

Recibido: 15-09-2025 | Aceptado: 17-03-2026 | Publicado: 06-04-2026

Perspectivas exergéticas sobre la licuefacción hidrotérmica de microalgas: un estudio de caso con *Chlorella sp*

Exergy Insights into Hydrothermal Liquefaction of Microalgae: A Case Study with Chlorella sp.

DOI <https://doi.org/10.21803/ingecana.6.6.976>

Eduardo Andres Aguilar Vasquez

<https://orcid.org/0000-0003-1744-1622>

Ingeniero Químico. Asistente de investigación. Universidad de Cartagena. Cartagena (Colombia). eaguilarv@unicartagena.edu.co

Ángel Darío González-Delgado

<https://orcid.org/0000-0001-8100-8888>

Doctor en Ingeniería. Docente e investigador senior en la Universidad de Cartagena. Cartagena (Colombia). agonzalezd1@unicartagena.edu.co

Resumen

Introducción: Recientemente, las microalgas se han destacado como un biomaterial prometedor para la producción de biocombustibles; sin embargo, la licuefacción hidrotérmica (HTL), pese a su eficiencia, enfrenta desafíos técnicos a escala industrial, especialmente por su alto consumo energético, lo que limita su viabilidad y comercialización. **Objetivo:** En este trabajo se realizó un análisis exergético del proceso de producción de biocrudo a partir de algas húmedas mediante licuefacción hidrotérmica (HTL) utilizando Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (CAPE) con el fin de evaluar el desempeño energético, identificar irreversibilidades y proponer mejoras al proceso. **Método:** Se realizó un análisis exergético del proceso a partir de datos operativos y balances extendidos de masa y energía, determinando la exergía física y química de cada corriente, así como la asociada a los servicios industriales. Con base en el balance exergético, se evaluaron la eficiencia global del proceso y las eficiencias locales de cada etapa, identificando puntos críticos de bajo desempeño. Asimismo, se aplicó un análisis de resiliencia exergética para proponer mejoras en las unidades con desempeño deficiente. **Resultados:** Los resultados mostraron una eficiencia global del 24%, indicando un desempeño bajo, con irreversibilidades totales de 111.000 MJ/h, principalmente por pérdidas de calor y cambios químicos (83%). La mayoría de las etapas fueron eficientes (>85%), excepto el enfriamiento de biocrudo (9%). El análisis de resiliencia reveló que la eficiencia podría aumentar hasta 84% si se valorizan integralmente los residuos del proceso, incluyendo gas residual, biochar y aguas residuales, optimizando el uso de exergía y reduciendo impactos ambientales potenciales. Se identificó además la oportunidad de aplicar integración energética para aprovechar el calor de las corrientes calientes. **Conclusiones:** El análisis evidenció que el proceso HTL requiere optimizaciones significativas para ser termodinámicamente viable en la producción de biocombustibles. Asimismo, es necesario incorporar la etapa de refinación para una evaluación integral del desempeño, y la adopción de un enfoque de biorrefinería podría aportar beneficios técnicos relevantes al proceso.

Palabras clave: Biocrudo, Bioenergía, Exergía, Licuefacción hidrotérmica, Microalga.

Abstract

Introduction: Recently, microalgae have emerged as a promising biomaterial for biofuel production; however, despite its efficiency, hydrothermal liquefaction (HTL) faces significant technical challenges at the industrial scale, particularly due to its high energy demand, which limits its viability and commercialization. **Objective:** This study conducted an exergy analysis of the biocrude production process from wet algae via hydrothermal liquefaction (HTL) using Computer-Aided Process Engineering (CAPE) tools, with the aim of evaluating energy performance, identifying irreversibilities, and proposing process improvements. **Method:** The exergy analysis was performed based on operational data and extended mass and energy balances, determining the physical and chemical exergy of each process stream, as well as the exergy associated with industrial utilities. From the exergy balance, the overall process efficiency and the local efficiencies of each unit were evaluated, allowing the identification of low-performance critical points. Additionally, an exergy resilience analysis was applied to propose improvements for underperforming units. **Results:** The results showed an overall exergy efficiency of 24%, indicating poor performance, with total irreversibilities of 111,000 MJ/h, mainly due to heat losses and chemical transformations (83%). Most process units exhibited high efficiencies (>85%), except for the biocrude cooling stage, which showed a critical efficiency of 9%. The resilience analysis indicated that overall efficiency could increase up to 84% through the integrated valorization of process residues—including residual gas, biochar, and wastewater—optimizing exergy use and reducing potential environmental impacts. Furthermore, energy integration was identified as a key strategy to recover heat from hot process streams. **Conclusions:** The analysis demonstrated that the HTL process requires significant optimizations to become thermodynamically viable for biofuel production. In addition, incorporating the refining stage is necessary for a comprehensive assessment of process performance, and adopting a biorefinery approach could provide substantial technical benefits.

Keywords: Biocrude, Bioenergy, Exergy, Hydrothermal liquefaction (HTL), Microalgae.

Cómo citar este artículo:

E. A. Aguilar Vasquez & A. D. González Delgado, «Perspectivas exergéticas sobre la licuefacción hidrotérmica de microalgas: un estudio de caso con *Chlorella sp*». *Ingente Americana*, vol. 6, n°6, e-976, 2026. DOI: <https://doi.org/10.21803/ingecana.6.6.976>



I. Introducción

Los combustibles fósiles han sido un recurso clave para satisfacer las necesidades energéticas del mundo, sea el petróleo, carbón o gas natural, son utilizados en la vida cotidiana de comunidades, como insumos industriales y en el transporte, entre otros [1]. Sin embargo, la dependencia excesiva de estos recursos ha impactado directamente en el medio ambiente y en los recursos naturales debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, provocando deterioro ambiental, así como afectaciones a la salud pública y a la biodiversidad [2]. Además, el rápido crecimiento de la población humana, junto con el aumento de las actividades económicas, ha provocado un incremento en la demanda y los precios internacionales de la energía [3]. En este contexto, existe un creciente interés en mejorar la gestión energética (eficiencia) bajo un enfoque de desarrollo sostenible, con el fin de mitigar las emisiones de GEI y, al mismo tiempo, incrementar la disponibilidad de energía renovable. Por esta razón, los biocombustibles se presentan como una excelente fuente alternativa de energía, gracias a su menor huella ambiental y origen biológico; factores que resultan fundamentales para descarbonizar la economía y fortalecer la autosuficiencia energética de las naciones [4].

