakhiya et al. (2021)	9,8	Biomasa acondicionada para la evaluación de la producción de biochar mediante pirólisis lenta.
Biswas et al. (2017)	11,69	Biomasa utilizada en el estudio comparativo de residuos agrícolas para producción de bio-oil.

Nota. Adaptado de Phuong et al. (2008), Sakhiya et al. (2021) y Biswas et al. (2017).

Los estudios analizados reportan contenidos de humedad comprendidos entre 7,08 % y 11,69 %, evidenciando que la biomasa debe ser sometida a un acondicionamiento previo antes de su procesamiento. La utilización de contenidos de humedad inferiores al 12 % se debe a la necesidad de reducir el consumo energético por la evaporación del agua durante el calentamiento

y para favorecer la obtención de un bio-*oil* con menor contenido de humedad y mejores propiedades fisicoquímicas.

4.1.5.5 Tamaño de partícula. El tamaño de partícula corresponde a un acondicionamiento de la biomasa, debido a su influencia sobre la transferencia de calor y la homogeneidad del proceso de conversión termoquímica. La Tabla 17 presenta los tamaños de partícula que se utilizaron en los estudios analizados para producción de bio-*oil* a partir de paja de arroz.

Tabla 17

Tamaños de partícula reportados en la literatura para la preparación de paja de arroz destinada a procesos de pirólisis lenta.

Referencia	Tamaño de partícula (mm)	Contexto de evaluación
Phuong et al. (2008)	0,3–0,5	La paja fue cortada y clasificada antes de la pirólisis.
Sakhiya et al. (2020)	< 2	La biomasa fue molida y tamizada a través de una malla de 2 mm antes de los ensayos.
Sakhiya et al. (2021)	2	La paja fue molida y clasificada mediante un tamiz de 2 mm.
Xiao et al. (2010)	0,18–0,42	La biomasa fue triturada y clasificada antes de la pirólisis.
Biswas et al. (2017)	0,5–2	La biomasa fue triturada y tamizada para obtener el rango de tamaño de partícula utilizado en los ensayos.

Nota. Adaptado de Phuong et al. (2008), Xiao et al. (2010), Biswas et al. (2017), Sakhiya et al. (2020) y Sakhiya et al. (2021).

A partir de estos estudios se puede determinar que la biomasa fue sometida a procesos de trituración y tamizado antes de su utilización, obteniendo tamaños de partícula comprendidos aproximadamente entre 0,18 y 2 mm. Se observa que varios de los estudios emplean partículas inferiores a 1 mm, ya que este tamaño favorece una transferencia de calor más uniforme y una descomposición térmica más eficiente de la biomasa, lo que puede incrementar la formación de compuestos volátiles que posteriormente se condensan para producir bio-*oil*. No obstante, también

se reportan tamaños de hasta 2 mm, lo que indica que esta variable también depende de las condiciones experimentales y de los objetivos de cada investigación.

4.1.5.6 Temperatura de reacción en la etapa de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO). La temperatura de reacción constituye una de las principales variables de operación en los procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO), debido a su influencia sobre las reacciones de eliminación de oxígeno y el mejoramiento de las propiedades del bio-*oil*. La Tabla 18 presenta las temperaturas de reacción reportadas en los estudios analizados para el mejoramiento de bio-*oil* obtenido a partir de biomasa lignocelulósica.

Tabla 18

Temperaturas de reacción reportadas en la literatura para procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO).

Referencia	HDO suave / estabilización (°C)	HDO profunda (°C)	Contexto de evaluación
Routray et al. (2016)	130	300–400	Evaluación de las etapas de estabilización e hidrodesoxigenación profunda del bio- <i>oil</i> .
Lv et al. (2018)	200	400	Estudio de la influencia de la temperatura sobre el mejoramiento del bio- <i>oil</i> .
Oh et al. (2019)	50–150	300	Evaluación de un pretratamiento seguido de hidrodesoxigenación del bio- <i>oil</i> .

Nota. Adaptado de Routray et al. (2016), Lv et al. (2018), Oh et al. (2019) y Tuppurainen et al. (2026).

A partir de estos estudios se tiene que la hidrodesoxigenación se desarrolla en dos etapas. Una primera etapa de estabilización o pretratamiento que emplea temperaturas comprendidas entre 50 y 200 °C, con el fin de reducir la reactividad del bio-*oil* y minimizar la probabilidad que ocurran reacciones de polimerización. Posteriormente, la hidrodesoxigenación profunda se lleva a cabo a temperaturas entre 300 y 410 °C, condiciones que favorecen a la eliminación de oxígeno y la

obtención de un biocombustible con propiedades más cercanas a las de los combustibles convencionales.

4.1.5.7 Presión de HDO. La presión es una de las variables más importantes en los procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO), debido a que determina la disponibilidad de hidrógeno durante las reacciones de desoxigenación y favorece la conversión del bio-*oil* hacia compuestos con menor contenido de oxígeno. La Tabla 19 presenta las presiones de operación de los estudios analizados para el mejoramiento de bio-*oils* obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica.

Tabla 19

Presiones de operación reportadas en la literatura para procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO).

Referencia	Presión de operación	Contexto de evaluación
Routray et al. (2016)	13,8 MPa	HDO en dos etapas para el mejoramiento del bio- <i>oil</i> .
Lv et al. (2018)	10–15 MPa	Evaluación de diferentes estrategias de suministro de hidrógeno para HDO.
Tuppurainen et al. (2026)	11,5 MPa	Simulación del proceso de HDO mediante Aspen Plus®.
Oh et al. (2019)	3 MPa	HDO catalítica utilizando Pt/C para el mejoramiento del bio- <i>oil</i> .

Nota. Adaptado de Routray et al. (2016), Lv et al. (2018), Oh et al. (2019) y Tuppurainen et al. (2026).

Los estudios analizados muestran que para procesos de HDO/DCO se utilizaron presiones entre rangos de 3 y 15 MPa. En la mayoría de las investigaciones emplean presiones cercanas a 10–15 MPa, lo que indica una tendencia por trabajar a alta presión para favorecer la disponibilidad de hidrógeno y promover las reacciones de eliminación de oxígeno del bio-*oil*. La excepción fue

el estudio de Oh et al. (2019), donde el proceso se desarrolló a 3 MPa, bajo condiciones experimentales particulares asociadas al sistema catalítico utilizado.

4.1.5.8 Relación hidrógeno/bio-*oil* en la etapa de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO). Esta relación resulta indispensable para el desarrollo de los procesos de hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO). Sin embargo, a diferencia de variables como la temperatura y la presión, no se identificó un criterio que exprese con exactitud la cantidad de hidrógeno empleada durante el proceso. Mientras algunos autores expresan esta condición mediante el flujo de hidrógeno alimentado al reactor, otros la reportan como relación molar, consumo específico de hidrógeno o cantidad de hidrógeno requerida por unidad de bio-*oil* procesado.

Por ejemplo, Routray et al. (2016) reportan un flujo continuo de hidrógeno de 200 sccm durante la operación del reactor, mientras que Tuppurainen et al. (2026) expresan el suministro de hidrógeno como una alimentación de 75 mol H₂/kg de bio-*oil* húmedo, con un consumo estequiométrico de 16,1 mol H₂/kg de bio-*oil* húmedo, equivalente aproximadamente a 0,032 kg H₂/kg de bio-*oil* húmedo. Por el contrario, Lv et al. (2018) y Oh et al. (2019) centran su análisis en la influencia del hidrógeno sobre el desempeño del proceso sin reportar una relación específica entre el hidrógeno alimentado y el bio-*oil* tratado.

En conjunto, la revisión bibliográfica muestra que la cantidad de hidrógeno que se requiere para la etapa de HDO/DCO depende de las características del bio-*oil*, del grado de desoxigenación esperado y de las condiciones particulares de operación de cada proceso. Debido a las diferencias entre autores para expresar esta variable, no fue posible establecer un intervalo de referencia comparable. Por esta razón, la relación hidrógeno/bio-*oil* utilizada en el caso base se seleccionó

teniendo en cuenta la información extraída de la literatura que presentaba mayor compatibilidad con las condiciones de operación y el modelo de simulación desarrollado en Aspen Plus®.

4.1.6 Caso base

Una vez determinadas las condiciones de operación para las variables técnicas del proceso, se definió el caso base para la construcción del modelo de simulación en Aspen Plus®. Para ello, se seleccionaron las condiciones de operación que se consideraron más representativas a partir de la evidencia bibliográfica recopilada, diferenciando las variables que serían evaluadas mediante análisis de sensibilidad de aquellas que permanecerían constantes durante el desarrollo de las simulaciones. De esta manera, la Tabla 20 presenta las condiciones de operación seleccionadas para la simulación del caso base del proceso en el software Aspen Plus®.

Tabla 20

Condiciones de operación seleccionadas para el caso base del proceso de producción de biocombustible marítimo.

Variable	Unidad	Valor seleccionado	Fuente bibliográfica	Aplicación
Temperatura de pirólisis	°C	500	Sakhiya et al. (2020)	Sensibilidad
Tiempo de residencia	h	1	Sakhiya et al. (2020)	Sensibilidad
Velocidad de calentamiento	°C/min	10	Sakhiya et al. (2020)	Constante
Humedad	%	9.8	Sakhiya et al. (2020)	Constante
Tamaño de partícula	mm	2	Routray et al. (2020)	Constante
Temperatura HDO	°C	350	Routray et al. (2020)	Constante
Presión HDO	bar	15	Tuppurainen et al. (2017)	Constante
Relación H ₂ /bio-oil	(Kg de H ₂) / (ton de bio-oil)	32 / 1	Sakhiya et al. (2020)	Constante

Variables como la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia se definieron como condiciones iniciales del modelo, aunque posteriormente fueron evaluadas mediante análisis de sensibilidad debido a su influencia sobre el comportamiento del proceso y la distribución de productos obtenidos. Por su parte, las demás variables se mantuvieron constantes durante las simulaciones, para que los cambios observados en los resultados dependieran únicamente de las variables evaluadas en el análisis de sensibilidad.

Finalmente, el caso base definido en esta etapa constituyó el modelo desarrollado en Aspen Plus® y sirvió como punto de partida para el análisis de sensibilidad presentado en la Fase II, en la cual se evaluó la influencia de la temperatura de pirólisis y del tiempo de residencia sobre el desempeño del proceso y las características del bio-oil obtenido.

4.2 Fase II

4.2.1 Modelo implementado en aspen plus®

Como resultado de la metodología desarrollada, se implementó satisfactoriamente el modelo de simulación en Aspen Plus® para la producción de biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz. El modelo integró las etapas de acondicionamiento de la biomasa, pirólisis lenta, separación de productos, aprovechamiento energético de los gases no condensables y del biochar, y *upgrading* del bio-oil mediante las rutas de HDO y DCO.

La implementación del modelo permitió representar de manera integrada los flujos de materia y energía del proceso, así como calcular la producción de biochar, bio-oil, gases no condensables y combustible mejorado, además del consumo de hidrógeno, los requerimientos térmicos y la recuperación de energía.

El esquema general del modelo implementado se presenta en la Figura 2 (Sección 3.2.5), la cual muestra la secuencia de operaciones unitarias y la interconexión de las corrientes

consideradas en la simulación. A partir de este modelo se obtuvieron los resultados presentados y discutidos en las secciones siguientes.

4.2.2 Verificación y análisis de consistencia del modelo

Con el fin de comprobar la confiabilidad del modelo implementado, se verificó la convergencia de las simulaciones, el cierre de los balances de masa y energía, el cumplimiento de los balances atómicos en los reactores y la ausencia de inconsistencias numéricas durante la ejecución del modelo. Los resultados obtenidos para el caso base y para el conjunto de escenarios evaluados se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21

Verificación de la consistencia del modelo implementado.

Criterio evaluado	Resultado obtenido	Criterio de aceptación	Estado
Escenarios convergentes	341 de 341	341 escenarios	Cumple
Suma de rendimientos de B2	1	1	Cumple
Error de cierre de masa del caso base	0 %	<1 %	Cumple
Error de cierre de energía del caso base	0	<1 %	Cumple
Mayor error de masa entre los escenarios	0 %	<1 %	Cumple
Balance atómico de B14	Sin desbalances	Sin desbalances	Cumple
Flujos o composiciones negativas	0	0	Cumple
Errores de convergencia	0	0	Cumple

Nota. B2: Reactor principal de pirólisis en Aspen Plus[®], bloque tipo *Ryield*. B14: Bloque tipo

RStoic, donde sucede el proceso de upgrading.

Todos los bloques del modelo ejecutaron satisfactoriamente sus cálculos y los 341 escenarios evaluados convergieron sin presentar errores numéricos ni composiciones físicamente inconsistentes. Asimismo, los rendimientos calculados mediante el bloque CALPYR conservaron la unidad en todos los escenarios y las reacciones implementadas en el reactor B14 mantuvieron el balance de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

El error de cierre de masa obtenido para el caso base fue de 0 %, mientras que el balance de energía presentó un error inferior al criterio de aceptación establecido en la metodología ($< 1 \%$). Estos resultados confirman la consistencia interna del modelo implementado y respaldan la utilización de la simulación para el análisis de balances, propiedades del combustible mejorado y evaluación de la sensibilidad presentados en las secciones siguientes

4.2.3 Balance de masa

El balance de masa para la condición base permitió verificar la conservación de la materia en el modelo implementado y cuantificar la distribución de los productos obtenidos durante las diferentes etapas del proceso. Para evitar la doble contabilización de materia, en el balance global únicamente se consideraron las corrientes que atraviesan los límites externos del sistema, excluyendo las corrientes internas de transferencia, separación y recuperación energética.

4.2.3.1 Distribución de los productos de pirólisis. La Tabla 22 presenta la distribución de los productos obtenidos en la etapa de pirólisis para una alimentación de 1000 kg/h de pellets de paja de arroz. Se observa que la mayor fracción de la biomasa se transformó en *bio-oil*, seguida por los gases no condensables y el biochar. Esta distribución constituye la base para las etapas posteriores de aprovechamiento energético y *upgrading*, ya que determina la cantidad de combustible líquido disponible para su mejoramiento y la energía recuperable a partir de los gases y del biochar.

Tabla 22

Distribución de productos obtenidos en la etapa de pirólisis.

Producto	Flujo másico (kg/h)	Rendimiento (%)
Bio-oil	371,77	37,18
Biochar	284,78	28,48
Gases no condensables	343,43	34,34
Total	1000,00	100,00

4.2.3.2 Balance de la etapa de *upgrading*. La fracción de *bio-oil* obtenida en la pirólisis se alimentó a la etapa de *upgrading* junto con una corriente de 8 kg/h de hidrógeno. Durante esta etapa, las reacciones de hidrodesoxigenación y descarboxilación modificaron la composición del *bio-oil*, generando una corriente de combustible mejorado, una fase acuosa y una corriente gaseosa compuesta principalmente por CO, CO₂ e hidrógeno no reaccionado (ver Tabla 23).

Tabla 23

*Balance de masa de la etapa de *upgrading* y acondicionamiento.*

Corriente	Flujo másico (kg/h)
Entradas	
Bio- <i>oil</i> alimentado al <i>upgrading</i>	383,8
Hidrógeno alimentado	8
Total de entradas	391,8
Salidas	
Combustible mejorado	264,6
Fase acuosa separada	78,3
Gases no condensables	48,9
Total de salidas	391,8

Nota. La fase acuosa comprende el agua presente en el *bio-oil*.

La producción de 255,73 kg/h de combustible mejorado evidencia que una parte del oxígeno presente en el *bio-oil* fue eliminada mediante la formación de agua y gases durante las reacciones de *upgrading*. Este comportamiento es consistente con las rutas de reacción implementadas en el modelo y explica la redistribución de la masa observada entre las corrientes de salida.

