

El concepto de biorrefinería en la transición energética: una revisión del estado del arte

The biorefinery concept in the Colombian context: a review of the state of the art

Mateus Calderón Karen Vanessa¹
Karen.mateus@unipaz.edu.co

Velasco Rozo Edwing Alexander¹
Edwin.velasco@unipaz.edu.co

Vargas Montañez Omar Jair¹
Omar.vargasm@unipaz.edu.co

Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad, GREIP (1)

Recibido: abril 17 de 2023 – Aceptado: junio 14 de 2023

Resumen

Los biocombustibles líquidos brindan una de las pocas opciones para reemplazar los combustibles fósiles a corto y mediano plazo. Tienen el potencial de ofrecer ahorros de gases de efecto invernadero y seguridad energética. Si la producción de biocombustibles se proyecta a largo plazo de forma similar a la producción de combustibles fósiles, la diversidad de biocompuestos intermedios y subproductos que pueden obtenerse de forma paralela a los biocombustibles podrían en conjunto dar lugar al concepto de biorrefinería. Teniendo en cuenta esto, la meta de esta revisión es realizar un análisis del estado del arte respecto al concepto de biorrefinería, discriminando aspectos fundamentales como los fundamentos, los tipos de materia prima, los principales productos, los esquemas de transición de las refinerías tradicionales a este nuevo concepto, y los distintos procesos biotecnológicos al interior de una biorrefinería.

Palabras clave: biodiésel, bioetanol, biomasa, transformación química, economía circular, química verde.

Abstract

Liquid biofuels provide one of the few options to replace fossil fuels in the short to medium term. They have the potential to offer greenhouse gas savings and energy security. If the production of biofuels is projected in the long term in a similar way to the production of fossil fuels, the diversity of intermediate biocomposites and by-products that can be obtained in parallel to biofuels could together give rise to the concept of biorefinery. Taking this into account, the goal of this review is to carry out an analysis of the state of the art regarding the biorefinery concept, discriminating fundamental aspects such as the foundations, the types of raw material, the main products, the transition schemes from traditional refineries to this new concept, and the different biotechnological processes inside a biorefinery.

Keywords: biodiesel, bioethanol, biomass, chemical transformation, circular economy, green chemistre

1. INTRODUCCIÓN

El siglo XXI está presenciando una gran demanda de reservas fósiles junto con una rápida reducción de las materias primas de petróleo fácilmente accesibles y económicamente [1]. La demanda energética actual no

se satisface con fuentes de combustibles fósiles, lo que expone al mundo a riesgos geopolíticos. Además, las preocupaciones con respecto a la seguridad de la cadena de suministro y los impactos ambientales han resultado en un cambio cada vez mayor de las políticas energéticas globales para buscar tecnologías alternativas y fuentes sostenibles de energía, materiales, productos químicos y

productos de valor agregado. [2] Recientemente, la sociedad ha reconocido la necesidad de desarrollar una economía basada en recursos renovables y se han comenzado a financiar diversas actividades de I+D para lograr este objetivo. [3] Sin embargo, la generación de bioproductos basados en cadenas de suministro sostenibles plantea grandes desafíos para una economía basada en el medio ambiente. La forma más sencilla de proporcionar una cadena de suministro sostenible es mediante el empleo de materias primas de biomasa renovable, que es la única opción sostenible para sustituir los recursos de combustibles fósiles, como fuentes de compuestos orgánicos en una escala de tiempo relativamente corta y con un suministro ilimitado [4]. Todos estos factores han reforzado la necesidad de investigación sobre la producción de productos básicos derivados de la biomasa producidos de manera sostenible. El concepto de biorrefinería considera el uso de biomasa como materia prima de bajo costo para las industrias química y biológica. La descripción más utilizada de biorrefinería es una definición adoptada por la Tarea 42 de Bioenergía de la Agencia Internacional de Energía [5]. Establece que la biorrefinación es el procesamiento sostenible de la biomasa en un espectro de productos comercializables y energía. En otras palabras, la biorrefinería es un término utilizado para definir instalaciones industriales que abarcan una amplia gama de tecnologías combinadas en las que la biomasa se transforma y convierte, de manera sostenible, en una amplia gama de productos de valor agregado, lo que lleva a similitudes directas con las petrorrefinerías de hoy. Siguiendo esta idea, el objetivo de las futuras biorrefinerías es la extracción de productos químicos de alto valor presentes en la biomasa, como agentes saborizantes, fragancias y nutracéuticos y, en el siguiente paso, el procesamiento de polisacáridos, lignina y proteínas derivados de la biomasa hacia bioderivados, materiales, combustibles y otras mercancías [6].