El término biocombustible abarca todo combustible obtenido a partir de materia biológica y presenta un proceso de producción y una velocidad de reposición diferentes a los de origen fósil [5]. Los biocombustibles se clasifican según su naturaleza y propieda-

des químicas, el tipo de materia prima y los procesos de conversión (tecnologías). Se conocen diversos productos de biocombustible en distintos estados físicos, incluyendo líquidos (bioetanol, biodiésel), gaseosos (biogás, gas de síntesis) y sólidos (biocombustible sólido densificado), entre otros [6]. Según el material de partida, los biocombustibles se dividen en primera, segunda, tercera y cuarta generación. Actualmente, la producción de biocombustibles depende en gran medida de biomasa de primera y segunda generación como fuente de alimentación; sin embargo, la principal desventaja de estas materias primas es que ponen en riesgo la seguridad alimentaria (de manera directa o indirecta), afectan el uso del suelo, los ciclos de nitrógeno y fósforo, y las tasas de extracción global de agua dulce [7]. Las materias primas de tercera generación, a diferencia de las de segunda, no compiten en la cadena de valor de los recursos destinados a la alimentación humana o animal (principal ventaja), teniendo a las algas como precursor biológico principal (en menor medida, microorganismos fotosintéticos). Esta biomasa ha ganado interés debido a su rápida capacidad de producción y su versatilidad como plataforma para obtener múltiples productos finales —biobutanol, bioetanol, biocombustibles, biogás y bioenergía— mediante procesos bioquímicos y termoquímicos [8].

Como se indicó anteriormente, las algas son organismos fotosintéticos que crecen en hábitats terrestres y acuáticos. Se caracterizan por su rápido crecimiento y su ubicuidad, sin estar limitadas por la ubicación geográfica, el relieve o las características

del suelo [9]. Debido a su diversa composición, pueden obtenerse múltiples bioproductos de gran valor económico e industrial, incluidos bioetanol, biobutanol, biocombustibles, bioenergía, biogás, biocarbón, fertilizantes, pigmentos, antioxidantes, vitaminas, entre otros [10]. Estos organismos pueden clasificarse según su tamaño en microalgas y macroalgas. Ambas son organismos fotosintéticos marinos con apariencia similar a plantas; las microalgas son organismos microscópicos unicelulares, mientras que las macroalgas son organismos multicelulares visibles a simple vista [3]. Las microalgas poseen una amplia diversidad genética y pueden existir como plantas unicelulares, colonias o filamentos extensos; normalmente se encuentran en sistemas de agua dulce y marina, con tamaños en el rango de micrómetros. Convierten la luz solar, el agua y el dióxido de carbono en biomasa rica en lípidos, proteínas, carbohidratos (celulosa y almidón) y compuestos bioactivos [11]. El uso de microalgas para la producción de biocombustibles ha demostrado ser prometedor, no solo por su rica composición química (materia prima), sino también por varias razones técnicas [12]. En primer lugar, pueden crecer en la mayor variedad posible de condiciones, utilizando como sustrato efluentes generados por industrias, municipios y actividades agrícolas. Su estructura celular más simple y su alta superficie específica les permiten acceder de manera más eficiente al agua, al CO_2 y a otros nutrientes [13], logrando una mayor eficiencia fotosintética, mayores tasas de crecimiento, rendimientos específicos por área más altos y una mejor mitigación de CO_2 [14].

También se han desarrollado diversas tecnologías de conversión para transformar estas biomásas, como las rutas termoquímicas para producir biocombustibles, entre ellas la torrefacción, pirólisis, gasificación, licuefacción y la carbonización [15]. Entre ellas, la licuefacción hidrotérmica es una tecnología novedosa que convierte la biomasa en combustibles líquidos (biocrudo) a altas temperaturas y por encima de la presión de saturación del agua [16]. Las condiciones típicas de operación son temperaturas entre 200 y 500 °C y presiones de 5 a 30 MPa [17].

Bajo estas condiciones, las macromoléculas (incluyendo lípidos, proteínas y carbohidratos) sufren una serie de reacciones que incluyen despolimerización, deshidratación, desaminación, descarboxilación, isomerización y polimerización [18]. Estas reacciones generan una corriente de producto con tres fases: líquida, sólida y gaseosa, que posteriormente son separadas del producto principal y descartadas. El biocrudo obtenido mediante este proceso es un líquido orgánico pesado con un contenido relativamente alto de oxígeno, que se somete a un tratamiento de hidrogenación en la etapa de hidrotreamiento para producir combustibles convencionales de hidrocarburos [19]. Este proceso es relativamente más eficiente que el pirólisis para convertir biomasa en combustibles líquidos y, además, permite procesar materiales húmedos sin necesidad de secado (requiriendo menos energía) y acceder a condiciones de reacción iónica al mantener un medio acuoso líquido durante el procesamiento [20].

A pesar de las ventajas potenciales del proceso de licuefacción hidrotérmica (HTL) para producir biocombustibles, deben considerarse varios desafíos técnicos que dificultan su comercialización. Entre ellos, el elevado consumo de energía requerido para operar en condiciones de alta presión y temperatura, lo que se traduce en altos costos de capital y operación, costosos sistemas de seguridad y un impacto ambiental significativo (entre el 60 y el 80% de los impactos) [21], [22]. Por lo tanto, la aplicación del análisis exergético proporciona un diagnóstico integral del desempeño energético del proceso, desglosando los diferentes flujos exergéticos que entran y salen del sistema [23]. Este análisis permite evaluar el aprovechamiento de los recursos energéticos, identificando las áreas de ineficiencia (distribución de pérdidas y residuos) y estableciendo referencias para posibles mejoras [24]. Esta información facilita la toma de decisiones al indicar cómo asignar esfuerzos y recursos, maximizando la eficiencia y reduciendo los costos y el impacto ambiental asociados a la compensación de la exergía perdida y al mantenimiento de un suministro energético estable.

Los estudios de exergía han mostrado que la eficiencia exergética global del proceso HTL se encuentra en un rango entre 20 al 96%, atribuida a varios parámetros como el diseño y la configuración del proceso, la materia prima (cultivar) y la metodología utilizada [25]. Sin embargo, existe una brecha de conocimiento respecto a qué unidades impactan el desempeño del proceso y cómo este podría mejorar si ciertas variables se modifican u optimizan. Por ende, en este trabajo se analiza el desempeño energético de un proceso de producción de biocrudo a partir de *Chlorella sp.* mediante un análisis exergético. La metodología cuantifica las irreversibilidades totales, la exergía proveniente de los servicios auxiliares, la exergía de los residuos generados y la eficiencia exergética global de todo el proceso y de sus unidades. Además, se realiza un análisis de resiliencia de la eficiencia exergética basado en las unidades con desempeño deficiente, con el fin de identificar mejoras potenciales que puedan conducir a un mayor rendimiento. Finalmente, este trabajo busca generar conocimiento que contribuya al diseño de procesos que utilicen los recursos de manera eficiente y a mínimo costo, para producir biocombustibles que cumplan con los objetivos de combatir el cambio climático y promover una transición energética efectiva.