4.2.3.3 Balance global del proceso. Este incluyó las entradas de biomasa, hidrogeno y aire. Esta última corriente se incorporó dado que el modelo incorpora combustión de parte de los gases de combustión y del biochar para el aprovechamiento energético. En las salidas se consideraron el combustible mejorado, la fase acuosa, gases de salida, biochar no usado y cenizas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24*Balance global del proceso*

Corriente global	Flujo másico (kg/h)
Entradas	
Pellets de paja de arroz	1000
Hidrógeno	8
Aire	1000
Otras entradas externas	0
Total de entradas	2008
Salidas	
Combustible mejorado	255,73
Fase acuosa	74,4
Gases no condensables de venteo	49,64
Gases de combustión	1387,2
Biochar no aprovechado	240,4
Otras salidas externas	0
Total de salidas	2008

El flujo másico total de entrada fue de 2008 kg/h, valor que coincidió con el flujo total de salida, obteniéndose un error relativo de cierre del 0 %. Este resultado confirma la correcta conservación de la masa y demuestra la consistencia del modelo implementado en Aspen Plus®.

4.2.3 Balance de energía e integración térmica

El balance de energía para la condición base confirmó la consistencia energética del modelo implementado en Aspen Plus®. La suma de los flujos de energía que ingresan al sistema fue equivalente a la de las salidas, lo que evidencia el cumplimiento del principio de conservación de la energía y la correcta representación de las operaciones unitarias consideradas en la simulación.

La Tabla 25 presenta el balance global de energía del proceso. Las entradas estuvieron conformadas por la entalpía de las corrientes de biomasa, hidrógeno y aire, además del calor suministrado externamente y el trabajo requerido por el compresor. Por su parte, las salidas correspondieron a la entalpía del combustible mejorado, la fase acuosa, los gases de salida, el biochar y el calor rechazado por el sistema.

Tabla 25

Balance global de energía para la condición base.

Corrientes y transferencias consideradas	Contribución algebraica al balance (kW)	Valor de referencia según Çengel y Boles (2025) (kJ/kg)
Entradas		
Entalpía de la biomasa	-2020,3933	-
Entalpía del hidrógeno	-0,0017	4,2
Entalpía del aire	-0,0785	298,18

Energía externa	949,5105	-
suministrada		
Trabajo del compresor	1,2490	-
Total de entradas	-1069,7141	
Salidas		
Entalpía del combustible mejorado	-109,3004	
Entalpía de la fase acuosa	-345,3232	
Entalpía de los gases de salida	-1060,3933	
Entalpía del biochar	-60,1347	
Calor rechazado	505,4365	
Total de salidas	-1069,6241	

Nota. Los flujos de las entalpías se presentan con el signo calculado por Aspen Plus[®] de acuerdo con su referencia termodinámica. Por lo tanto, las corrientes con valores negativos no indican que retiren energía al sistema ni modifiquen su flujo.

La diferencia entre la energía total de entrada y salida fue de apenas 0,091 kW, equivalente a un error relativo de 0,0084 %, valor considerablemente inferior al criterio de aceptación del 1 % establecido en la metodología. Este resultado confirma la consistencia energética del modelo y demuestra que no existen pérdidas o ganancias artificiales de energía asociadas a la configuración de la simulación.

4.2.3.4 Requerimientos térmicos del proceso. Los mayores requerimientos energéticos se concentraron en la etapa de pirólisis y en el acondicionamiento de las corrientes previo al *upgrading*. La Tabla 26 resume las principales cargas térmicas y el trabajo mecánico obtenido para los equipos más representativos del proceso.

Tabla 26

Requerimientos y excedentes energéticos de los principales bloques.

Bloque	Tipo	Función energética	Duty o potencia (kW)	Clasificación
B2	<i>RYield</i>	Pirólisis de la biomasa	931,62	Demanda térmica
B9	<i>Heater</i>	Calentamiento previo al <i>upgrading</i>	77,82	Demanda térmica
B14	<i>RStoic</i>	Reacciones de HDO, DCO y DCO ₂	-2,05	Liberación
B15	<i>Compressor</i>	Compresión de la corriente gaseosa	1,25	Trabajo
B25	<i>HeatX</i>	Recuperación interna de calor	58,99	Calor recuperado
B22	<i>Heater</i>	Acondicionamiento de biomasa	-172,33	Calor retirado
B4	<i>Heater/Cooler</i>	Enfriamiento y condensación	-25,81	Calor retirado
B1	<i>Heater/Cooler</i>	Enfriamiento y condensación	-77,82	Calor retirado
B10	<i>Heater/Cooler</i>	Acondicionamiento final	-50,33	Calor retirado

La mayor demanda térmica correspondió al reactor de pirólisis B2, con 931,62 kW, debido a la energía necesaria para llevar la biomasa hasta las condiciones de operación del proceso y promover su descomposición térmica. El calentamiento previo al *upgrading* representó un requerimiento adicional de 77,82 kW.

Por otra parte, los bloques de enfriamiento presentaron cargas negativas, asociadas a la extracción de calor para favorecer la condensación del bio-*oil* y la separación de las fases. El reactor B14 presentó una carga térmica de -2,05 kW, indicando un comportamiento ligeramente exotérmico bajo las conversiones definidas para el caso base.

El trabajo mecánico requerido por el compresor B15 fue de únicamente 1,25 kW, por lo que su contribución al consumo energético total del proceso fue reducida en comparación con las demandas térmicas de calentamiento.

4.2.3.5 Integración térmica. Con el propósito de disminuir el consumo de energía externa, el modelo incorporó una estrategia de integración térmica basada en el aprovechamiento de los gases calientes generados durante la pirólisis y la combustión parcial del biochar. La energía recuperada se empleó para el precalentamiento de diferentes corrientes del proceso. La Tabla 27 resume las principales fuentes de energía recuperada, los equipos involucrados y el calor efectivamente reincorporado al sistema.

Tabla 27

Recuperación interna de energía.

Fuente térmica	Equipo de recuperación	Uso del calor	Calor recuperado (kW)
Gases calientes de pirólisis	B1/B4/B25/B26	Precalentamiento de corrientes	212,02
Biochar destinado a aprovechamiento	B16–B19	Generación de gases calientes	17,88
Gases de combustión	B25	Calentamiento del proceso	58,99
Total recuperado			288,89

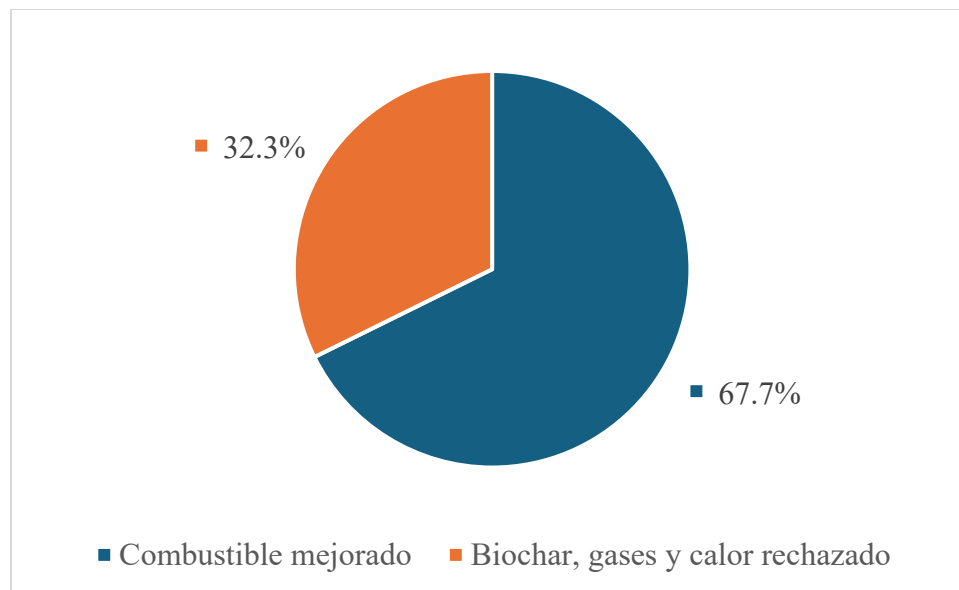
De acuerdo con los resultados obtenidos, la mayor contribución a la recuperación de energía provino de los gases calientes generados durante la pirólisis, los cuales cedieron calor a través de los equipos B1, B4, B25 y B26, aportando 212,02 kW. Adicionalmente, la combustión de una fracción del biochar permitió generar gases calientes que suministraron 17,88 kW, mientras que el intercambiador B25 recuperó 58,99 kW para el calentamiento de otras corrientes del proceso.

En conjunto, el sistema recuperó 288,89 kW, reduciendo parcialmente el requerimiento de energía externa para el acondicionamiento de la biomasa y las demás etapas del proceso. Estos resultados muestran que el aprovechamiento energético de los subproductos generados durante la pirólisis contribuye a mejorar el desempeño energético global de la planta al reutilizar parte de la energía disponible dentro del mismo proceso.

4.2.3.6 Desempeño energético del combustible. La eficiencia energética global obtenida para la condición base fue de 67,47 %, considerando la energía contenida en el combustible mejorado respecto a la energía suministrada por la biomasa, el hidrógeno consumido y los servicios energéticos externos. La Figura 5 presenta esta distribución de forma gráfica.

Figura 5

Distribución de la eficiencia energética global del proceso para la condición base.



Este resultado indica que aproximadamente dos terceras partes de la energía suministrada al proceso permanecieron almacenadas en el combustible líquido obtenido después del *upgrading*.

La fracción restante se distribuyó entre el biochar recuperado como coproducto, los gases generados durante el proceso y el calor rechazado.

4.2.4 *Propiedades del combustible mejorado*

Las propiedades del combustible mejorado se determinaron a partir de la corriente orgánica recuperada en el decantador B12. La Tabla 28 compara las principales propiedades del bio-oil alimentado al reactor de *upgrading* con las obtenidas para el combustible mejorado.

La variación relativa de cada propiedad se calculó mediante:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}}}{P_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (11)$$

Tabla 28

Comparación de las propiedades del bio-oil y del combustible mejorado

Propiedad	unidad	Bio-oil antes del <i>upgrading</i>	Combustible mejorado	Variación
Densidad a 15 °C	kg/m ³	868,29	813,79	6,3 %
Contenido de agua	(% m/m)	21,43	0,37	98,3 %
PCS	MJ/kg	36,39	44,19	21,4 %
PCI (MJ/kg)		33,32	41,21	23,6 %
Fracción de compuestos oxigenados	% m/m	46,36	33,05	28,7 %
Fracción de hidrocarburos	% m/m	30,81	65,35	112,1 %

Los resultados muestran que el proceso de *upgrading* produjo mejoras significativas en las propiedades energéticas del combustible. El contenido de agua disminuyó en un 98,26 %, mientras que la fracción de compuestos oxigenados se redujo en 28,71 %. Paralelamente, la fracción de hidrocarburos aumentó en 112,09 %, lo que evidencia la efectividad de las reacciones de hidrogenación y descarboxilación implementadas en el modelo.

Como consecuencia de estos cambios, el poder calorífico superior (PCS) aumentó de 36,39 a 44,19 MJ/kg, mientras que el poder calorífico inferior (PCI) pasó de 33,32 a 41,21 MJ/kg. Este incremento refleja una mayor concentración de compuestos con alto contenido energético y una reducción de especies oxigenadas y agua, responsables de disminuir el contenido energético del *bio-oil*.

La densidad también disminuyó de 868,29 a 813,79 kg/m³, resultado consistente con la reducción de agua y de compuestos altamente oxigenados presentes en el *bio-oil* inicial. Esta disminución favorece la obtención de un combustible con características más próximas a las de combustibles líquidos convencionales.

4.2.4.1 Poder calorífico y densidad energética. El proceso de mejora del combustible generó un cambio en el PCS desde 36,39 hasta 44,19 MJ/kg en el combustible, lo que equivale a una variación del 21,44%. Este incremento se relacionó con la disminución de agua y compuestos oxigenados y con el aumento relativo de hidrocarburos.

Debido a que el volumen disponible para almacenar combustible a bordo es limitado, también se calculó el poder calorífico volumétrico:

$$PCS_{vol} = \frac{\rho PCS}{1000} \quad (12)$$

donde la densidad se expresa en kg/m³, el PCS en MJ/kg y el resultado en MJ/L.

$$PCS_{vol} = \frac{813,79(44,19)}{1000} = 35,96 \text{ MJ/L} \quad (13)$$

4.2.5 *Análisis de sensibilidad*

El análisis de sensibilidad permitió evaluar la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia sobre la distribución de los productos de pirólisis y la producción final de combustible mejorado.

De los 341 escenarios evaluados, 341 finalizaron correctamente y ninguno presentaron advertencias o problemas de cálculo.

4.2.5.1 Resumen de los resultados. Las variables de respuesta fueron los rendimientos de bio-oil orgánico, biochar y gases y requerimiento energético externo.

Tabla 29

Resumen de resultados en análisis de sensibilidad

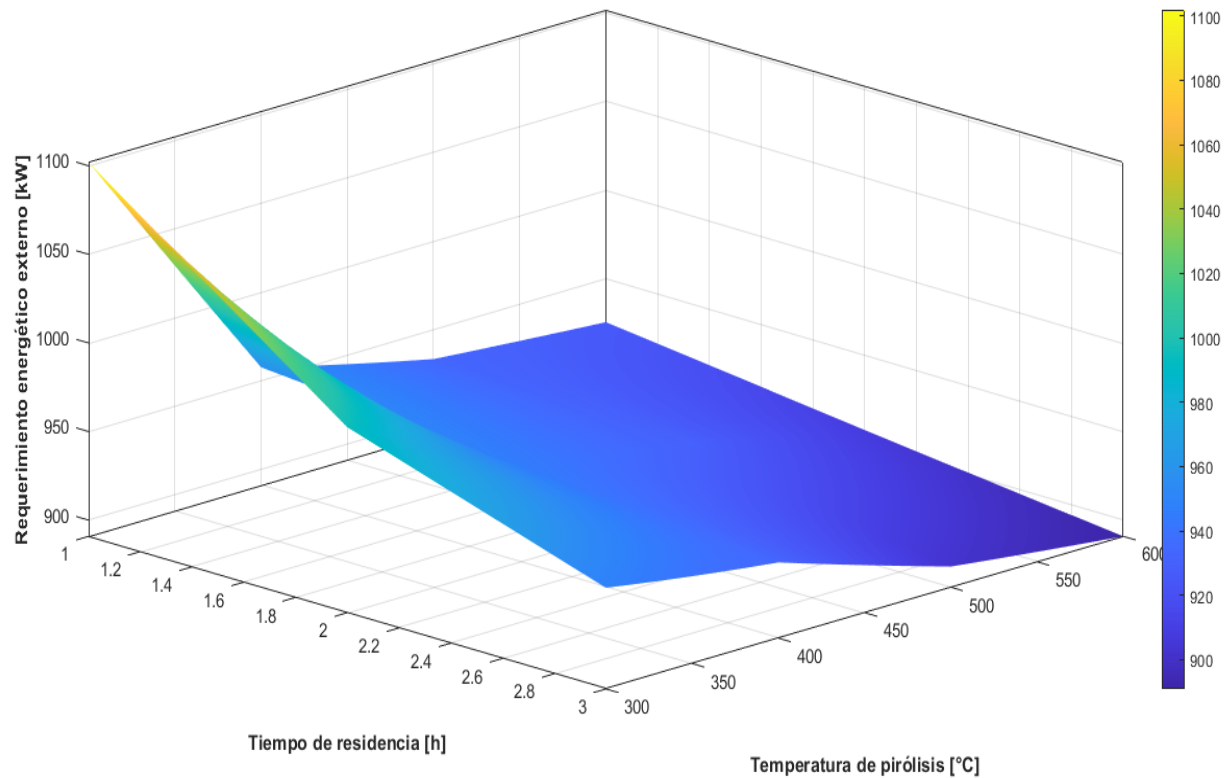
Variable de respuesta	Valor mínimo	Condición del mínimo	Valor máximo	Condición del máximo	Caso base
Rendimiento de bio-oil (%)	30.32	300°C; 1h	41.53	500°; 3h	37.37
Rendimiento de biochar (%)	31.22	600; 3h	57.62	300; 1h	39.39
Rendimiento de gases (%)	12.05	300;1h	28.36	600; 3h	23.23
Requerimiento energético externo (kW)	890,88	600 °C; 3 h	1101,93	300 °C; 1 h	929,76

La figura 6 muestra el efecto combinado de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia sobre el requerimiento energético externo del proceso. Se observa una disminución de Q_{EXTal} incrementar ambas variables, pasando de aproximadamente 1100 kW en las condiciones de menor temperatura y tiempo a valores cercanos a 890–900 kW en la región de mayor severidad operativa. La reducción es más pronunciada entre 300 y 400 °C y durante las primeras variaciones del tiempo de residencia; posteriormente, la superficie tiende a estabilizarse, lo que indica una menor sensibilidad energética a incrementos adicionales. Sin embargo, esta tendencia no debe

interpretarse directamente como que una temperatura más alta consume menos energía, sino como el resultado neto de los consumos y recuperaciones térmicas incluidos en la definición de Q_{EXT} .