II. MÉTODO O METODOLOGÍA

Descripción del proceso HTL

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del proceso para la obtención de biocrudo a partir de biomasa algal húmeda mediante licuefacción hidrotermal. El proceso analizado para la producción de biocrudo tiene una capacidad de 87.600 t/año de microalgas *Chlorella sp.* La alimentación del proceso proviene de un cultivo con un caudal de salida de 3,5 toneladas de lodo de microalgas por hora, con una concentración de 3 g/L por tonelada de lodo producida por hora en condiciones ambientales [26]. Inicialmente, las algas cultivadas ingresan a la etapa de centrifugación, donde se retira parte del agua. En esta corriente, la concen-

tración de algas aumenta de 3 g de sólidos por litro de agua a aproximadamente 10 g/L. Esta condición es necesaria para el siguiente proceso: el reactor de HTL. La corriente concentrada ingresa al reactor de HTL, donde los componentes de las algas (aminoácidos, lípidos, ácidos grasos, triglicéridos, carbohidratos), ricos en carbono e hidrógeno, se transforman en biocrudo. Esta descomposición se lleva a cabo mediante diversas reacciones bajo condiciones de temperatura y presión de 648,15 K y 177 atm, respectivamente. Al finalizar este proceso, se obtiene biocrudo impuro (que contiene sólidos) y una corriente gaseosa compuesta principalmente por vapor de agua (70%).

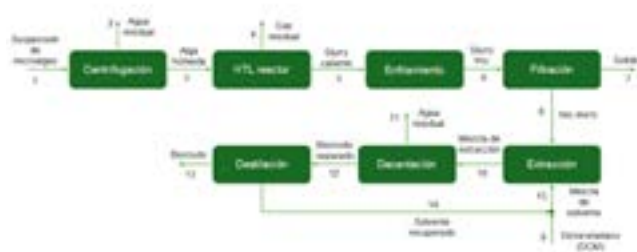


Fig. 1. Diagrama de bloques del proceso para la obtención de biocrudo a partir de *Chlorella sp.* mediante HTL.

La mezcla resultante se enfría mediante un intercambiador de calor hasta aproximadamente 298,15 K antes de ingresar a las etapas posteriores del proceso. Esta corriente enfriada se filtra para separar los componentes sólidos presentes en la corriente de biocrudo producido —principalmente biochar y cenizas— utilizando una prensa de filtrado con una potencia nominal de 5,5 kW. Inmediatamente después, en la etapa de extracción, el biocrudo entra en contacto con un agente selectivo, en este caso diclorometano (DCM), para facilitar su extracción mediante la formación de una fase inmiscible. Posteriormente, el biocrudo junto con el disolvente se separa de la fase acuosa por decantación, debido a la diferencia de densidades, generando como residuo un efluente acuoso. Finalmente, en la etapa de destilación, el biocrudo extraído se separa del disolvente, considerando el bajo punto de ebullición del DCM, que es de 334,15 K. Esto permite recuperar

el disolvente para su posterior reutilización en la etapa de extracción. El biocrudo obtenido en esta etapa debe someterse a un proceso de mejoramiento (hidrotratamiento y craqueo catalítico) para producir derivados como gasolina, diésel, entre otros.

Caracterización de la materia prima y del producto final

Para este trabajo, la composición de microalgas asumida en esta investigación (*Chlorella sp.*), así como la del producto obtenido (biocrudo), se presentan en la Tabla 1, con base en los datos reportados por Peralta-Ruiz et al. (2013) [27] y Biller et al. (2015) [26]. La caracterización de los componentes presentes se realizó en base a su porcentaje en peso. En el caso de las microalgas, el agua se consideró como un compuesto externo. Para el biocrudo, la composición se determinó según la proporción de los elementos básicos presentes.

TABLA I
COMPOSICIÓN DE LAS MICROALGAS Y DEL BIOCRUDO CONSIDERADA PARA ESTE TRABAJO.

Material	Componente	Composición (peso/peso%)
<i>Chlorella sp.</i>	Ácido Aspártico	4,49
	Ácido Glutámico	5,47
	Lisina	7,15
	Prolina	5,05
	Leucina	4,28
	Valina	3,86
	Anilina	5,4
	Glicina	4,35
	Celulosa	7,1
	Lignina	6,55
	Hemicelulosa	16,3
	Ácido Mirístico	0,14
	Ácido palmítico	0,38
	Ácido Palmítico	0,18
Ácido esteárico	0,15	

	Ácido Oleico	0,08
	Ácido Linoleico	0,6
	Trimiristina	2,56
	Tripalmitina	7,15
	Tripalmetoleina	3,42
	Triestearina	2,82
	Trioleina	1,42
Biocrudo	Oxígeno	14,9
	Nitrógeno	6,5
	Carbono	68,9
	Azufre	0,8
	Hidrógeno	8,9

Análisis exergético de procesos químicos

El análisis exergético es una técnica de análisis termodinámico basada en la segunda ley de la termodinámica, mediante la cual se evalúa el desempeño, la eficiencia y el comportamiento de un proceso o sistema a partir de su capacidad para conservar su energía útil [28]. La exergía se define como una medida del potencial real (máximo) de un sistema para realizar trabajo, obtenida a partir de la interacción (diferencia) entre un sistema termodinámico y un entorno de referencia estable [29]. Para llevar a cabo un análisis exergético, es necesario definir el entorno que funcionará como estado de referencia, que para este trabajo es de 298,15 K y 1 atm. A diferencia de la energía, la exergía puede perderse como material o calor liberado al ambiente, y puede destruirse parcial o totalmente debido a las irreversibilidades ocasionadas por ineficiencias del proceso [30]. La cuantificación de estas pérdidas y de la destrucción de exergía proporciona una medida cuantitativa de la calidad de la energía, identificando los puntos o unidades operacionales ineficientes y su contribución con respecto a las pérdidas totales [31]. Al mismo tiempo, permite identificar oportunidades en las que la exergía desperdiciada puede valorizarse a partir de subproductos y pérdidas de calor [32].