Figura 6

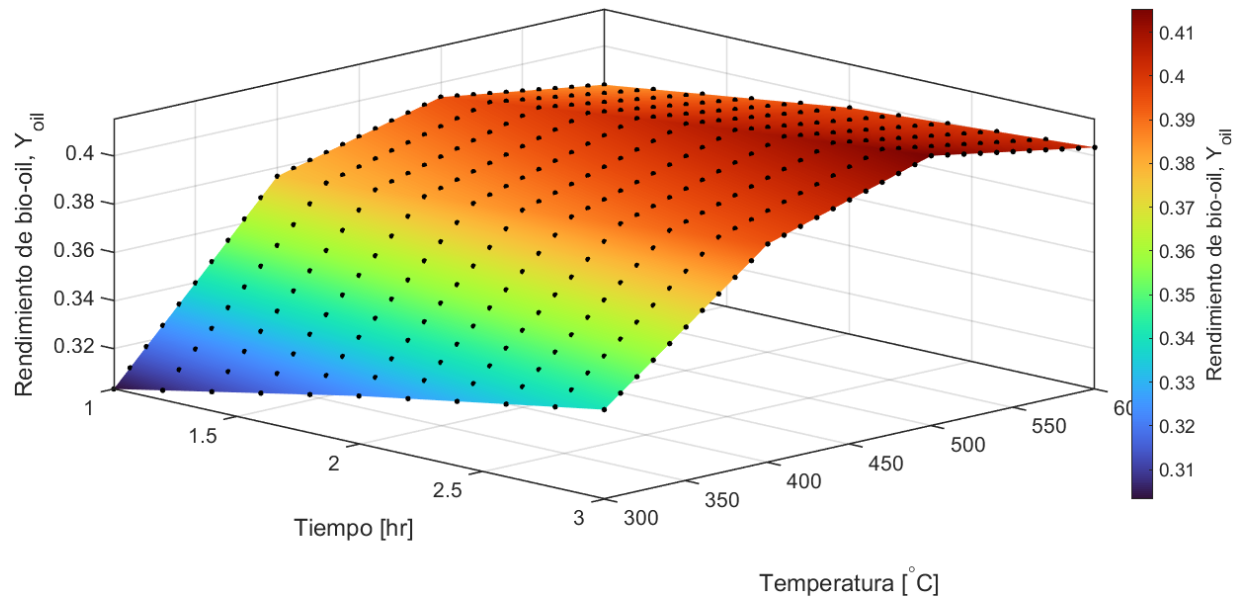
Efecto combinado de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia sobre el requerimiento energético externo del proceso



4.2.5.2 Efectos sobre el rendimiento de bio-oil. La Figura 7 presenta la variación del rendimiento de bio-oil orgánico en función de la temperatura y el tiempo de residencia.

Figura 7

Rendimiento de bio-oil orgánico en función de la temperatura y el tiempo de residencia.



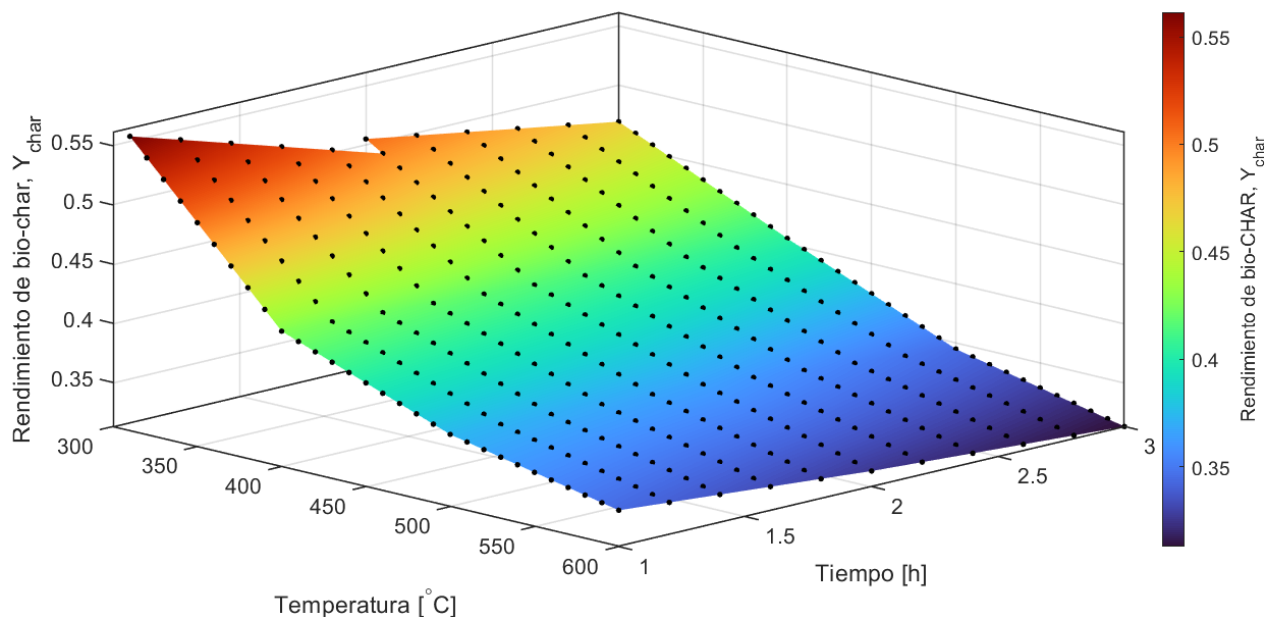
El rendimiento de bio-*oil* varió entre 30,32 y 41,53%. El valor máximo se obtuvo a 500 °C y 3 h, mientras que el mínimo correspondió a 1 °C y 3 h.

Al incrementar la temperatura desde 300 hasta 600 °C, el rendimiento de bio-*oil* aumentó de 30,32 a 41,53% para un tiempo de residencia de 3 h. A partir de esta condición, el rendimiento disminuyó, lo que indicó que temperaturas superiores favorecieron la producción de biochar en lugar de aumentar la recuperación de líquido orgánico.

4.2.5.3 Distribución de biochar y gases. En la figura (8) el rendimiento de biochar presentó valores entre 31,22 y 57,62 %. Su valor máximo se obtuvo a 300 °C y 1 h, mientras que el mínimo se encontró a 600 °C y 3 h.

Figura 8

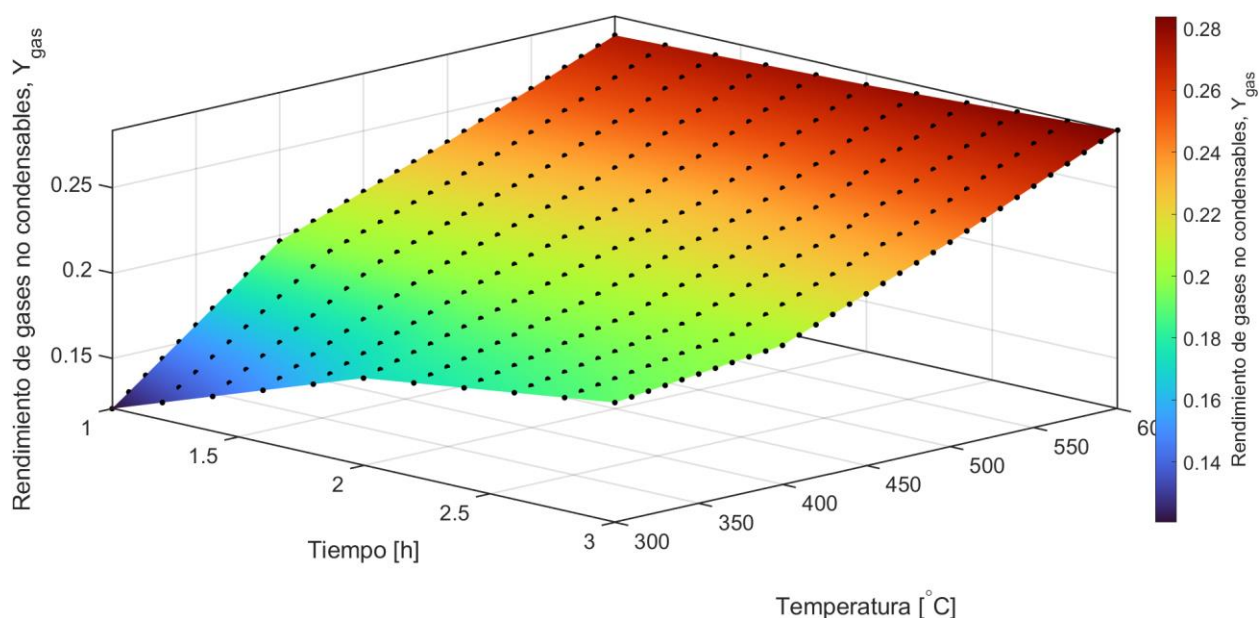
Variación de los rendimientos de biochar con la temperatura para tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas.



Por su parte, los gases alcanzaron rendimientos entre 12,05 y 28,36 %. Su valor máximo se obtuvo a 600 °C y 3 h, mientras que el mínimo se encontró a 300 °C y 1 h como se observa en la figura 9

Figura 9

Variación de los rendimientos de gases con la temperatura para tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas.



4.2.5.4 Selección de la condición técnicamente favorable. La condición técnicamente favorable no debe seleccionarse únicamente por maximizar el rendimiento de bio-oíl. También deben considerarse el requerimiento energético externo y la severidad de las condiciones de operación, representada por la temperatura y el tiempo de residencia.

Tabla 30

Comparación de los principales escenarios del análisis de sensibilidad.

Escenario	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Bio-oíl orgánico (% bs)	Energía externa (kW)
Caso base	500	2,0	40,57	929,76
Máximo bio-oíl	500	3	41,53	902.53
Menor demanda externa	600	3	40,36	890.88
Condición seleccionada	500	3	41,53	902.53

Nota. (% bs): Base Seca

La condición de 500 °C y 3 h se seleccionó como la alternativa técnicamente más favorable, debido a que alcanzó el máximo rendimiento de bio-*oil* orgánico, correspondiente al 41,53 % bs, con un requerimiento energético externo de 902,53 kW. Frente al caso base, esta condición aumentó el rendimiento en 0,96 puntos porcentuales y redujo la demanda energética en 27,23 kW. Aunque el escenario de 600 °C y 3 h presentó el menor consumo energético, el ahorro adicional fue de apenas 11,65 kW y estuvo acompañado de una reducción de 1,17 puntos porcentuales en el rendimiento de bio-*oil*, además de requerir una temperatura de operación 100 °C mayor.

4.3 Fase III Comparación de la viabilidad técnica del biocombustible frente a combustibles marítimos alternativos

Una vez obtenidas en la Fase II las propiedades y el desempeño técnico del biocombustible mejorado producido a partir de pellets de paja de arroz mediante simulación en Aspen Plus®®, se planteó una evaluación comparativa con otras alternativas energéticas utilizadas o propuestas para el transporte marítimo. Esta fase tuvo como propósito determinar la competitividad técnica del biocombustible obtenido, considerando aspectos relacionados con su desempeño energético, los requerimientos de infraestructura y su viabilidad técnica para su implementación en dicho sector.

Para alcanzar este objetivo, se estableció una metodología orientada a la selección de los combustibles de referencia, la definición de los criterios de comparación, la recopilación de la información técnica necesaria y el desarrollo del análisis comparativo correspondiente. Las actividades desarrolladas en esta fase se describen en los apartados siguientes.

4.3.1 Selección de los combustibles de referencia

Con base en el procedimiento descrito en la metodología, se seleccionaron los combustibles que servirían como referencia para evaluar la competitividad técnica del biocombustible obtenido a partir de pellets de paja de arroz. La Tabla 31 presenta las alternativas energéticas consideradas

en el análisis comparativo, incluyendo combustibles convencionales ampliamente utilizados en el transporte marítimo y opciones de bajas emisiones que actualmente hacen parte de las estrategias de descarbonización del sector.

Tabla 31

Combustibles de referencia considerados para la evaluación comparativa.

Combustible	Clasificación
Heavy Fuel Oil (HFO)	Combustible fósil convencional
Very Low Sulfur Fuel Oil (VLSFO)	Combustible fósil de bajo contenido de azufre
Metanol	Combustible alternativo
Hidrógeno	Combustible alternativo
Biocombustible obtenido en este estudio	Biocombustible

El HFO y el VLSFO fueron seleccionados como combustibles de referencia debido a que representan las principales alternativas fósiles empleadas en el transporte marítimo. El HFO ha sido históricamente el combustible predominante en la navegación comercial por su elevada disponibilidad y contenido energético, mientras que el VLSFO adquirió mayor relevancia tras la implementación de la normativa IMO 2020, la cual estableció límites más estrictos para el contenido de azufre de los combustibles marinos. La inclusión de ambos combustibles permite comparar el desempeño del biocombustible tanto frente al combustible marítimo convencional como frente al combustible fósil de mayor utilización en la actualidad.

El metanol fue incluido debido a que constituye una de las alternativas con mayor desarrollo para la descarbonización del transporte marítimo. Su creciente adopción por parte de la industria naviera, impulsada por la posibilidad de producirlo a partir de fuentes renovables y por la disponibilidad de motores compatibles, lo convierte en un referente importante para evaluar el potencial competitivo del biocombustible desarrollado en esta investigación.

Por su parte, el hidrógeno fue considerado por su potencial para contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector marítimo. Aunque su implementación aún enfrenta desafíos relacionados con el almacenamiento, el transporte y la infraestructura de suministro, es reconocido como una de las alternativas de mayor proyección dentro de las estrategias de descarbonización de largo plazo.

Finalmente, se incluyó el biocombustible obtenido a partir de pellets de paja de arroz mediante el proceso de pirólisis lenta y posterior mejoramiento catalítico simulado en Aspen Plus®. Las propiedades fisicoquímicas y energéticas determinadas durante la Fase II constituyen la base para establecer su comparación con los combustibles de referencia seleccionados, permitiendo evaluar su competitividad técnica para una posible aplicación en el transporte marítimo.

4.3.2 Comparación del desempeño técnico de los combustibles

Las propiedades técnicas de un combustible constituyen uno de los principales criterios para evaluar su potencial de aplicación en el transporte marítimo ya que determinan aspectos relacionados con su contenido energético, comportamiento durante el almacenamiento y manejo, así como su compatibilidad con los sistemas de propulsión. En este sentido, la Tabla 31 reúne las principales propiedades del biocombustible obtenido en esta investigación y las compara con las reportadas para los combustibles de referencia las cuales fueron recopiladas a partir de normas técnicas, como la ISO 8217:2024, documentación técnica de fabricantes, como ExxonMobil Marine y Methanex, e informes de organismos especializados en combustibles marinos y energías alternativas, mientras que las propiedades del biocombustible corresponden a los resultados obtenidos mediante simulación en Aspen Plus® durante la Fase II de esta investigación.

Tabla 32

Comparación de las principales propiedades técnicas de los combustibles evaluados.

Propiedad	Unidad	HFO	VLSFO	Metanol	Hidrógeno	Biocombustible obtenido
Poder calorífico superior (PCS)	MJ/kg	42.0	43	22.7	141.8	44,19
Densidad	kg/m ³	1010	940	792	0.084	813
Viscosidad cinemática	cSt	180	20	0.54	—	1.42
Contenido de agua	% masa	≤0.5	≤0.5	≤0.1	—	0.69
Contenido de oxígeno	% masa	0	0	49.9	0	6.51
Contenido de carbono	% masa	84–87	84–86	37.5	0	82.21
Contenido de hidrógeno	% masa	10–12	11–13	12.6	100	10.95
Contenido de azufre	% masa	Hasta 3.5	≤0.5	≈0	0	0.00
Relación atómica H/C	—	1.8	1.9	4.0	—	1.59

Nota. Adaptado de ISO 8217:2024; ExxonMobil Marine; IEA Advanced Motor Fuels; Methanex; U.S. DOE; H2Tools; ABS Whitepaper: *Biofuels as Marine Fuel* y resultados obtenidos mediante simulación en Aspen Plus®. La densidad La viscosidad cinemática se expresa en centistokes (cSt) a 40 °C. Las propiedades reportadas para el biocombustible corresponden a los resultados obtenidos mediante la simulación desarrollada en la Fase II.

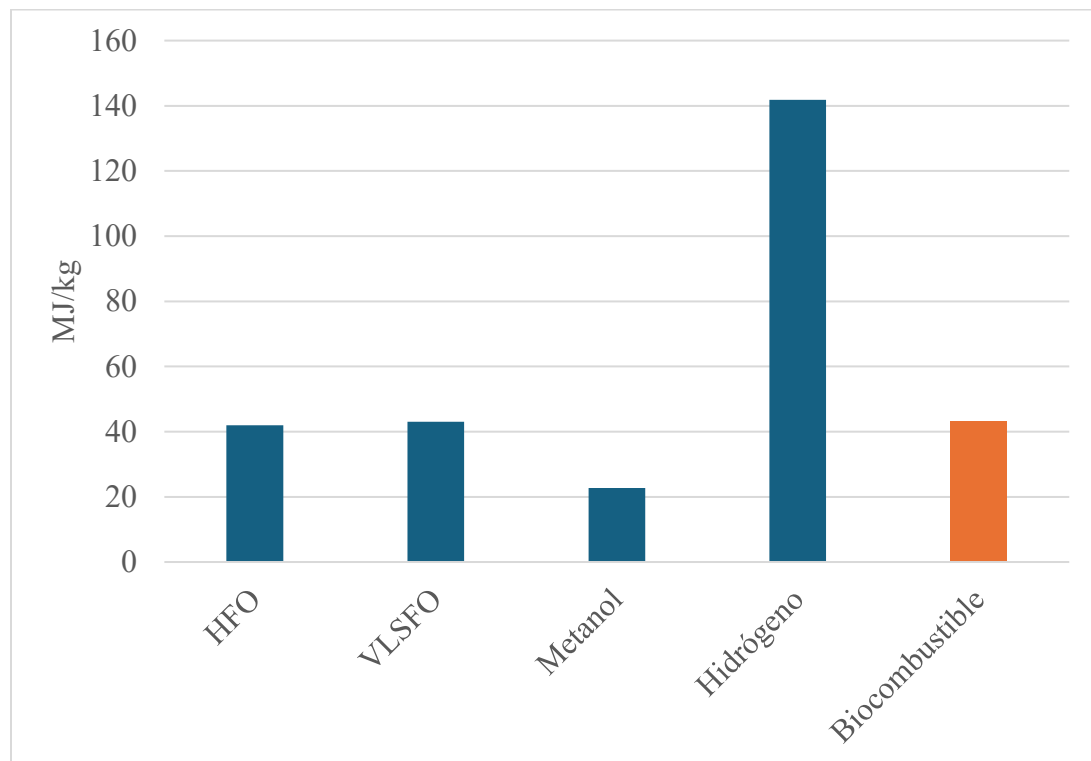
Tras analizar la tabla anterior se muestran diferencias entre el biocombustible obtenido en esta investigación y los combustibles de referencia evaluados. Para facilitar su interpretación, el análisis se desarrolla considerando inicialmente las propiedades relacionadas con el desempeño energético, seguido de las propiedades físicas y, finalmente, de la composición química del combustible.

Desempeño energético

El poder calorífico superior (PCS) constituye uno de los parámetros más importantes para evaluar el desempeño energético de un combustible, ya que representa la cantidad máxima de energía que puede liberarse durante el proceso de combustión. Como se presenta en la Tabla 32 y la Figura 10, el biocombustible obtenido en esta investigación alcanzó un PCS de 44,19MJ/kg, valor comparable con el intervalo reportado para el VLSFO (41–43 MJ/kg) y ligeramente superior al correspondiente al HFO (40,5–42,0 MJ/kg). Aunque el hidrógeno presenta un poder calorífico considerablemente mayor y el metanol un valor inferior, el biocombustible desarrollado se ubica dentro del rango de los combustibles marinos convencionales.

Figura 10

Poder Calorífico Superior (PCS) de los combustibles analizados.



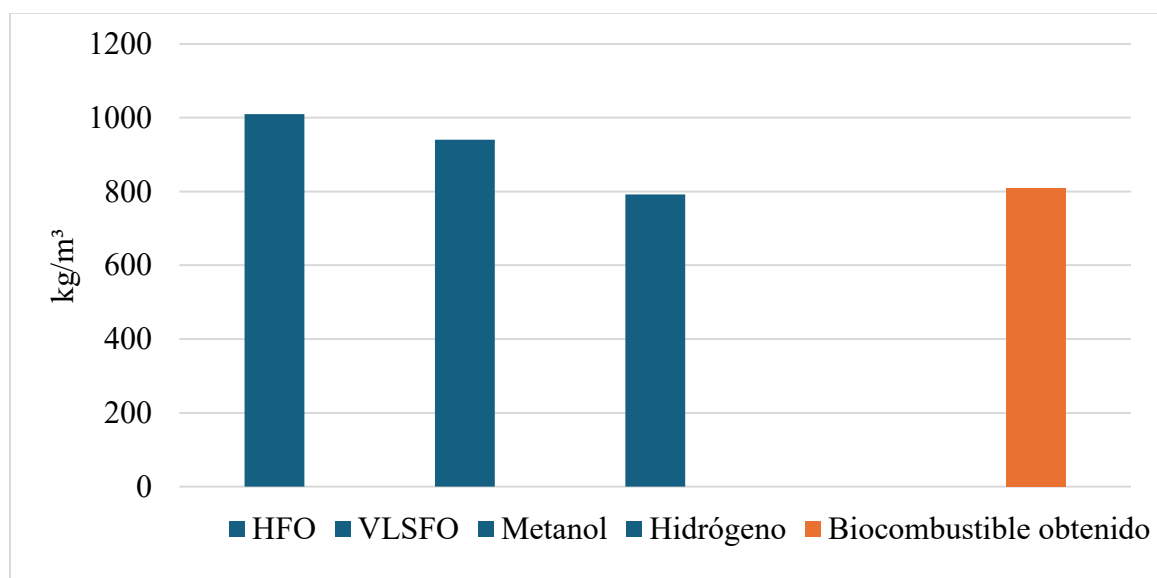
Propiedades físicas

Las propiedades físicas de un combustible influyen directamente en su almacenamiento, transporte y comportamiento durante la alimentación e inyección en los motores marinos. Entre ellas, la densidad y la viscosidad constituyen parámetros fundamentales, ya que afectan el bombeo, la atomización del combustible y, en consecuencia, la eficiencia del proceso de combustión.

Como se presenta en la Tabla 32 y la Figura 11, el biocombustible desarrollado presentó una densidad de 813 g/cm³, valor inferior al registrado para el HFO y el VLSFO, pero muy cercano al del metanol. Esta característica favorece el manejo y el bombeo del combustible, aunque implica una menor cantidad de energía almacenada por unidad de volumen en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Sin embargo, considerando que el biocombustible presenta un poder calorífico comparable al del VLSFO, esta diferencia no constituye una limitación para su utilización, sino un aspecto que debe considerarse en el diseño de los sistemas de almacenamiento y suministro.

Figura 11

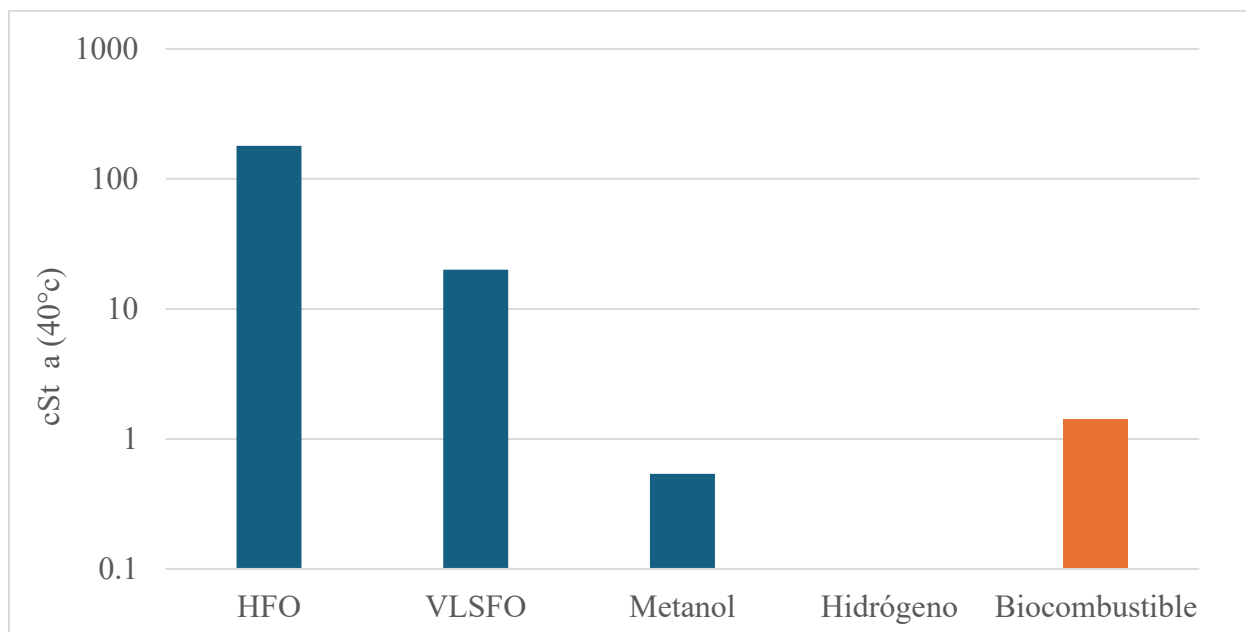
Densidad de los combustibles.



En cuanto a la viscosidad cinemática, la Tabla 32 y la Figura 12 muestran que el biocombustible obtuvo un valor de 1,42 cSt, considerablemente inferior al del HFO y el VLSFO, cuyos elevados valores requieren sistemas de precalentamiento para reducir su viscosidad antes de la inyección. Aunque este valor es superior al del metanol, representa un comportamiento intermedio que podría facilitar la atomización y el suministro del combustible, disminuyendo la necesidad de acondicionamiento previo respecto a los combustibles fósiles pesados.

Figura 12

Viscosidad cinemática.



En conjunto, los resultados indican que el biocombustible desarrollado presenta propiedades físicas favorables para su manejo, transporte y utilización en aplicaciones marítimas. Su densidad y viscosidad permiten prever un comportamiento operativo adecuado y, además, podrían representar ventajas frente a los combustibles fósiles pesados al reducir los requerimientos de acondicionamiento antes de su utilización en los sistemas de propulsión naval.

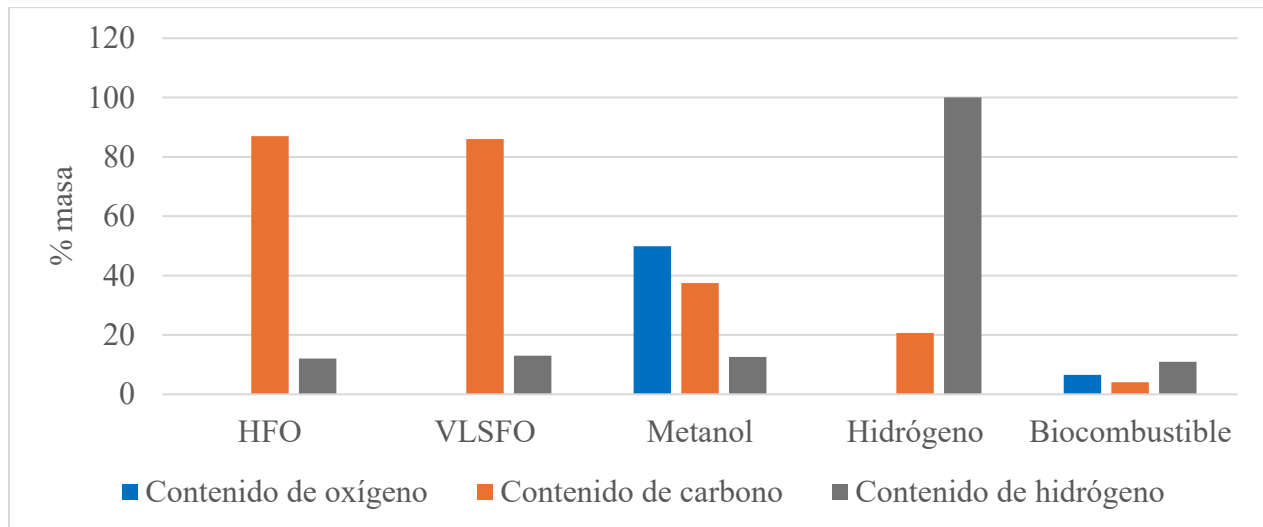
Composición química

La composición química constituye un aspecto determinante para evaluar la calidad de un combustible y su potencial de aplicación en el transporte marítimo ya que influye en el proceso de combustión, la estabilidad del combustible y el cumplimiento de los requisitos ambientales establecidos para el sector.

Como se presenta en la Tabla 32 y la Figura 13, el biocombustible desarrollado presentó un contenido de carbono de 82,21 % y de hidrógeno de 10,95 %, valores comparables con los de los combustibles fósiles utilizados en el transporte marítimo. El contenido de hidrógeno obtenido se encuentra asociado al proceso de hidrogenación (HDO) empleado durante el mejoramiento del combustible, en el cual el hidrógeno alimentado al reactor participa en las reacciones de desoxigenación e hidrogenación, favoreciendo la obtención de un combustible con características más cercanas a las de los combustibles fósiles. En contraste, el contenido de oxígeno se redujo hasta 6,51 %, valor considerablemente inferior al del metanol (49,9 %) y cercano al comportamiento de los combustibles derivados del petróleo, cuyo contenido de oxígeno es prácticamente nulo. Estos resultados evidencian la efectividad del proceso de hidrogenación aplicado durante el mejoramiento del *bio-oil*, al disminuir la presencia de compuestos oxigenados y obtener una composición química más favorable para aplicaciones energéticas.