El análisis exergético se basa en un balance, en el cual se mide el flujo de exergía que entra y sale de un

proceso, transportado por los flujos de materia y el flujo de energía. Para el proceso de microalgas y sus unidades, se propone un balance de exergía en estado estacionario, descrito por la siguiente ecuación (1):

$$\dot{E}x_{destroyed} = \dot{E}x_{mass-net} + \dot{E}x_{heat} + \dot{E}x_{work} \quad (1)$$

Donde $\dot{E}x_{mass}$ es el flujo total de exergía perdida, $\dot{E}x_{mass-net}$ es el flujo neto total de exergía asociado a la masa, $\dot{E}x_{heat}$ es la exergía total correspondiente al flujo de calor transferido, y $\dot{E}x_{work}$ es la exergía total correspondiente al flujo de trabajo [33].

$$\dot{E}x_{mass} = \dot{E}x_{phy} + \dot{E}x_{chem} + \dot{E}x_{pot} + \dot{E}x_{kin} \quad (2)$$

La exergía total de una corriente es la suma de la contribución de los diferentes tipos de energía: exergía cinética, exergía potencial, exergía química y exergía física [34].

$$\dot{E}x_{mass} = \dot{E}x_{phy} + \dot{E}x_{chem} \quad (3)$$

Para los procesos químicos, tanto la energía cinética como la energía potencial de las corrientes se consideran despreciables debido a su contribución insignificante en comparación con la exergía química y la exergía física. Por ello, la expresión anterior se simplifica a la siguiente forma (3):

La exergía química se refiere al máximo trabajo útil teórico que puede obtenerse cuando un sistema pasa de su condición de referencia ambiental a un estado de equilibrio termodinámico, determinado por reacciones químicas entre reactivos y productos mantenidos a temperatura y presión ambientales. Esto se debe a las alteraciones en la composición química de las sustancias involucradas [35]. Para el cálculo de la exergía química de una corriente (mezcla), se emplea la ecuación 5.

$$\dot{E}x_{chem-mix} = \sum_i \square y_i \cdot Ex_{chem-j} + RT_0 \sum_i \square y_i \cdot \ln(y_i) \quad (4)$$

donde Ex_{chem-j} es la exergía química estándar de un compuesto, R es la constante de los gases ideales, T_0 es la temperatura de referencia, y y_i es la fracción en composición de cada sustancia en la mezcla. Estas exergías químicas estándar pueden encontrarse en estudios publicados o en la literatura para algunos compuestos seleccionados. Sin embargo, para ciertos compuestos no existe información disponible, por lo que su exergía química debe calcularse utilizando la ecuación (4).

$$\dot{E}x_{chem-j} = \Delta G_f^0 + \sum_j \square V_j Ex_{chem-j}^0 \quad (5)$$

Donde Ex_{chem-j}^0 es la exergía química específica de cada elemento presente en el compuesto, ΔG_f^0 es la energía libre de Gibbs estándar de formación del compuesto, y V_j es el número de átomos de cada elemento contenido en el componente.

Por otro lado, la exergía física $\dot{E}x_{phy}$ es el máximo trabajo útil que puede extraerse por unidad de masa de una sustancia al pasar de un estado específico (T, P) al estado de referencia (T_0, P_0) mediante procesos puramente físicos. Esta puede determinarse utilizando los valores de entalpía y entropía de la corriente en ambos estados [36] (6).

$$\dot{E}x_{phy} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (6)$$

Esta exergía dependerá del estado de agregación en el que se encuentre una sustancia. Por ejemplo, para un gas ideal con capacidad calorífica constante, la exergía física adopta la siguiente forma (7):

$$\dot{E}x_{phy} = C_p(T - T_0) - T_0 \left(C_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (7)$$

Para una sustancia en estado sólido o líquido, la expresión cambia a la ecuación (8):

$$\dot{E}x_{phy} = C_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] - v_m(P - P_0) \quad (8)$$

Para este trabajo, se utilizó software de modelado para calcular la exergía física, con base en las propiedades de cada corriente (caudal másico, composición,

temperatura y presión). Para ello, se seleccionó una combinación del modelo de solución Non-Random-Two-Liquid (NRTL) y la ecuación de estado de Peng-Robinson, ya que son efectivos para modelar mezclas con sustancias polares y no polares, así como (bio) combustibles.

Los flujos de energía en forma de calor y trabajo que ingresan para satisfacer los requerimientos de las unidades tienen un análogo en términos de exergía. En el caso del trabajo, una interacción en términos de energía es equivalente en términos de exergía [36]. Por lo tanto, la exergía de un flujo de trabajo es igual a la cantidad de trabajo realizado, asumiendo que no hay cambio de volumen en las corrientes del sistema.

$$\dot{E}x_{work} = \dot{W} \quad (9)$$

For a heat flow exchanged, at a temperature T , the maximum work is limited by the Carnot efficiency between reservoirs (unit and the environment). where T , the heat flow is received, and T_0 , where the heat is rejected [37].

Para un flujo de calor intercambiado a una temperatura T , el trabajo máximo está limitado por la eficiencia de Carnot entre los reservorios (la unidad y el ambiente), donde T es la temperatura a la que se recibe el flujo de calor y T_0 es la temperatura a la que se rechaza [37].

$$\dot{E}x_{heat} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_i \quad (10)$$

En cada etapa del proceso, el flujo másico $\sum_i \dot{m}_i$ transporta un flujo de exergía, con o sin un servicio industrial como calor o trabajo $\sum_i \dot{E}x_{utilities-in}$; por lo tanto, el flujo total de exergía que ingresa a un sistema se expresa mediante la siguiente ecuación (11):

$$\dot{E}x_{in} = \sum_i \dot{E}x_{mass-in} + \sum_i \dot{E}x_{utilities-in} \quad (11)$$

De manera similar, el flujo total de exergía que sale de un sistema lo hace en forma de exergía asociada a los flujos másicos de productos ($\sum_j \dot{E}x_{products}$) y de residuos ($\sum_j \dot{E}x_{residues}$); se calcula utilizando la ecuación (12), donde la suma total corresponde a la suma de ambos.

$$\dot{E}x_{out} = \sum_j \dot{E}x_{products} + \sum_j \dot{E}x_{residues} \quad (12)$$

Para evaluar la degradación de la exergía, la exergía total destruida corresponde a las irreversibilidades del proceso o de una etapa del proceso, es decir, la exergía que no se aprovechó adecuadamente. Se calcula como la fracción restante entre la exergía de entrada y la exergía de los productos [32], lo que representa el potencial aprovechado (ecuación 13).

$$\dot{E}x_{destroyed} = \sum_i \dot{E}x_{in} - \sum_j \dot{E}x_{products} \quad (13)$$

La exergía total destruida incluye pérdidas inevitables de exergía y pérdidas evitables de exergía. Las pérdidas evitables son irreversibilidades que pueden aprovecharse fácilmente, como la exergía de los residuos y el calor de las corrientes, lo que significa que pueden utilizarse para mejorar la eficiencia.