Figura 13

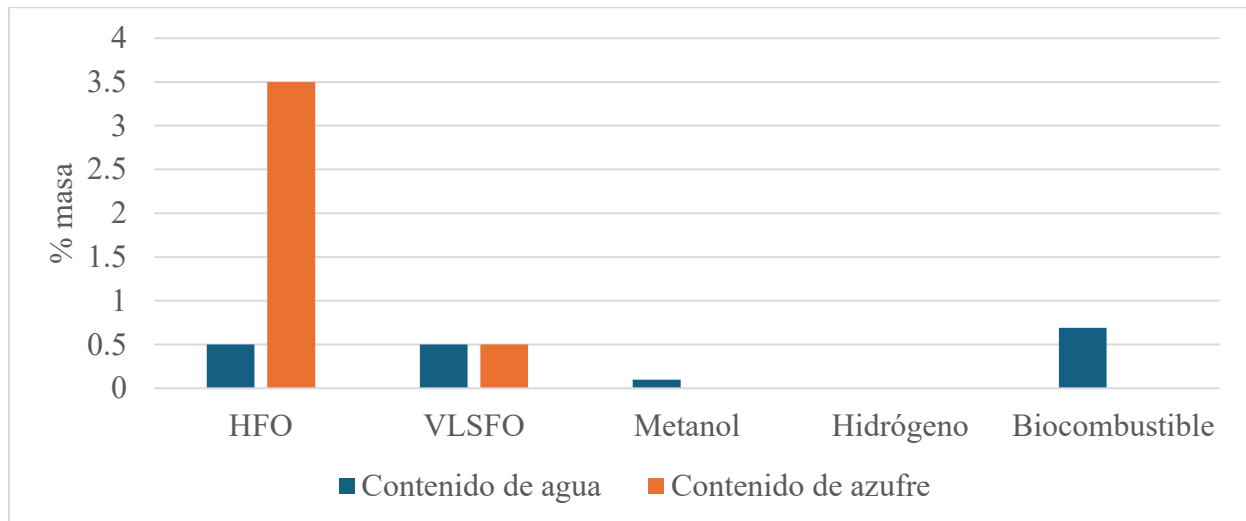
Comparación de la composición elemental de los combustibles (C, H, O).



Por otra parte, la Tabla 32 y la Figura 14 muestran que el biocombustible presentó un contenido de agua de 0,69 % y un contenido de azufre de 0,00 % en masa. Aunque la fracción de agua es superior a la reportada para los combustibles comerciales considerados en la comparación, este resultado indica que aún existe margen de optimización mediante etapas adicionales de acondicionamiento o separación. En cuanto al azufre, su ausencia representa una ventaja técnica y ambiental, ya que reduce el potencial de formación de óxidos de azufre (SO_x) durante la combustión y favorece el cumplimiento de las regulaciones internacionales sobre emisiones en el transporte marítimo.

Figura 14

Comparación del contenido de agua y azufre de los combustibles.



En conjunto, los resultados indican que el proceso de mejoramiento permitió obtener un biocombustible con una composición química similar a la de los combustibles fósiles en cuanto al predominio de carbono e hidrógeno, al tiempo que redujo significativamente el contenido de oxígeno y eliminó el azufre. Estas características favorecen tanto el desempeño energético como el comportamiento ambiental del combustible, constituyendo un aspecto positivo para su posible implementación en aplicaciones marítimas.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el biocombustible desarrollado presenta un desempeño energético comparable al de los combustibles fósiles utilizados en el transporte marítimo, propiedades físicas favorables para su manejo y una composición química consistente con el proceso de mejoramiento aplicado. Estas características indican que, desde el punto de vista técnico, el combustible reúne condiciones que respaldan su potencial de implementación en aplicaciones marítimas. No obstante, su viabilidad no depende únicamente de sus propiedades fisicoquímicas, sino también de factores relacionados con la infraestructura

necesaria para su almacenamiento, distribución y suministro, los cuales se analizan en el siguiente apartado.

4.3.3 Comparación de los requerimientos de infraestructura de los combustibles alternativos

La infraestructura requerida para la implementación de un combustible constituye uno de los principales criterios para evaluar su viabilidad técnica en el transporte marítimo, ya que determina el grado de adaptación necesario en los sistemas de almacenamiento, abastecimiento y propulsión. Dado que la infraestructura marítima actual está diseñada principalmente para la operación con combustibles fósiles convencionales, como el HFO y el VLSFO, estos combustibles se consideran la referencia para evaluar el nivel de adecuación requerido por las alternativas de bajas emisiones. En este contexto, la Tabla 33 compara los principales requerimientos de infraestructura asociados al biocombustible desarrollado en esta investigación, el metanol y el hidrógeno.

Tabla 33

Comparación de los requerimientos de adaptación de la infraestructura para la implementación de combustibles alternativos en aplicaciones marítimas.

Aspecto evaluado	Biocombustible	Metanol	Hidrógeno
Compatibilidad con la infraestructura existente	Alta	Media	Baja
Almacenamiento	Compatible con tanques para combustibles líquidos*	Tanques específicos compatibles con metanol	Tanques criogénicos o de alta presión
Abastecimiento (bunkering)	Compatible con infraestructura para combustibles líquidos, con adecuaciones operativas	Infraestructura en expansión	Infraestructura especializada

Sistemas de propulsión	Compatibilidad potencial con motores para combustibles líquidos, sujeta a validación técnica	Motores dual-fuel o específicos para metanol	Motores adaptados o pilas de combustible
------------------------	--	--	--

Nota. *Compatibilidad basada en las propiedades fisicoquímicas obtenidas para el biocombustible y en la información reportada en la literatura. La implementación puede requerir verificaciones de compatibilidad de materiales y ajustes operativos según el sistema de almacenamiento y el tipo de motor empleado.

Como se observa en la Tabla 33, el hidrógeno representa la alternativa con los mayores requerimientos de infraestructura, debido a la necesidad de sistemas especializados para su almacenamiento, abastecimiento y utilización en tecnologías de propulsión específicamente diseñadas para este combustible. Estas características implican un cambio significativo respecto a la infraestructura actualmente utilizada en el transporte marítimo.

Por su parte, el metanol presenta un nivel de adecuación intermedio. Aunque su incorporación al sector marítimo ha avanzado en los últimos años, su implementación requiere tanques construidos con materiales compatibles, infraestructura específica para el abastecimiento y motores diseñados para operar con este combustible o configuraciones dual-fuel.

En contraste, el biocombustible desarrollado presenta un comportamiento más cercano al de los combustibles líquidos convencionales. Las propiedades fisicoquímicas obtenidas en esta investigación, particularmente su densidad, viscosidad y elevado contenido energético, permiten prever una mayor compatibilidad con la infraestructura actualmente utilizada para combustibles líquidos. En consecuencia, su implementación podría aprovechar gran parte de los sistemas de almacenamiento y abastecimiento existentes, aunque su utilización requeriría estudios específicos de compatibilidad con materiales, equipos y motores antes de una aplicación comercial.

La comparación realizada muestra que el biocombustible desarrollado constituye la alternativa con mayor compatibilidad potencial respecto a la infraestructura actualmente empleada entre los combustibles alternativos evaluados. Esta característica representa una ventaja técnica

frente al metanol y al hidrógeno, ya que podría reducir las adecuaciones necesarias para su incorporación al transporte marítimo y facilitar una transición progresiva hacia combustibles de menor impacto ambiental. Con base en estos resultados, en el siguiente apartado se analiza la viabilidad técnica de implementación del biocombustible considerando las condiciones de infraestructura y operación del puerto de Cartagena.

4.3.4 Comparación de la disponibilidad del recurso para la producción de los combustibles

La disponibilidad del recurso constituye un criterio fundamental para evaluar la competitividad de los combustibles alternativos en el transporte marítimo, ya que determina la posibilidad de mantener un suministro continuo de materia prima para su producción. Debido a que cada combustible evaluado se obtiene a partir de recursos diferentes, su disponibilidad depende del origen de la materia prima, del grado de desarrollo de las cadenas de suministro y de la capacidad de producción existente. En este contexto, la Tabla 34 compara los principales aspectos relacionados con la disponibilidad del recurso para la producción del biocombustible desarrollado en esta investigación, el metanol y el hidrógeno, tomando como referencia la disponibilidad consolidada de los combustibles fósiles convencionales.

Tabla 34

Comparación de los principales aspectos relacionados con la disponibilidad del recurso para la producción de combustibles alternativos.

Aspecto evaluado	Biocombustible	Metanol	Hidrógeno
Materia prima	Paja de arroz	Gas natural, biomasa o $\text{CO}_2 + \text{H}_2$	Gas natural o agua
Disponibilidad del recurso	Residuo agrícola disponible en la región Caribe colombiana	Diversas materias primas, disponibilidad condicionada por la capacidad de producción	Producción condicionada por la disponibilidad de recursos energéticos y tecnologías de producción

Cadena de suministro	Disponibilidad regional demostrada	En expansión	En desarrollo
Dependencia de nuevas capacidades de producción	Baja	Media	Alta

Como se observa en la Tabla 34, el hidrógeno representa la alternativa con mayores desafíos desde la perspectiva del abastecimiento de materia prima. Su disponibilidad depende del desarrollo de nuevas capacidades de producción, especialmente cuando se considera la obtención de hidrógeno mediante electrólisis utilizando fuentes renovables, además de la consolidación de cadenas de suministro que aún se encuentran en proceso de desarrollo para aplicaciones marítimas (U.S. Department of Energy, 2024; H2Tools, 2024).

Por su parte, el metanol presenta una situación intermedia, ya que puede producirse a partir de diferentes materias primas, lo que proporciona flexibilidad en sus rutas de obtención. Sin embargo, la disponibilidad del metanol renovable continúa condicionada por la capacidad de producción instalada y por la expansión de las cadenas de suministro necesarias para atender la creciente demanda del sector marítimo (IEA Advanced Motor Fuels, 2023; Methanex, 2024).

En contraste, el biocombustible desarrollado utiliza como materia prima la paja de arroz, un residuo agrícola cuya disponibilidad fue evaluada durante la Fase I de esta investigación. Los resultados obtenidos evidenciaron una oferta potencial aproximada de 690.000 toneladas anuales en la región Caribe colombiana, lo que demuestra la existencia de una fuente de materia prima suficiente para sustentar su producción a escala regional. A diferencia del metanol y del hidrógeno, cuya disponibilidad depende del desarrollo de nuevas capacidades industriales, el biocombustible aprovecha un residuo agrícola ya disponible, promoviendo además la valorización de subproductos agroindustriales.

La comparación realizada evidencia que, aunque los combustibles fósiles continúan sustentándose en cadenas de suministro ampliamente consolidadas, su producción depende de un recurso no renovable (IMO, 2023; ISO, 2024). Por otra parte, el metanol y el hidrógeno presentan un importante potencial para contribuir a la descarbonización del transporte marítimo; sin embargo, su disponibilidad futura está estrechamente ligada a la expansión de sus capacidades de producción y distribución (IEA Advanced Motor Fuels, 2023; U.S. Department of Energy, 2024). En contraste, el biocombustible desarrollado aprovecha un residuo agrícola con disponibilidad demostrada en la región Caribe colombiana, lo que fortalece su competitividad desde la perspectiva del abastecimiento de materia prima y complementa las ventajas identificadas previamente en términos de desempeño técnico y requerimientos de infraestructura.

4.3.5 Evaluación de la viabilidad técnica de implementación del biocombustible en el puerto de Cartagena.

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores evidencian que el biocombustible desarrollado presenta características favorables desde el punto de vista del desempeño técnico, los requerimientos de infraestructura y la disponibilidad de materia prima. No obstante, la implementación de un combustible alternativo en el transporte marítimo depende también de las condiciones particulares del entorno donde se pretende desarrollar su producción y abastecimiento. En este contexto, el puerto de Cartagena constituye un escenario de interés para evaluar la viabilidad técnica del biocombustible, debido a su importancia dentro del sistema portuario colombiano, su infraestructura para el manejo de combustibles líquidos y su proximidad a zonas con disponibilidad de biomasa residual proveniente del cultivo de arroz.

Infraestructura portuaria y logística

El puerto de Cartagena dispone de una infraestructura consolidada para el almacenamiento, manejo y abastecimiento de combustibles líquidos, desarrollada principalmente para atender las actividades industriales y marítimas localizadas en la zona de Mamonal. La presencia de terminales especializados, redes de tuberías, tanques de almacenamiento y facilidades para operaciones de bunkering constituye una ventaja para la incorporación de combustibles líquidos alternativos, ya que reduce la necesidad de desarrollar infraestructura completamente nueva.

En este contexto, las propiedades físicas obtenidas para el biocombustible desarrollado en esta investigación adquieren especial relevancia. Su estado líquido, la densidad de 0,799 g/cm³ y la viscosidad cinemática de 1,42 cSt indican un comportamiento más cercano al de combustibles líquidos convencionales que al de alternativas como el hidrógeno, cuyo almacenamiento y suministro requieren condiciones de alta presión o sistemas criogénicos. En consecuencia, el biocombustible podría integrarse con menores adaptaciones a la infraestructura actualmente disponible para el manejo de combustibles líquidos en el puerto de Cartagena, representando una ventaja técnica frente a otras alternativas de bajas emisiones.

Disponibilidad regional de materia prima

La disponibilidad de materia prima constituye otro de los factores que favorecen la viabilidad técnica del biocombustible en el contexto del puerto de Cartagena. Como se determinó en la Fase I de esta investigación, la región Caribe colombiana presenta una oferta potencial aproximada de 690.000 toneladas anuales de paja de arroz susceptible de aprovechamiento energético, resultado que evidencia la existencia de un suministro regional suficiente para soportar la producción del biocombustible propuesto.

La localización estratégica de Cartagena respecto a los principales departamentos productores de arroz de la región Caribe representa una ventaja adicional para el desarrollo de una cadena de suministro basada en este residuo agrícola. La cercanía entre las zonas de producción y el puerto permite reducir las distancias de transporte de la biomasa, facilitando su recolección, acondicionamiento y posterior transformación en biocombustible. Asimismo, la utilización de un residuo agrícola evita la competencia con cultivos destinados a la producción de alimentos, promoviendo un aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles y fortaleciendo el concepto de economía circular dentro del sector agroindustrial.

En comparación con otras alternativas energéticas, esta condición representa una ventaja importante. Mientras que los combustibles fósiles dependen del suministro continuo de petróleo y el metanol renovable y el hidrógeno verde requieren el desarrollo de nuevas cadenas de producción e infraestructura para garantizar su disponibilidad, el biocombustible propuesto aprovecha una materia prima que ya se genera de manera continua como resultado de la actividad agrícola regional. En consecuencia, la disponibilidad de paja de arroz constituye un factor que fortalece la viabilidad técnica del biocombustible para su implementación en el puerto de Cartagena, al proporcionar una fuente de abastecimiento renovable con potencial para sostener su producción a escala regional.

Evaluación integrada de la viabilidad técnica

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer que el biocombustible producido a partir de pellets de paja de arroz presenta condiciones técnicas favorables para su implementación en el transporte marítimo. Desde el punto de vista de sus propiedades energéticas, el combustible desarrollado alcanzó un poder calorífico superior de 43,1 MJ/kg, valor comparable con el reportado para el VLSFO y superior al intervalo correspondiente al HFO, lo que evidencia

su capacidad para suministrar un contenido energético similar al de los combustibles fósiles empleados actualmente en el sector. Asimismo, el proceso de hidrodesoxigenación permitió reducir significativamente el contenido de oxígeno y eliminar el azufre, obteniéndose un combustible con características químicas más adecuadas para aplicaciones energéticas.