Por otro lado, las pérdidas de exergía también se definen como irreversibilidades inevitables, ya que corresponden a irreversibilidades derivadas del aumento de la entropía en los sistemas termodinámicos [32]. Se determinan restando la exergía total de salida del sistema a la exergía total de entrada, tal como se muestra en la siguiente expresión (14):

$$\dot{E}x_{losses} = \sum_i \dot{E}x_{in} - \sum_j \dot{E}x_{out} \quad (14)$$

La eficiencia exergética permite valorar el desempeño de un proceso, sistema, equipo, instalaciones y sectores en términos de eficiencia en el uso de recursos. Se

define con base en el principio de conservación de recursos, donde se evalúa la capacidad del proceso para conservar su exergía o evitar su destrucción [38]; una alta eficiencia exergética indica que el sistema aprovecha mejor sus recursos disponibles [39]. Se define como la relación entre la exergía destruida y la exergía de entrada para un proceso dado, según la siguiente expresión (15):

$$\eta_{Exergy} = 1 - \left(\frac{\dot{E}x_{destroyed}}{\dot{E}x_{in}} \right) * 100\% \quad (15)$$

La contribución de cada etapa del proceso () a la destrucción total de exergía se determina mediante la ecuación (16), donde es la exergía perdida (irreversibilidades del proceso) en una etapa i [40].

$$\%Ex_{lost,i} = \left(\frac{\dot{E}x_{destroyed,i}}{\dot{E}x_{total-destroyed}} \right) * 100\% \quad (16)$$

Análisis de resiliencia exergética

Se realiza una evaluación para identificar mejoras potenciales que permitan incrementar la eficiencia del proceso mediante la aplicación de un análisis de resiliencia (sensibilidad) [41]. Este análisis se centra en examinar los efectos de diferentes variables o parámetros sobre la eficiencia exergética global del proceso. Para ello, la metodología parte de una premisa: se modifica una sola variable mientras las demás se mantienen fijas. La variable clave se selecciona a partir de los resultados del análisis exergético de cada etapa, priorizando aquellas con baja eficiencia o con altas pérdidas (evitables e inevitables).

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Flujos de exergía química y total de las principales corrientes del proceso

TABLA II
FLUJOS DE EXERGÍA QUÍMICA Y TOTAL DE LAS PRINCIPALES CORRIENTES DEL PROCESO.

Corrientes	Exergía física [MJ/h]	Exergía química [MJ/h]
1	0	7,4231,19
2	0	427,77
3	0	73.615,14
4	4.686,47	5.618,87
5	13.264,56	101.440,25
6	0	101.440,25
7	0	6.831,16
8	0	91.779,28
9	0	12.573,15
10	0	132.673,90
11	0	1.101,41
12	0	131.079,31
13	213	103.379,84
14	57,13	28.666,79

En la figura 2 se presenta el desempeño global de la exergía del proceso HTL para producir biocrudo. La eficiencia exergética global fue del 24,2% para el proceso HTL, lo que indica que el proceso presenta una conversión regular de recursos energéticos. Esta eficiencia es menor a la cuantificada por Borazjani et al., con un 95% para un proceso HTL de *Nannochloropsis sp.*; dicho proceso se encuentra parcialmente integrado energéticamente mediante el uso de la etapa de enfriamiento como precalentador de la alimentación al reactor, aprovechando la corriente de lodo caliente a la salida del reactor [41]. El proceso perdió 110.491 MJ/h como irreversibilidades, de las cuales el 83% se debió a pérdidas de exergía asociadas a cambios de calor y composición química (91.825,7 MJ/h), y el 17% restante correspondió a residuos (18.666 MJ/h) con compuestos ricos en exergía. Adicionalmente, la exergía total de los servicios auxiliares fue de 58.998 MJ/h, un valor ligeramente superior a la mitad de las irreversibilidades totales, lo que indica que una porción considerable de esta exergía se perdió. Esto es esperable,

ya que la principal fuente de energa del proceso es el calor (99%), el cual pierde calidad r6pidamente [42]. Por lo tanto, para mejorar la eficiencia, los flujos de calor del proceso debera analizarse bajo t6cnicas de integraci3n t6rmica, con el fin de maximizar el aprovechamiento de los recursos energ6ticos y optimizar la operaci3n de los equipos. Tal como mostraron Wei et al., la recuperaci3n de energa a partir de residuos y su calor residual mejora la eficiencia energ6tica en comparaci3n con la transesterificaci3n y la pir6lisis, ya que requieren menor energa de entrada por unidad de energa producida. Asa, el HTL parece ser la ruta m6s favorable para la producci3n de biocombustibles l6quidos a partir de microalgas, desde una perspectiva energ6tica, entre los escenarios evaluados [43].

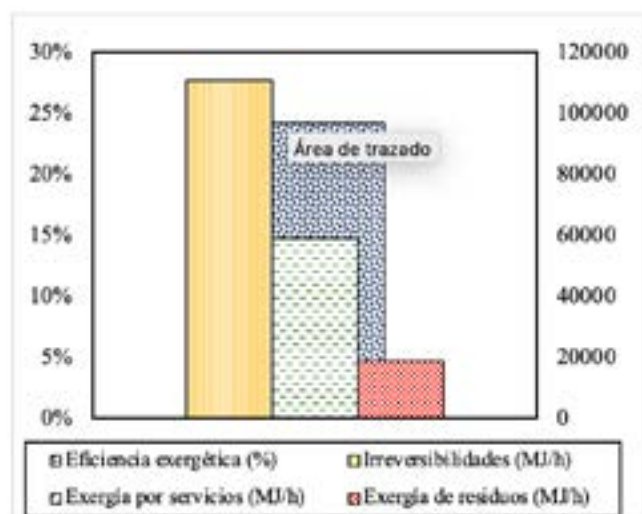


Fig. 2. Desempeño exergetico global para la producci3n de biocruado mediante el proceso HTL.

Por otro lado, el proceso presenta una eficiencia inferior a la del proceso de extracci3n de aceite de microalgas (89%) para producir biodi6sel. Este proceso presenta problemas similares, como la falta de valorizaci3n adecuada de residuos con alta exerga y la disminuci3n del contenido de exerga de algunos productos, lo que reduce la eficiencia exergetica; sin embargo, la producci3n de biodi6sel a partir de aceite presenta una mayor exerga proveniente de los servicios auxiliares (9,85 × 10⁵ MJ/h), lo que implica mayores p6rdidas de exerga [44]. En contraste, Cavalcanti et al. reportaron

que la producci3n de biodi6sel mediante transesterificaci3n de aceite present3 una eficiencia menor (17%), siendo el fotobiorreactor (PBR) la principal unidad de degradaci3n de exerga. Cabe destacar que el reactor de transesterificaci3n (150 °C y 14 bar) reutiliza el calor de la corriente de salida para precalentar la de entrada, lo que hace que la unidad sea muy eficiente (99%) [45]. Por otro lado, Xiao et al. informaron una eficiencia del 26,2% para la producci3n de biog6s mediante digesti3n anaerobia, siendo el reactor la unidad de menor rendimiento (30%). El bajo rendimiento limit3 la salida de productos con alta exerga sin un pretratamiento previo de la microalga. No obstante, la integraci3n t6rmica de las corrientes calientes redujo el desperdicio de exerga, junto con la combusti3n de subproductos [46].

La Figura 3 muestra el desempeo exergetico para cada una de las etapas del proceso. En primer lugar, se observa que la mayoria de las etapas presentan una alta eficiencia, con valores entre el 87 % y el 99 %. La evaporaci3n present3 el mejor desempeo con una eficiencia del 99,89 %. Esta etapa fue efectiva para recuperar el DCM del biocruado sin necesidad de separaci3n adicional ni generaci3n de residuos, debido al bajo punto de ebullici3n del disolvente [47], lo que tambi6n redujo la energa requerida para separar la mezcla, ya que la temperatura y presi3n de operaci3n eran bajas. En comparaci3n, la etapa de enfriamiento tuvo el peor desempeo, con 80.309 MJ/h de irreversibilidades (73 % del total) y una eficiencia del 13 %. El enfriamiento de la biocorriente caliente proveniente del reactor HTL gener3 una p6rdida masiva de exerga (de alrededor de 400 °C a 25 °C). Esto es esperado, como Ghavami et al. sealan que los intercambiadores de calor en procesos HTL son una de las principales fuentes de degradaci3n energ6tica [48], dado que el calor extraido transporta exerga que se disipa al ambiente y no se aprovecha en forma de residuos que puedan ser valorizados. Por lo tanto, la corriente a alta temperatura debera utilizarse para suministrar energa a otras etapas, por ejemplo, calor para la evaporaci3n o para precalentar corrientes usadas como portadoras de energa (utilidades) [49].

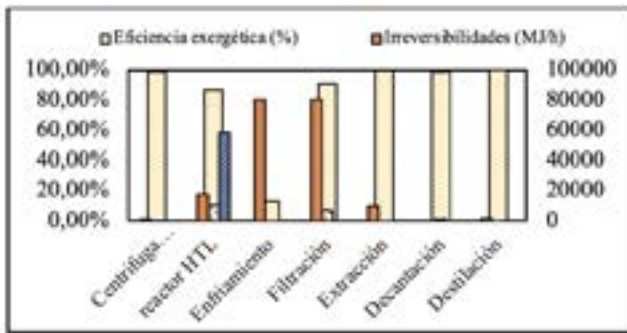


Fig. 3. Desempeño exergético de las etapas de la HTL para la producción de biocombustible.

Resiliencia exergética del proceso

A partir del análisis exergético, se observó que las corrientes de desecho representan una fuente significativa de irreversibilidades. Por esta razón, en el análisis de resiliencia exergética se evaluó el efecto de valorizar estas corrientes sobre la eficiencia global del proceso. Se definieron cuatro escenarios comparativos: el caso 1 (caso base) corresponde al proceso original; el caso 2 consideró la corriente 7; el caso 3 consideró las corrientes 2 y 11; y el caso 4 consideró la corriente 4. La Figura 4 muestra que la eficiencia aumenta moderadamente en los casos 2 y 3, pasando del 24% al 29% y luego hasta el 30%. En el caso 2, la corriente 7 consiste en 2 t/h de biocarbón que puede ser utilizado para el consumo interno del proceso o como subproducto. Internamente, la combustión del biocarbón podría aportar exergía para su uso en servicios industriales. Además, como producto, tiene aplicaciones como fertilizante o agente separador para la remediación de aguas, entre otros.

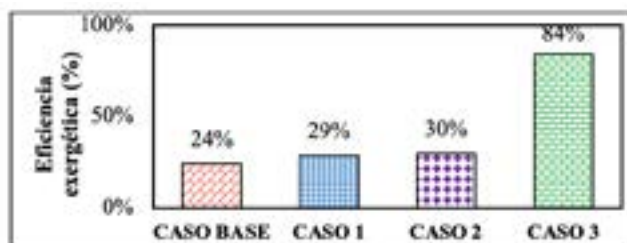


Fig. 4. Cambios en la eficiencia exergética en función del aprovechamiento de las corrientes de desecho del proceso de producción de biocruído a partir de *Chlorella sp.*

En el caso 3, las corrientes 2 y 11, que corresponden al agua descargada del centrífugo y a la solución acuosa que contiene CO_2 , pueden reutilizarse únicamente de manera interna. Ambas corrientes pueden emplearse como alimentación para la etapa de cultivo de la biomasa, maximizando el aprovechamiento de la exergía del proceso. Esta alternativa constituye una vía eficiente y económica para reducir los impactos de las emisiones de gases de efecto invernadero, actuando como una tecnología de biosecuestro [50].

Con respecto al caso 4, este escenario es el menos resiliente; con la valorización de la corriente 4, la eficiencia exergética global alcanzó el 84%. Este aumento sustancial puede atribuirse al contenido de exergía de la mezcla de gases descargada, la cual no solo presentaba elevada temperatura y presión, sino también una composición con compuestos de alta exergía como vapor y metano; la reutilización de esta mezcla de gases minimiza la segunda mayor fuente de irreversibilidades, con un 55% de la exergía total proveniente de residuos. Además, de manera similar al caso 3, la corriente puede emplearse internamente como portadora de energía para calentar corrientes frías. Sin embargo, si el objetivo es lograr la máxima valorización, el metano debe recuperarse como subproducto, dado que el proceso genera 8,64 t/día que podrían venderse o utilizarse como combustible, o incluso como materia prima para productos intermedios como metanol, formaldehído, etileno e incluso productos de alto valor como plásticos biodegradables, bajo un enfoque de biorrefinería [51]. Estos escenarios demuestran que el proceso cuenta con varios mecanismos potenciales para optimizar el uso de la exergía, minimizar la emisión de contaminantes al medio ambiente y ofrecer ingresos secundarios económicos atractivos.