En cuanto a los requerimientos de infraestructura, el análisis comparativo mostró que el biocombustible presenta ventajas frente a otras alternativas de bajas emisiones, especialmente respecto al hidrógeno y, en menor medida, al metanol. Debido a que conserva las características propias de un combustible líquido, su almacenamiento, transporte y abastecimiento podrían realizarse aprovechando gran parte de la infraestructura actualmente utilizada para combustibles líquidos, reduciendo la necesidad de implementar sistemas especializados de almacenamiento o realizar modificaciones profundas en los sistemas de propulsión de las embarcaciones.

De igual forma, la disponibilidad de materia prima representa un aspecto favorable para su implementación en el contexto colombiano. La oferta potencial de aproximadamente 690.000 toneladas anuales de paja de arroz estimada durante la Fase I evidencia la existencia de un recurso renovable con capacidad para abastecer la producción del biocombustible. La proximidad de las principales zonas productoras de arroz de la región Caribe al puerto de Cartagena favorece además el establecimiento de una cadena regional de suministro, fortaleciendo la viabilidad técnica del proceso desde la perspectiva del abastecimiento de biomasa.

Considerando de manera conjunta estos resultados, el puerto de Cartagena reúne condiciones favorables para la implementación del biocombustible propuesto. La presencia de infraestructura consolidada para el manejo de combustibles líquidos, la ubicación estratégica dentro del sistema logístico nacional y la disponibilidad regional de la materia prima constituyen

factores que respaldan su incorporación como una alternativa para contribuir a la transición energética del transporte marítimo.

No obstante, es importante señalar que la viabilidad técnica identificada en esta investigación corresponde a una evaluación basada en el desempeño del combustible, los requerimientos de infraestructura y la disponibilidad del recurso. En consecuencia, la implementación a escala comercial requerirá estudios complementarios relacionados con aspectos económicos, ambientales y operacionales, así como pruebas experimentales en motores marinos que permitan validar el comportamiento del biocombustible bajo condiciones reales de operación.

Conclusiones y trabajos futuros

La Fase I permitió identificar, a partir de la revisión de literatura, los parámetros técnicos clave (temperatura, tiempo de residencia, velocidad de calentamiento, humedad y tamaño de partícula) y las condiciones de operación requeridas para la producción de biocombustible marítimo a partir de pellets de paja de arroz mediante pirólisis lenta y posterior mejoramiento por hidrodesoxigenación/descarboxilación (HDO/DCO). La caracterización de la biomasa y la disponibilidad de paja de arroz en la región Caribe respaldaron la selección de esta materia prima y del escenario de estudio en la zona industrial de Mamonal, Cartagena.

La simulación desarrollada en la Fase II en Aspen Plus® permitió representar de manera integrada el proceso completo, con un error de cierre de los balances de masa y energía inferior al 1 % en los 341 escenarios evaluados, lo que confirma la consistencia y confiabilidad del modelo implementado. Para la condición base, el proceso de pirólisis produjo un rendimiento de 37,18 % de bio-oil, 28,48 % de biochar y 34,34 % de gases no condensables. El posterior *upgrading* mediante HDO/DCO mejoró de manera significativa la calidad del bio-oil: el contenido de agua se redujo en 98,26 % y la fracción de compuestos oxigenados en 28,71 %, mientras que la fracción de hidrocarburos aumentó en 112,09 %. Como resultado, el poder calorífico superior del combustible mejorado se incrementó de 36,39 a 44,19 MJ/kg, acercándose a las especificaciones de los combustibles marítimos convencionales. Adicionalmente, la eficiencia energética global del proceso para la condición base fue de 67,47 %, y el análisis de sensibilidad permitió identificar el efecto de la temperatura de pirólisis y del tiempo de residencia sobre la distribución de productos y las propiedades del combustible, confirmando la importancia de controlar estas variables para mejorar el rendimiento y la calidad del biocombustible obtenido.

Finalmente, en la Fase III la comparación del biocombustible obtenido con los combustibles marítimos de referencia (HFO, VLSFO, metanol e hidrógeno) mostró que sus propiedades técnicas son comparables a las de estos combustibles, lo que lo posiciona como una alternativa competitiva para el sector. La disponibilidad de paja de arroz en la región Caribe y la infraestructura portuaria existente en Cartagena favorecen su posible implementación. No obstante, su aplicación a escala industrial requiere considerar aspectos adicionales relacionados con el escalamiento del proceso, la disponibilidad de hidrógeno, aunque este aspecto se puede ver influenciado por la cercanía del punto con la Refinería de Cartagena ya que esta industria presenta *hubs* del H₂, para el *upgrading* y el cumplimiento de la normativa vigente para combustibles marítimos.

Trabajos futuros

- Validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante la simulación en Aspen Plus®, con pruebas de pirólisis lenta y *upgrading* a escala de laboratorio o planta piloto con pellets de paja de arroz.
- Evaluar el escalamiento del proceso a nivel industrial, incluyendo un análisis técnico-económico con costos de inversión y operación de la planta propuesta.
- Ampliar el análisis de sensibilidad a otras variables del proceso, como la relación hidrógeno/bio-*oil*, la temperatura y la presión de la etapa de HDO/DCO, que en este trabajo se mantuvieron constantes.
- Evaluar el origen y la sostenibilidad del hidrógeno requerido para el *upgrading*, considerando alternativas como el hidrógeno verde, dado su efecto sobre la viabilidad ambiental y económica del proceso.

- Realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) del biocombustible obtenido, para cuantificar su desempeño ambiental frente a los combustibles marítimos convencionales.
- Profundizar en el análisis normativo y de certificación requerido para su incorporación en el transporte marítimo, conforme a estándares como el ISO 8217 y la regulación de la OMI.

Referencias Bibliográficas

- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419–428.
- Corton, J., Donnison, I. S., Patel, M., Bühle, L., Hodgson, E., Wachendorf, M., Bridgwater, A., Allison, G., & Fraser, M. D. (2016). Expanding the biomass resource: Sustainable oil production via fast pyrolysis of low input high diversity biomass and the potential integration of thermochemical and biological conversion routes. *Applied Energy*, 177, 852–862. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.088>
- DANE. (2024). *Boletín técnico: Quinto Censo Nacional Arrocero (5° CNA) 2023. Primera entrega (Resultados departamentales)*. DANE; Fedearroz–FNA (Fondo Nacional del Arroz). www.dane.gov.co/files/operaciones/CNA/bol-5toCNA-2023.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística & Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz). (2024). *Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado. Segundo Semestre 2024* [Boletín Técnico]. DANE; Fedearroz–FNA (Fondo Nacional del Arroz).
- Elliott, D. C. (2007). Historical developments in hydroprocessing bio-oils. *Energy & Fuels*, 21(3), 1792–1815.
- Huber, G. W., Iborra, S., & Corma, A. (2006). Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. *Chemical Reviews*, 106(9), 4044–4098. <https://doi.org/10.1021/cr068360d>

- International Maritime Organization. (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships* (MEPC.377(80); MEPC 80/17/Add.1, Annex 15). International Maritime Organization.
- International Organization for Standardization. (2024). *ISO 8217:2024 Marine Fuel Specifications—FAME Sulfur Distillate Residual*. iTeh Standards. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/0cc30b30-75d5-4b89-b203-843dec92a82c/iso-8217-2024>
- Letoffet, A., Campion, N., Böhme, M., Jensen, C. D., Ahrenfeldt, J., & Clausen, L. R. (2024). Techno-economic assessment of upgraded pyrolysis bio-oils for future marine fuels. *Energy Conversion and Management*, 306, 118225. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118225>
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Mukherjee, A., Bruijninx, P., & Junginger, M. (2023). Techno-economic competitiveness of renewable fuel alternatives in the marine sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113127. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113127>
- Oasmaa, A., & Czernik, S. (1999). Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils State of the Art for the End Users. *Energy & Fuels*, 13(4), 914–921. <https://doi.org/10.1021/ef980272b>
- Park, J., Lee, Y., Ryu, C., & Park, Y.-K. (2014). Slow pyrolysis of rice straw: Analysis of products properties, carbon and energy yields. *Bioresource Technology*, 155, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.084>
- Sakhiya, A. K., Anand, A., Aier, I., Vijay, V. K., & Kaushal, P. (2021). Suitability of rice straw for biochar production through slow pyrolysis: Product characterization and

thermodynamic analysis. *Bioresource Technology Reports*, 15. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100818>

Sakhiya, A. K., Baghel, P., Pathak, S., Vijay, V. K., & Kaushal, P. (2020). Effect of process parameters on slow pyrolysis of rice straw: Product yield and energy analysis. *2020 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE)*, 1–9.

UPME. (2021). *PLAN INDICATIVO DE ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS*.

Zincir, B. A., & Arslanoglu, Y. (2024). Comparative Life Cycle Assessment of Alternative Marine Fuels. *Fuel*, 358, 129995. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129995>

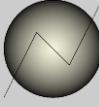
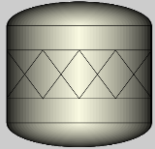
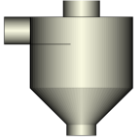
Apéndices

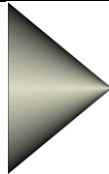
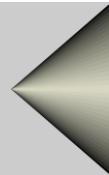
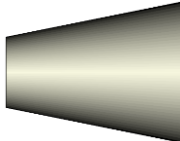
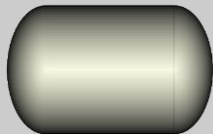
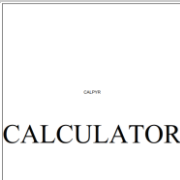
Apéndice A.

Configuración del modelo de simulación en Aspen Plus®

Tabla 35.

Elementos y bloques empleados en el modelo de simulación en Aspen Plus®

BLOQUE	TIPO	FUNCIÓN	LOGO
B1, B4, B9, B10, B17, B18, B21, B22, B26	Heater	Lleva la corriente de biomasa hasta la temperatura establecida para su ingreso al reactor de descomposición.	
B25	HeatX	Permite el intercambio de energía entre una corriente caliente y una corriente fría, recuperando calor dentro del proceso y reduciendo el requerimiento de servicios térmicos externos.	
B2, B16	RYield	Representa la descomposición de la biomasa no convencional en componentes convencionales mediante rendimientos de producto previamente especificados.	
B19	RGibbs	Simula la combustión de la corriente combustible mediante la minimización de la energía libre de Gibbs, estimando la composición de equilibrio de los productos sin necesidad de definir previamente todas las reacciones químicas.	
B14	RStoic	Representa las reacciones químicas del proceso de HDO mediante ecuaciones estequiométricas y conversiones previamente definidas. En este bloque, los compuestos oxigenados del bio-oil reaccionan con hidrógeno para reducir su contenido de oxígeno y mejorar las propiedades del combustible.	
B3	SSplit	Separa las diferentes subcorrientes de sólidos presentes en los productos obtenidos en B2, permitiendo aislar la fracción sólida de las demás fases.	
B5, B7, B11	Flash2	Separa la corriente de entrada en una fase vapor y una fase líquida a partir de las condiciones de temperatura y presión especificadas, permitiendo retirar los gases no condensables de los productos condensados del proceso.	

B20, B13, B8	Mixer	Combinan las corrientes de alimentación, recirculación o aire requeridas en las diferentes secciones del proceso, generando una única corriente de salida con condiciones uniformes de composición, temperatura y presión.	
B24	FSplit	Distribuye la corriente de entrada en diferentes ramales según fracciones previamente definidas.	
B15	Compr	Eleva la presión de la corriente gaseosa para compensar las pérdidas de presión del sistema y facilitar su transporte, recirculación o ingreso a las unidades posteriores.	
B12	Decanter	Separa las fases líquidas acuosa y orgánica a partir de sus diferencias de densidad y miscibilidad. Su función es retirar el exceso de agua formado durante la HDO y recuperar una fase rica en hidrocarburos correspondiente al combustible mejorado.	
CALPYR	Calculator	Ejecuta los cálculos requeridos para establecer y asignar los rendimientos de los productos de pirólisis al bloque RYield correspondiente, de acuerdo con las condiciones y relaciones definidas en el modelo.	

Nota. Se presentan los bloques incorporados en el modelo, el tipo de operación que representan, su función dentro del proceso y el símbolo gráfico correspondiente en Aspen Plus®.

a La nomenclatura compuesta por la letra B seguida de un número identifica cada bloque dentro de la simulación.

b Los bloques Calculator corresponden a herramientas internas de cálculo y no representan equipos físicos del proceso.

Tabla 36.*Acciones y conversiones fraccionales implementadas en el reactor B14.*

N.º Aspen	Ruta	Componente de conversión	Reacción estequiométrica	Conversión (%)
1	HDO	1:3-D-01	1:3-D-01 + 2 H ₂ → TOLUE-02 + 2 H ₂ O	50
2	HID	1-UND-01	1-UND-01 + H ₂ → N-UND-01	90
3	HID	1-DOC-01	1-DOC-01 + H ₂ → N-DOC-01	80
4	HID	1-DOD-01	1-DOD-01 + H ₂ → N-DOD-01	90
5	HID	TRANS-01	TRANS-01 + H ₂ → N-EIC-01	50
6	HID	1-TET-01	1-TET-01 + H ₂ → N-TET-01	50
7	HDO	ETHYL-01	ETHYL-01 + 6 H ₂ → N-HEX-03 + 4 H ₂ O	50
8	HDO	TETRA-01	TETRA-01 + 3 H ₂ → N-PEN-01 + 2 H ₂ O	50
9	HDO	4:8-D-01	4:8-D-01 + 2 H ₂ → N-UND-01 + H ₂ O	30
10	HDO	3-MET-01	3-MET-01 + 3 H ₂ → METHY-01 + H ₂ O	50
11	HDO	CYCLO-01	CYCLO-01 + 2 H ₂ → CYCLO-03 + H ₂ O	40
12	HDO	2:4-D-01	2:4-D-01 + 3 H ₂ → 1:1-D-01 + H ₂ O	50
13	HDO	CYCLO-02	CYCLO-02 + 2 H ₂ → ETHYL-02 + H ₂ O	50
14	HDO	PHENO-01	PHENO-01 + H ₂ → BENZE-01 + H ₂ O	50
15	HDO	GUAIA-01	GUAIA-01 + 2 H ₂ → TOLUE-02 + 2 H ₂ O	50
16	HDO	P-ETH-01	P-ETH-01 + H ₂ → ETHYL-03 + H ₂ O	50
17	HDO	2:3-X-01	2:3-X-01 + H ₂ → O-XYL-01 + H ₂ O	50
18	HDO	4-MET-01	4-MET-01 + 2 H ₂ → P-XYL-02 + 2 H ₂ O	50
19	HDO	2:4-X-01	2:4-X-01 + H ₂ → O-XYL-01 + H ₂ O	50
20	HDO	ACETI-01	ACETI-01 + 3 H ₂ → ETHAN-01 + 2 H ₂ O	30
21	HDO	FORMI-01	FORMI-01 + 3 H ₂ → CH ₄ + 2 H ₂ O	30
22	HDO	METHA-01	METHA-01 + H ₂ → CH ₄ + H ₂ O	50
23	HDO	ETHAN-02	ETHAN-02 + H ₂ → ETHAN-01 + H ₂ O	50
26	DCO	4:8-D-01	4:8-D-01 → N-DEC-01 + CO	20
27	DCO	ACETI-01	ACETI-01 + H ₂ → CH ₄ + CO + H ₂ O	10
28	DCO ₂	ACETI-01	ACETI-01 → CH ₄ + CO ₂	10
29	DCO	FORMI-01	FORMI-01 → CO + H ₂ O	10
30	DCO ₂	FORMI-01	FORMI-01 → CO ₂ + H ₂	10
31	DCO	CYCLO-01	CYCLO-01 + H ₂ → N-BUT-01 + CO	10
32	DCO	ACETO-01	ACETO-01 → ETHAN-01 + CO	20
33	HDO	ACETO-01	ACETO-01 + 2 H ₂ → PROPA-01 + H ₂ O	30

Nota. Elaboración propia a partir de las especificaciones implementadas en el reactor B14 de Aspen Plus®. Todas las reacciones se definieron mediante conversión fraccional respecto al componente indicado. HDO = hidrodesoxigenación; HID = hidrogenación; DCO =

descarbonilación; DCO_2 = descarboxilación. Los identificadores corresponden a los códigos empleados en Aspen Plus[®]. Las reacciones 24 y 25 no se encuentran activas en la configuración analizada.

Apéndice B*Código de la rutina implementada en Fortran*

C RENDIMIENTOS DE PIROLISIS DE PAJA DE ARROZ

C RANGO VALIDO: 300-600 C Y 1-3 HORAS

TC=TPYR

TR=TRES

C SI TRES NO TIENE UN VALOR VALIDO, USAR 2 HORAS

IF (TR .LT. 1D0) TR=2D0

IF (TR .GT. 3D0) TR=2D0

C EVITAR EXTRAPOLACION DE TEMPERATURA

IF (TC .LT. 300D0) TC=300D0

IF (TC .GT. 600D0) TC=600D0

C INTERPOLACION CON TEMPERATURA

C FC = BIOCHAR, FO = LIQUIDOS, FG = GAS

C SUFIJOS 1, 2 Y 3 INDICAN EL TIEMPO EN HORAS

IF (TC .LE. 400D0) THEN

FT=(TC-300D0)/100D0

$$FC1=.5700D0+FT*(.4200D0-.5700D0)$$

$$FO1=.3000D0+FT*(.3700D0-.3000D0)$$

$$FG1=.1192D0+FT*(.1932D0-.1192D0)$$

$$FC2=.5000D0+FT*(.4100D0-.5000D0)$$

$$FO2=.3200D0+FT*(.3800D0-.3200D0)$$

$$FG2=.1700D0+FT*(.1968D0-.1700D0)$$

$$FC3=.4672D0+FT*(.4000D0-.4672D0)$$

$$FO3=.3392D0+FT*(.3900D0-.3392D0)$$

$$FG3=.1900D0+FT*(.2000D0-.1900D0)$$

ELSE IF (TC .LE. 500D0) THEN

$$FT=(TC-400D0)/100D0$$

$$FC1=.4200D0+FT*(.3700D0-.4200D0)$$

$$FO1=.3700D0+FT*(.3900D0-.3700D0)$$

$$FG1=.1932D0+FT*(.2300D0-.1932D0)$$

$$FC2=.4100D0+FT*(.3600D0-.4100D0)$$

$$FO2=.3800D0+FT*(.4000D0-.3800D0)$$

$$FG2=.1968D0+FT*(.2260D0-.1968D0)$$

$$FC3=.4000D0+FT*(.3400D0-.4000D0)$$

$$FO3=.3900D0+FT*(.4100D0-.3900D0)$$

$$FG3=.2000D0+FT*(.2372D0-.2000D0)$$

ELSE

$$FT=(TC-500D0)/100D0$$

$$FC1=.3700D0+FT*(.3400D0-.3700D0)$$

$$FO1=.3900D0+FT*(.3800D0-.3900D0)$$

$$FG1=.2300D0+FT*(.2700D0-.2300D0)$$

$$FC2=.3600D0+FT*(.3200D0-.3600D0)$$

$$FO2=.4000D0+FT*(.3900D0-.4000D0)$$

$$FG2=.2260D0+FT*(.2720D0-.2260D0)$$

$$FC3=.3400D0+FT*(.3100D0-.3400D0)$$

$$FO3=.4100D0+FT*(.4000D0-.4100D0)$$

$$FG3=.2372D0+FT*(.2812D0-.2372D0)$$

ENDIF

C INTERPOLACION CON EL TIEMPO

IF (TR .LE. 2D0) THEN

$$FR=TR-1D0$$

$$YC=FC1+FR*(FC2-FC1)$$

$$YO=FO1+FR*(FO2-FO1)$$

$$YG=FG1+FR*(FG2-FG1)$$

ELSE

$$FR=TR-2D0$$

$$YC=FC2+FR*(FC3-FC2)$$

$$YO=FO2+FR*(FO3-FO2)$$

$$YG=FG2+FR*(FG3-FG2)$$

ENDIF

C NORMALIZACION DE LOS TRES PRODUCTOS

$$YSUM=YC+YO+YG$$

$$YC=YC/YSUM$$

$$YO=YO/YSUM$$

$$YG=YG/YSUM$$

$$YCHAR=YC$$

$$YOIL=YO$$

$$YGAS=YG$$

C BIOCHAR

$$YBC=YC$$

C DISTRIBUCION MASICA DEL GAS

C CONVERSION DE LA COMPOSICION MOLAR A MASICA

$$YCO=YG*.3233241158D0$$

$$YCO2=YG*.6344621766D0$$

$$YH2=YG*.0056858874D0$$

$$YCH4=YG*.0365278202D0$$

C LOS LIQUIDOS BASE SUMAN 0.47004

$$SO=YO/.47004D0$$

$$YNDEC=.021204D0*SO$$

$$YNHE1=.006536D0*SO$$

$$YNNON=.009766D0*SO$$

$$YNTRI=.005016D0*SO$$

$$YNHE2=.006384D0*SO$$

$$YUND=.007486D0*SO$$

$$YDOC=.014744D0*SO$$

$$YDOD=.009462D0*SO$$

$$YTRAN=.005472D0*SO$$

$$YTET1=.006308D0*SO$$

$$YETHY=.003952D0*SO$$

$$YTETR=.007296D0*SO$$

$$Y48D=.003306D0*SO$$

$$Y3MET=.013566D0*SO$$

$$YCYC1=.017632D0*SO$$

$$Y24D=.023598D0*SO$$

$$YCYC2=.008892D0*SO$$

YPHEN=.018506D0*SO

YGUAI=.012008D0*SO

YPETH=.014858D0*SO

Y23X=.032984D0*SO

Y4MET=.023522D0*SO

Y24X=.018848D0*SO

Y1MET=.020254D0*SO

Y13D=.015922D0*SO

YTOLU=.023712D0*SO

YPXYL=.009538D0*SO

YBENZ=.004028D0*SO

YVALE=.003380D0*SO

YWATER=.101860D0*SO

Apéndice C

Tabla 37.

Resultados completos del análisis de sensibilidad.

Row/Case	Temp [°C]	Time [h]	YCHAR	YOIL	YGAS	QEXT (kW)
1	300	1	0.5762232	0.3032754	0.1205014	1101.9272
2	300	1.2	0.5619795	0.3072693	0.1307512	1080.562
3	300	1.4	0.5477403	0.311262	0.1409977	1059.2332
4	300	1.6	0.5335058	0.3152534	0.1512408	1037.9794
5	300	1.8	0.5192758	0.3192435	0.1614806	1016.7324
6	300	2	0.5050505	0.3232323	0.1717172	995.49222
7	300	2.2	0.4977806	0.3266887	0.1755306	985.94634
8	300	2.4	0.4905295	0.3301362	0.1793342	976.42505
9	300	2.6	0.4832971	0.3335748	0.1831281	966.92831
10	300	2.8	0.4760833	0.3370046	0.1869121	957.45591
11	300	3	0.468888	0.3404255	0.1906865	948.00791
12	310	1	0.5614	0.3105402	0.1280599	1087.1911
13	310	1.2	0.5483326	0.3143153	0.1373521	1067.7818
14	310	1.4	0.5352709	0.3180888	0.1466404	1048.381
15	310	1.6	0.5222149	0.3218606	0.1559245	1028.9885
16	310	1.8	0.5091646	0.3256308	0.1652046	1009.6045
17	310	2	0.49612	0.3293994	0.1744806	990.22892
18	310	2.2	0.4893511	0.3326848	0.1779642	981.40601
19	310	2.4	0.4825987	0.3359621	0.1814392	972.6047
20	310	2.6	0.475863	0.3392314	0.1849057	963.82495
21	310	2.8	0.4691436	0.3424926	0.1883637	955.06674
22	310	3	0.4624407	0.345746	0.1918133	946.32985
23	320	1	0.5465587	0.3178138	0.1356275	1072.6569
24	320	1.2	0.5346706	0.321369	0.1439604	1055.1106
25	320	1.4	0.5227891	0.3249223	0.1522886	1037.5739
26	320	1.6	0.5109141	0.3284736	0.1606123	1020.0468
27	320	1.8	0.4990456	0.332023	0.1689314	1002.5294
28	320	2	0.4871836	0.3355705	0.1772459	985.0215
29	320	2.2	0.4809149	0.3386854	0.1803996	976.92073
30	320	2.4	0.4746608	0.3417932	0.183546	968.83875
31	320	2.6	0.4684211	0.3448937	0.1866851	960.77555
32	320	2.8	0.462196	0.3479871	0.189817	952.73097
33	320	3	0.4559852	0.3510732	0.1929416	944.70505
34	330	1	0.5316994	0.3250962	0.1432044	1058.1575

35	330	1.2	0.5209936	0.3284305	0.1505759	1042.4792
36	330	1.4	0.510295	0.3317626	0.1579425	1026.8112
37	330	1.6	0.4996034	0.3350924	0.1653042	1011.1535
38	330	1.8	0.4889189	0.3384201	0.172661	995.50625
39	330	2	0.4782415	0.3417455	0.1800129	979.86934
40	330	2.2	0.4724722	0.3446908	0.182837	972.48984
41	330	2.4	0.4667156	0.3476296	0.1856548	965.12654
42	330	2.6	0.4609716	0.3505619	0.1884664	957.7794
43	330	2.8	0.4552402	0.3534878	0.1912719	950.44836
44	330	3	0.4495214	0.3564074	0.1940713	943.13333
45	340	1	0.5168221	0.3323875	0.1507904	1043.6922
46	340	1.2	0.5073016	0.3354998	0.1571987	1029.8868
47	340	1.4	0.4977885	0.3386096	0.1636019	1016.092
48	340	1.6	0.4882828	0.341717	0.1700002	1002.308
49	340	1.8	0.4787845	0.344822	0.1763935	988.53462
50	340	2	0.4692936	0.3479246	0.1827818	974.77194
51	340	2.2	0.464023	0.3507008	0.1852762	968.11294
52	340	2.4	0.4587633	0.3534712	0.1877655	961.46773
53	340	2.6	0.4535144	0.356236	0.1902496	954.83619
54	340	2.8	0.4482764	0.358995	0.1927286	948.21828
55	340	3	0.4430492	0.3617484	0.1952024	941.6141
56	350	1	0.5019266	0.3396877	0.1583857	1029.26
57	350	1.2	0.4935944	0.3425768	0.1638288	1017.3325
58	350	1.4	0.4852697	0.3454634	0.1692669	1005.4157
59	350	1.6	0.4769524	0.3483474	0.1747003	993.5094
60	350	1.8	0.4686425	0.3512288	0.1801288	981.61374
61	350	2	0.4603399	0.3541076	0.1855524	969.72865
62	350	2.2	0.4555672	0.3567155	0.1877173	963.78935
63	350	2.4	0.4508038	0.3593182	0.189878	957.86159
64	350	2.6	0.4460496	0.3619159	0.1920345	951.94524
65	350	2.8	0.4413045	0.3645086	0.1941869	946.04041
66	350	3	0.4365687	0.3670963	0.1963351	940.14697
67	360	1	0.487013	0.3469968	0.1659903	1014.8599
68	360	1.2	0.4798721	0.3496617	0.1704662	1004.8156
69	360	1.4	0.4727385	0.352324	0.1749376	994.78133
70	360	1.6	0.465612	0.3549835	0.1794045	984.75717
71	360	1.8	0.4584926	0.3576405	0.1838669	974.7431
72	360	2	0.4513805	0.3602947	0.1883248	964.73903
73	360	2.2	0.4471049	0.3627348	0.1901603	959.51872
74	360	2.4	0.4428371	0.3651704	0.1919925	954.30779
75	360	2.6	0.4385769	0.3676017	0.1938214	949.10632

76	360	2.8	0.4343245	0.3700286	0.1956469	943.91425
77	360	3	0.4300798	0.372451	0.1974692	938.73144
78	370	1	0.4720812	0.3543147	0.1736041	1000.491
79	370	1.2	0.4661347	0.3567544	0.1771109	992.33508
80	370	1.4	0.4601949	0.3591913	0.1806138	984.18827
81	370	1.6	0.4542617	0.3616255	0.1841128	976.05057
82	370	1.8	0.4483351	0.364057	0.1876079	967.92197
83	370	2	0.4424152	0.3664858	0.1910991	959.80244
84	370	2.2	0.438636	0.3687588	0.1926052	955.30028
85	370	2.4	0.4348631	0.371028	0.1941089	950.80569
86	370	2.6	0.4310966	0.3732934	0.19561	946.31865
87	370	2.8	0.4273364	0.3755549	0.1971086	941.8392
88	370	3	0.4235825	0.3778127	0.1986047	937.36716
89	380	1	0.4571312	0.3616416	0.1812271	986.15236
90	380	1.2	0.4523821	0.3638549	0.183763	979.89014
91	380	1.4	0.4476388	0.3660655	0.1862957	973.63564
92	380	1.6	0.4429014	0.3682733	0.1888253	967.3889
93	380	1.8	0.4381698	0.3704785	0.1913517	961.14982
94	380	2	0.4334441	0.3726809	0.1938751	954.91838
95	380	2.2	0.4301605	0.3747875	0.1950521	951.13372
96	380	2.4	0.4268819	0.3768908	0.1962272	947.35492
97	380	2.6	0.4236085	0.3789909	0.1974005	943.58194
98	380	2.8	0.4203402	0.3810878	0.1985721	939.81492
99	380	3	0.4170769	0.3831813	0.1997417	936.05359
100	390	1	0.442163	0.3689774	0.1888595	971.84309
101	390	1.2	0.4386143	0.3709633	0.1904224	967.47996
102	390	1.4	0.4350704	0.3729465	0.1919832	963.12279
103	390	1.6	0.4315312	0.374927	0.1935418	958.7714
104	390	1.8	0.4279968	0.3769048	0.1950984	954.42592
105	390	2	0.4244671	0.37888	0.1966529	950.08631
106	390	2.2	0.4216784	0.3808209	0.1975008	947.01842
107	390	2.4	0.4188935	0.382759	0.1983474	943.95482
108	390	2.6	0.4161127	0.3846944	0.1991929	940.89561
109	390	2.8	0.4133358	0.386627	0.2000372	937.84084
110	390	3	0.4105629	0.3885569	0.2008802	934.7903
111	400	1	0.4271766	0.3763222	0.1965012	957.56227
112	400	1.2	0.4248313	0.3780795	0.1970892	955.10377
113	400	1.4	0.4224894	0.3798343	0.1976763	952.64886
114	400	1.6	0.420151	0.3815864	0.1982626	950.19755
115	400	1.8	0.417816	0.383336	0.198848	947.7498
116	400	2	0.4154844	0.3850831	0.1994325	945.30561