IV. CONCLUSIÓN

La producción de biocombustibles a partir de fuentes de biomasa como las microalgas debe ser sos-

tenible, particularmente en términos de energía. Por lo tanto, el análisis exergético proporciona un medio para evaluar cómo el proceso gestiona sus recursos energéticos. A partir de esta evaluación, se observa que el proceso presenta un desempeño moderado, con una eficiencia del 24 %, lo que indica oportunidades de mejora. En particular, la etapa menos eficiente, el enfriamiento del bio-slurry caliente, con una eficiencia del 8,76 %, revela la presencia de calor que debería recuperarse mediante técnicas de integración energética. Además, el proceso genera una fracción significativa de exergía en las corrientes de desecho (18.665,7 MJ/h), que contienen compuestos con alto valor exergético y que podrían ser valorizados. Esto se confirma con el análisis de resiliencia, que indicó una eficiencia máxima del 84 %; la recuperación potencial de corrientes de desecho, como el gas rico en metano (8 t/día) y el biochar (2 t/h), así como las aguas residuales, podría mejorar la gestión de recursos del proceso, impactando positivamente en su desempeño económico. Finalmente, se puede concluir que el proceso es una opción termodinámicamente viable para la producción de biocombustibles; sin embargo, el biocrudo producido requiere una etapa de mejora (refinamiento) para obtener un producto final como el biodiésel, lo cual podría involucrar irreversibilidades potenciales que deben abordarse.

V. REFERENCIAS

- [1] J. Mozas Santhos Kumar, R. Prakash, and P. Panneerselvam, "Hydrothermal liquefaction – A sustainable technique for present biofuel generation: Opportunities, challenges and future prospects," *Fuel*, vol. 385, Art. no. 134141, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.134141.
- [2] H. Y. Leong *et al.*, "Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 14, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1186/s13068-021-01939-5.
- [3] M. K. Shahid *et al.*, "Biofuels and biorefineries: Development, application and future perspectives emphasizing the environmental and economic aspects," *J. Environ. Manage.*, vol. 297, Art. no. 113268, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113268.
- [4] V. Aristizábal-Marulanda and C. A. Cardona Alzate, "Methods for designing and assessing biorefineries: Review," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 13, no. 3, pp. 789–808, 2019, doi: 10.1002/bbb.1961.
- [5] D. Keegan, B. Kretschmer, B. Elbersen, and C. Panoutsou, "Cascading use: A systematic approach to biomass beyond the energy sector," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 7, no. 2, pp. 193–206, 2013, doi: 10.1002/bbb.1351.
- [6] J. Escalante *et al.*, "Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 169, Art. no. 112914, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112914.
- [7] T. dos S. Gonçalves *et al.*, "Challenges for energy guidelines in crop-based liquid biofuels development in Brazil," *Next Sustain.*, vol. 2, Art. no. 100002, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.nxsust.2023.100002.
- [8] D. M. Orfali, S. Meramo, and S. Sukumara, "Ranking economic and environmental performance of feedstocks used in bio-based production systems," *Curr. Res. Biotechnol.*, vol. 9, Art. no. 100275, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.crbiot.2025.100275.
- [9] D. C. Kannan *et al.*, "Integrated production of algal biofuels and biocommodities," *Algal Res.*, vol. 89, Art. no. 104063, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.algal.2025.104063.
- [10] S. Piyatilleke, B. Thevarajah, P. H. V. Nimars-hana, and T. U. Ariyadasa, "Microalgal biofuels: Challenges and prospective in the framework

- of circular bioeconomy,” *Energy Nexus*, vol. 17, Art. no. 100338, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2024.100338.
- [11] N. Rafa, S. F. Ahmed, I. A. Badruddin, M. Mojibur, and S. Kamangar, “Strategies to produce cost-effective third-generation biofuel from microalgae,” *Front. Energy Res.*, vol. 9, pp. 1–11, Sep. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.749968.
- [12] S. Gaur, M. Kaur, R. Kalra, E. R. Rene, and M. Goel, “Application of microbial resources in biorefineries: Current trend and future prospects,” *Heliyon*, vol. 10, no. 8, Art. no. e28615, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28615.
- [13] L. E. Rincón, J. J. Jaramillo, and C. A. Cardona, “Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation,” *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 479–487, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.058.
- [14] M. Mukherjee, D. Bose, and H. Salam, “Experimentation in procuring and characterizing biofuel obtained from micro algae from sewage treatment plant and municipal waste,” *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 10, no. 6, pp. 152–157, 2017.
- [15] S. F. Ahmed *et al.*, “Bio-oil from microalgae: Materials, production, technique, and future,” *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 3297–3314, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.09.068.
- [16] P. A. Costa, R. M. Mata, F. Pinto, F. Paradela, R. Duarte, and C. Matos, “Effect of type of biomass used in the hydrothermal liquefaction of microalgae on the bio crude yields and quality,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 99, pp. 31–36, Mar. 2023, doi: 10.3303/CET2399006.
- [17] M. Narayanan, “Biorefinery products from algal biomass by advanced biotechnological and hydrothermal liquefaction approaches,” *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 4, 2024, doi: 10.1007/s42452-024-05777-6.
- [18] C. Klüpfel, B. Yuan, P. Biller, and B. Herklotz, “Hydrothermal liquefaction as a treatment technology for anaerobic digestate: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 210, Art. no. 115156, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.115156.
- [19] A. D. González-Delgado, J. B. García-Martínez, and A. F. Barajas-Solano, “Evaluation of algae-based biodiesel production topologies via inherent safety index (Isi),” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6, Art. no. 2854, 2021, doi: 10.3390/app11062854.
- [20] D. C. Elliott *et al.*, “Process development for hydrothermal liquefaction of algae feedstocks in a continuous-flow reactor,” *Algal Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 445–454, 2013, doi: 10.1016/j.algal.2013.08.005.
- [21] E. Ocampo, V. V. Beltrán, E. A. Gómez, L. A. Ríos, and D. Ocampo, “Hydrothermal liquefaction process: Review and trends,” *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 7, Art. no. 100382, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.crgsc.2023.100382.
- [22] M. Hasan, M. Z. Abedin, M. Bin Amin, M. Nekmahmud, and J. Oláh, “Sustainable biofuel economy: A mapping through bibliometric research,” *J. Environ. Manage.*, vol. 336, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117644.
- [23] F. L. Muñoz *et al.*, “Insights from an exergy analysis of a green chemistry chitosan biorefinery,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 194, pp. 666–677, 2023, doi: 10.1016/j.cherd.2023.04.038.
- [24] K. Moreno-Sader, S. I. Meramo-Hurtado, and A. D. González-Delgado, “Computer-aided environmental and exergy analysis as decision-making tools for selecting bio-oil feedstocks,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, pp. 42–57, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.044.