117	400	2.2	0.4131897	0.3868589	0.1999514	942.95384
118	400	2.4	0.4108979	0.3886325	0.2004696	940.60504
119	400	2.6	0.4086091	0.3904038	0.2009871	938.25935
120	400	2.8	0.4063233	0.3921727	0.201504	935.91662
121	400	3	0.4040404	0.3939394	0.2020202	933.577
122	410	1	0.4217994	0.3780949	0.2001057	954.94914
123	410	1.2	0.4195244	0.3799083	0.2005672	952.67104
124	410	1.4	0.4172521	0.3817197	0.2010282	950.39556
125	410	1.6	0.4149824	0.383529	0.2014887	948.12271
126	410	1.8	0.4127153	0.3853361	0.2019486	945.85247
127	410	2	0.4104508	0.3871412	0.202408	943.58485
128	410	2.2	0.4079731	0.3889317	0.2030952	940.92743
129	410	2.4	0.4054984	0.3907199	0.2037817	938.27324
130	410	2.6	0.4030267	0.392506	0.2044673	935.62234
131	410	2.8	0.4005581	0.3942899	0.2051521	932.97454
132	410	3	0.3980924	0.3960716	0.205836	930.32999
133	420	1	0.4164297	0.3798651	0.2037052	952.38397
134	420	1.2	0.4142233	0.3817352	0.2040415	950.28419
135	420	1.4	0.4120188	0.3836037	0.2043775	948.18618
136	420	1.6	0.4098161	0.3854706	0.2047133	946.08994
137	420	1.8	0.4076153	0.3873359	0.2050488	943.99547
138	420	2	0.4054164	0.3891997	0.2053839	941.90277
139	420	2.2	0.4027553	0.3910049	0.2062399	938.9388
140	420	2.4	0.4000972	0.392808	0.2070948	935.9782
141	420	2.6	0.3974421	0.394609	0.2079488	933.02099
142	420	2.8	0.3947901	0.3964081	0.2088019	930.0671
143	420	3	0.392141	0.398205	0.2096539	927.11654
144	430	1	0.4110674	0.3816329	0.2072997	949.866
145	430	1.2	0.4089278	0.3835601	0.2075121	947.94248
146	430	1.4	0.4067894	0.3854862	0.2077243	946.01998
147	430	1.6	0.4046522	0.3874114	0.2079365	944.09853
148	430	1.8	0.4025161	0.3893355	0.2081485	942.17811
149	430	2	0.4003811	0.3912585	0.2083604	940.25872
150	430	2.2	0.3975362	0.3930786	0.2093853	936.9872
151	430	2.4	0.3946942	0.3948967	0.2104091	933.71924
152	430	2.6	0.3918552	0.396713	0.2114318	930.45464
153	430	2.8	0.3890193	0.3985273	0.2124535	927.19343
154	430	3	0.3861863	0.4003397	0.2134741	923.93572
155	440	1	0.4057124	0.3833982	0.2108893	947.39447
156	440	1.2	0.403638	0.385383	0.210979	945.64516
157	440	1.4	0.4015641	0.3873674	0.2110686	943.89625

158	440	1.6	0.3994906	0.3893512	0.2111582	942.14773
159	440	1.8	0.3974176	0.3913347	0.2112477	940.39961
160	440	2	0.3953451	0.3933177	0.2113373	938.65188
161	440	2.2	0.3923158	0.3951528	0.2125314	935.07195
162	440	2.4	0.3892895	0.3969861	0.2137244	931.49547
163	440	2.6	0.3862661	0.3988177	0.2149162	927.92246
164	440	2.8	0.3832457	0.4006475	0.2161068	924.35297
165	440	3	0.3802281	0.4024755	0.2172963	920.78691
166	450	1	0.4003649	0.3851612	0.214474	944.96865
167	450	1.2	0.3983539	0.387204	0.2144421	943.39152
168	450	1.4	0.3963427	0.3892471	0.2144103	941.81426
169	450	1.6	0.3943314	0.3912902	0.2143784	940.23692
170	450	1.8	0.3923199	0.3933336	0.2143465	938.65936
171	450	2	0.3903082	0.3953771	0.2143147	937.08172
172	450	2.2	0.3870942	0.3972275	0.2156783	933.19233
173	450	2.4	0.383883	0.3990763	0.2170408	929.30638
174	450	2.6	0.3806747	0.4009233	0.218402	925.42394
175	450	2.8	0.3774692	0.4027688	0.219762	921.5449
176	450	3	0.3742666	0.4046126	0.2211208	917.66937
177	460	1	0.3950247	0.3869216	0.2180536	942.58779
178	460	1.2	0.3930754	0.3890231	0.2179015	941.18084
179	460	1.4	0.3911253	0.3911253	0.2177494	939.77333
180	460	1.6	0.3891745	0.3932284	0.2175972	938.36528
181	460	1.8	0.3872229	0.3953322	0.2174449	936.9567
182	460	2	0.3852705	0.3974369	0.2172926	935.54756
183	460	2.2	0.3818713	0.3993027	0.218826	931.34768
184	460	2.4	0.3784748	0.401167	0.2203582	927.15121
185	460	2.6	0.375081	0.4030298	0.2218892	922.95814
186	460	2.8	0.37169	0.4048911	0.2234189	918.76853
187	460	3	0.3683018	0.4067509	0.2249474	914.58221
188	470	1	0.3896919	0.3886797	0.2216284	940.25119
189	470	1.2	0.3878025	0.3908402	0.2213573	939.01242
190	470	1.4	0.3859119	0.3930021	0.221086	937.77278
191	470	1.6	0.3840199	0.3951656	0.2208145	936.53228
192	470	1.8	0.3821266	0.3973306	0.2205428	935.2909
193	470	2	0.380232	0.3994971	0.2202709	934.04866
194	470	2.2	0.3766471	0.4013785	0.2219745	929.53739
195	470	2.4	0.3730648	0.4032585	0.2236767	925.02937
196	470	2.6	0.3694851	0.4051371	0.2253778	920.52459
197	470	2.8	0.365908	0.4070144	0.2270776	916.02315
198	470	3	0.3623335	0.4088903	0.2287762	911.52497

199	480	1	0.3843664	0.3904353	0.2251983	937.95819
200	480	1.2	0.3825353	0.3926553	0.2248093	936.88561
201	480	1.4	0.3807024	0.3948775	0.22442	935.81197
202	480	1.6	0.3788677	0.397102	0.2240303	934.73723
203	480	1.8	0.3770311	0.3993286	0.2236403	933.66143
204	480	2	0.3751927	0.4015576	0.2232498	932.58457
205	480	2.2	0.3714216	0.4034547	0.2251237	927.76076
206	480	2.4	0.367653	0.4053506	0.2269964	922.94007
207	480	2.6	0.3638869	0.4072453	0.2288678	918.12256
208	480	2.8	0.3601231	0.4091388	0.2307381	913.30816
209	480	3	0.3563619	0.411031	0.2326071	908.49682
210	490	1	0.3790482	0.3921886	0.2287632	935.70797
211	490	1.2	0.3772738	0.3944685	0.2282577	934.79965
212	490	1.4	0.375497	0.3967515	0.2277516	933.89013
213	490	1.6	0.3737178	0.3990374	0.2272447	932.9794
214	490	1.8	0.3719363	0.4013264	0.2267373	932.06748
215	490	2	0.3701525	0.4036184	0.2262291	931.15443
216	490	2.2	0.3661949	0.4055314	0.2282737	926.01711
217	490	2.4	0.3622395	0.4074434	0.230317	920.88273
218	490	2.6	0.3582864	0.4093544	0.2323593	915.75125
219	490	2.8	0.3543355	0.4112642	0.2344003	910.62277
220	490	3	0.3503868	0.4131729	0.2364402	905.49707
221	500	1	0.3737374	0.3939394	0.2323232	933.49992
222	500	1.2	0.3720178	0.3962798	0.2317024	932.75393
223	500	1.4	0.3702954	0.398624	0.2310805	932.00665
224	500	1.6	0.3685703	0.4009721	0.2304577	931.25821
225	500	1.8	0.3668423	0.4033239	0.2298338	930.50855
226	500	2	0.3651116	0.4056795	0.2292089	929.75762
227	500	2.2	0.3609669	0.4076087	0.2314244	924.30582
228	500	2.4	0.3568243	0.4095369	0.2336388	918.85663
229	500	2.6	0.3526836	0.4114642	0.2358521	913.41011
230	500	2.8	0.348545	0.4133906	0.2380644	907.96625
231	500	3	0.3444084	0.415316	0.2402755	902.52505
232	510	1	0.3707071	0.3929293	0.2363636	932.64336
233	510	1.2	0.3688127	0.3953009	0.2358864	931.62357
234	510	1.4	0.3669149	0.3976767	0.2354084	930.60201
235	510	1.6	0.3650138	0.4000567	0.2349295	929.5786
236	510	1.8	0.3631092	0.402441	0.2344498	928.55337
237	510	2	0.3612013	0.4048295	0.2339692	927.5262
238	510	2.2	0.3572008	0.4066937	0.2361055	922.26716
239	510	2.4	0.3532036	0.4085564	0.2382401	917.01238

240	510	2.6	0.3492096	0.4104175	0.2403729	911.76186
241	510	2.8	0.3452188	0.4122771	0.2425041	906.51563
242	510	3	0.3412313	0.4141353	0.2446335	901.27358
243	520	1	0.3676768	0.3919192	0.240404	931.80415
244	520	1.2	0.3656071	0.3943218	0.2400712	930.50932
245	520	1.4	0.3635333	0.396729	0.2397377	929.212
246	520	1.6	0.3614555	0.3991409	0.2394035	927.9121
247	520	1.8	0.3593737	0.4015576	0.2390687	926.60972
248	520	2	0.3572879	0.4039789	0.2387333	925.30472
249	520	2.2	0.3534329	0.4057783	0.2407888	920.24102
250	520	2.4	0.3495823	0.4075756	0.2428421	915.18301
251	520	2.6	0.3457361	0.4093709	0.244893	910.13077
252	520	2.8	0.3418942	0.4111642	0.2469416	905.08426
253	520	3	0.3380567	0.4129555	0.2489879	900.04347
254	530	1	0.3646465	0.3909091	0.2444444	930.98143
255	530	1.2	0.3624009	0.3933425	0.2442566	929.41025
256	530	1.4	0.3601506	0.395781	0.2440683	927.83576
257	530	1.6	0.3578956	0.3982247	0.2438797	926.25793
258	530	1.8	0.3556358	0.4006735	0.2436907	924.67677
259	530	2	0.3533712	0.4031275	0.2435012	923.09227
260	530	2.2	0.3496631	0.4048624	0.2454745	918.22644
261	530	2.4	0.3459604	0.4065947	0.2474448	913.36767
262	530	2.6	0.3422631	0.4083246	0.2494123	908.516
263	530	2.8	0.3385712	0.4100518	0.251377	903.6714
264	530	3	0.3348847	0.4117766	0.2533387	898.83391
265	540	1	0.3616162	0.389899	0.2484848	930.1745
266	540	1.2	0.3591942	0.3923631	0.2484427	928.32565
267	540	1.4	0.3567668	0.3948328	0.2484004	926.47257
268	540	1.6	0.3543339	0.397308	0.2483581	924.61532
269	540	1.8	0.3518954	0.3997889	0.2483156	922.75384
270	540	2	0.3494514	0.4022755	0.2482731	920.88803
271	540	2.2	0.3458915	0.4039461	0.2501624	916.22262
272	540	2.4	0.342338	0.4056137	0.2520483	911.56556
273	540	2.6	0.3387907	0.4072783	0.2539309	906.91675
274	540	2.8	0.3352498	0.40894	0.2558102	902.27625
275	540	3	0.3317152	0.4105987	0.2576861	897.64406
276	550	1	0.3585859	0.3888889	0.2525253	929.3827
277	550	1.2	0.3559871	0.3913835	0.2526295	927.25483
278	550	1.4	0.3533819	0.3938842	0.2527339	925.12176
279	550	1.6	0.3507705	0.3963909	0.2528386	922.98351
280	550	1.8	0.3481527	0.3989038	0.2529436	920.84007

281	550	2	0.3455285	0.4014228	0.2530488	918.69132
282	550	2.2	0.3421181	0.4030293	0.2548526	914.22894
283	550	2.4	0.3387149	0.4046325	0.2566526	909.77598
284	550	2.6	0.3353189	0.4062323	0.2584488	905.3324
285	550	2.8	0.3319301	0.4078287	0.2602413	900.89814
286	550	3	0.3285483	0.4094218	0.2620299	896.47323
287	560	1	0.3555556	0.3878788	0.2565657	928.60516
288	560	1.2	0.3527794	0.3904038	0.2568169	926.19688
289	560	1.4	0.3499959	0.3929353	0.2570688	923.78243
290	560	1.6	0.3472053	0.3954734	0.2573213	921.36166
291	560	1.8	0.3444074	0.398018	0.2575745	918.93461
292	560	2	0.3416023	0.4005693	0.2578284	916.50118
293	560	2.2	0.3383428	0.4021121	0.2595451	912.24442
294	560	2.4	0.3350913	0.4036511	0.2612576	907.99808
295	560	2.6	0.3318477	0.4051864	0.262966	903.76197
296	560	2.8	0.3286119	0.4067179	0.2646702	899.53621
297	560	3	0.325384	0.4082458	0.2663703	895.32068
298	570	1	0.3525253	0.3868687	0.2606061	927.84118
299	570	1.2	0.3495711	0.3894239	0.261005	925.15122
300	570	1.4	0.3466089	0.3919861	0.2614051	922.45385
301	570	1.6	0.3436384	0.3945553	0.2618062	919.74901
302	570	1.8	0.3406598	0.3971317	0.2622085	917.03678
303	570	2	0.3376729	0.3997152	0.2626119	914.31692
304	570	2.2	0.3345657	0.4011944	0.2642399	910.26843
305	570	2.4	0.3314671	0.4026696	0.2658634	906.2311
306	570	2.6	0.328377	0.4041407	0.2674824	902.20491
307	570	2.8	0.3252954	0.4056077	0.2690969	898.18978
308	570	3	0.3222222	0.4070707	0.2707071	894.18569
309	580	1	0.3494949	0.3858586	0.2646465	927.09021
310	580	1.2	0.3463624	0.3884438	0.2651938	924.11714
311	580	1.4	0.3432207	0.3910366	0.2657428	921.13548
312	580	1.6	0.3400698	0.3936369	0.2662933	918.14506
313	580	1.8	0.3369097	0.3962448	0.2668455	915.14585
314	580	2	0.3337403	0.3988604	0.2673993	912.1378
315	580	2.2	0.3307867	0.4002763	0.2689369	908.30024
316	580	2.4	0.3278422	0.4016879	0.2704699	904.47445
317	580	2.6	0.3249068	0.4030951	0.2719981	900.66047
318	580	2.8	0.3219804	0.404498	0.2735216	896.85827
319	580	3	0.319063	0.4058966	0.2750404	893.06765
320	590	1	0.3464646	0.3848485	0.2686869	926.35137
321	590	1.2	0.3431531	0.3874636	0.2693833	923.09385

322	590	1.4	0.3398314	0.3900867	0.2700819	919.82632
323	590	1.6	0.3364994	0.392718	0.2707826	916.54873
324	590	1.8	0.3331572	0.3953573	0.2714855	913.261
325	590	2	0.3298046	0.3980049	0.2721906	909.96296
326	590	2.2	0.3270059	0.3993578	0.2736363	906.33893
327	590	2.4	0.3242168	0.4007061	0.2750771	902.72727
328	590	2.6	0.3214373	0.4020497	0.276513	899.12788
329	590	2.8	0.3186671	0.4033889	0.277944	895.54072
330	590	3	0.3159063	0.4047235	0.2793702	891.96567
331	600	1	0.3434343	0.3838384	0.2727273	925.62403
332	600	1.2	0.3399433	0.3864832	0.2735735	922.0807
333	600	1.4	0.336441	0.3891366	0.2744224	918.52581
334	600	1.6	0.3329273	0.3917986	0.2752741	914.95946
335	600	1.8	0.3294022	0.3944693	0.2761285	911.38141
336	600	2	0.3258656	0.3971487	0.2769857	907.79174
337	600	2.2	0.3232233	0.3984388	0.2783379	904.3839
338	600	2.4	0.3205909	0.399724	0.2796851	900.98884
339	600	2.6	0.3179682	0.4010045	0.2810272	897.60638
340	600	2.8	0.3153554	0.4022803	0.2823644	894.23656
341	600	3	0.3127522	0.4035513	0.2836965	890.87924