- [25] Z. Borazjani, F. Bayat Mastalinezhad, R. Azin, and S. Osfouri, "Global perspective of hydrothermal liquefaction of algae: a review of the process, kinetics, and economics analysis," *Bioenergy Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 1493–1511, 2023, doi: 10.1007/s12155-023-10615-5.
- [26] P. Biller, B. Sharma, B. Kunwar, and A. Ross, "Hydroprocessing of bio-crude from continuous hydrothermal liquefaction of microalgae," *Fuel*, vol. 159, pp. 197–205, 2015, doi: 10.1016/J.FUEL.2015.06.077.
- [27] Y. Peralta-Ruiz, A. D. González-Delgado, and V. Kafarov, "Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 226–236, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.065.
- [28] G. Valencia, J. Beltrán, R. Romero, and J. Cabrera, "Comparative evaluation of different refrigerants on a vapor compression refrigeration system via exergetic performance coefficient criterion," *Contemp. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 14, pp. 691–702, 2017.
- [29] R. Karamarkovic and V. Karamarkovic, "Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures," *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 537–549, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.10.022.
- [30] A. Fudholi, R. Yendra, D. Fredalina, M. Hafidz, and K. Sopian, "Energy and exergy analysis of hybrid solar drying system," *Contemp. Eng. Sci.*, vol. 9, no. 5, pp. 215–223, 2016.
- [31] A. Ghannadzadeh and M. Sadeqzadeh, "Exergy analysis as a scoping tool for cleaner production of chemicals: A case study of an ethylene production process," *J. Clean. Prod.*, vol. 129, pp. 508–520, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.018.
- [32] C. Michalakakis, J. M. Cullen, A. Gonzalez Hernandez, and B. Hallmark, "Exergy and network analysis of chemical sites," *Sustain. Prod. Con- sum.*, vol. 19, pp. 270–288, 2019, doi: 10.1016/j.spc.2019.07.004.
- [33] S. Meramo-Hurtado, C. Alarcón-Suesca, and Á. D. González-Delgado, "Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia," *J. Clean. Prod.*, vol. 248, Art. no. 119285, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119285.
- [34] N. Sato, *Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers*. Elsevier, 2004, doi: 10.1016/B978-0-444-51645-9.X5000-6.
- [35] R. Rivero and M. Garfias, "Standard chemical exergy of elements updated," *Energy*, vol. 31, no. 15, pp. 3310–3326, 2006, doi: 10.1016/j.energy.2006.03.020.
- [36] E. Querol, B. Gonzalez-Regueral, and J. L. Perez-Benedito, *Enfoque Práctico de Exergía y Análisis Termoeconómico de Procesos Industriales*. Springer, 2013. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8903>
- [37] S. de Oliveira, *Exergy: Production, Cost and Renewability*. London: Springer-Verlag, 2013, doi: 10.1007/978-1-4471-4165-5.
- [38] A. Arshad, H. M. Ali, A. Habib, M. A. Bashir, M. Jabbal, and Y. Yan, "Energy and exergy analysis of fuel cells: A review," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, pp. 308–321, 2019, doi: 10.1016/j.tsep.2018.12.008.
- [39] S. Meramo and Á. D. González-Delgado, "Exergy and economic optimization of heat-integrated water regeneration networks," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 18, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100373.
- [40] S. Meramo-Hurtado, N. Urbina-Suaréz, and Á. González-Delgado, "Computer-aided environmental and exergy analyses of a large-scale produc-

tion of chitosan microbeads modified with TiO₂ nanoparticles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 237, Art. no. 117804, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117804.

- [41] Z. Borazjani, R. Azin, S. Osfour, M. Lehner, and M. Ellersdorfer, “Computer-aided exergy evaluation of hydrothermal liquefaction for biocrude production from *Nannochloropsis* sp.,” *Bioenergy Res.*, vol. 15, no. 1, pp. 141–153, 2022, doi: 10.1007/s12155-021-10297-x.
- [42] L. Prasakti, S. H. Pratama, A. Fauzi, Y. S. Pradana, Rochmadi, and A. Budiman, “Exergy analysis of conventional and hydrothermal liquefaction-esterification processes of microalgae for biodiesel production,” *Open Chem.*, vol. 18, no. 1, pp. 874–881, 2020, doi: 10.1515/chem-2020-0132.
- [43] C. Wei *et al.*, “Life-cycle assessment of microalgae liquid biofuel production in biofilm cultivation system via conversion technologies of transesterification, hydrothermal liquefaction and pyrolysis,” *J. Clean. Prod.*, vol. 436, Art. no. 140559, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140559.
- [44] Y. Peralta-Ruiz, L. G. Obregon, and Á. González-Delgado, “Design of biodiesel and bioethanol production process from microalgae biomass using exergy analysis methodology,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 70, pp. 1045–1050, 2018, doi: 10.3303/CET1870175.
- [45] E. J. C. Cavalcanti, D. S. Barbosa, and M. Carvalho, “Biodiesel production from microalgae: Exergy analysis using specific exergy costing approach,” *Bioenergy Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 598–611, 2024, doi: 10.1007/s12155-023-10636-0.
- [46] C. Xiao *et al.*, “Exergy analyses of biogas production from microalgae biomass via anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 289, Art. no. 121709, May 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121709.
- [47] B. Guo, B. Yang, P. Weil, S. Zhang, U. Hornung, and N. Dahmen, “The effect of dichloromethane on product separation during continuous hydrothermal liquefaction of *Chlorella vulgaris* and aqueous product recycling for algae cultivation,” *Energy Fuels*, vol. 36, no. 2, pp. 922–931, 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02523.
- [48] N. Ghavami, K. Özdenkçi, G. Salierno, M. Björklund-Sänkiäho, and C. De Blasio, “Analysis of operational issues in hydrothermal liquefaction and supercritical water gasification processes: a review,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, no. 14, pp. 12367–12394, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-02176-4.
- [49] H. Shahbeik *et al.*, “Biomass to biofuels using hydrothermal liquefaction: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 189, Part B, Art. no. 113976, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113976.
- [50] F. Hosseinifard, M. Ebadollahi, and M. Amidpour, “Sustainable pathways for CO₂ mitigation: A comparative energy, exergy, and economic analysis of optimized post-combustion capture and microalgae-based sequestration,” *Clean. Environ. Syst.*, vol. 18, Art. no. 100304, May 2025, doi: 10.1016/j.cesys.2025.100304.
- [51] C. Deepika *et al.*, “Hydrothermal liquefaction of wet microalgal biomass for biofuels and platform chemicals: advances and future prospects,” *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 5, 2024, doi: 10.1007/s42452-024-05911-4.