En este contexto, el propósito de este trabajo es realizar un primer acercamiento hacia la determinación del estado del arte en torno al concepto de biorrefinería, discriminando aspectos fundamentales como los fundamentos, los tipos de materia prima, los principales productos, los esquemas de transición de las refinerías tradicionales a este nuevo concepto, y los distintos procesos biotecnológicos al interior de una biorrefinería.

2. METODOLOGÍA

El análisis del concepto de biorrefinería en la

transición energética se realizó mediante una revisión sistemática de la literatura dividida en dos etapas principales: heurística (búsqueda y compilación de material bibliográfico) y hermenéutica (interpretación de la literatura encontrada, construcción del marco teórico y publicación). Se encontró un total de 90.900 resultados, los cuales se redujeron a 35 bajo ciertos criterios de filtrado.

A. Heurística

Se utilizó el navegador Google Académico para la revisión de la literatura que se enfocó en tres temas: concepto de biorrefinería, procesos de biorrefinería y productos. Las fuentes bibliográficas empleadas incluyeron: artículos de investigación y artículos de revisión. Como mecanismo de apoyo para delimitar la información a una más actual, se centró la búsqueda en un intervalo de tiempo que comprende los últimos quince años (2008-2023). Las consultas se realizaron en inglés debido a que es el idioma predominante en documentación científica.

B. Hermenéutica

1) Interpretación

Una vez finalizada la fase heurística descrita, se aplicaron medidas de inclusión y exclusión de documentos cuyo contenido no fuese relevante haciendo uso de la lectura crítica. Los criterios usados fueron los siguientes.

2) Lectura de títulos

La lectura de los títulos de cada uno de los artículos permitió la exclusión de textos que se desviaban del tema de interés y omitir la duplicidad de documentos, reduciendo así su número a 80. Se seleccionaron los artículos en cuyos títulos se encontrarán al menos tres de las palabras clave propuestas para cada secuencia de búsqueda.

3) Lectura de resúmenes

Se llevó a cabo la lectura del *abstract* (resumen) de los 80 documentos seleccionados previamente. De estos, se escogieron aquellos artículos en los que se muestra un desarrollo experimental o una revisión sistemática de la literatura relacionada. De esta manera se redujo el número de documentos a 68.

4) Lectura completa de los artículos

Mediante la lectura completa de los 68 documentos se

escogieron aquellos que mostraran información directamente relacionada con los temas de interés.

5) Construcción teórica

Al finalizar todas las etapas de filtrado mencionadas previamente, se logró obtener un total de 35 artículos. Se procedió a la realización de un análisis de los principales procesos de biorrefinería y se realizó una discusión y comparación de estas. Dentro de los 35 artículos, se encontraron datos y conceptos que introducen de forma clara al tema de biorrefinería y que muestran un gran panorama de desarrollo industrial encaminado a la química verde y la economía circular que dan la posibilidad de realizar la presente revisión.

3. EL CONCEPTO DE BIOREFINERÍA

A. Fundamentos

Entre las diversas definiciones de biorrefinería, la más exhaustiva fue realizada recientemente por la Tarea 42 de bioenergía de la IEA "Biorrefinerías" [5]: "La biorrefinería es el procesamiento sostenible de la biomasa en un espectro de productos comercializables y energía". El concepto de biorrefinería abarca una amplia gama de tecnologías capaces de separar los recursos de biomasa (madera, pastos, maíz...) en sus componentes básicos (carbohidratos, proteínas, triglicéridos...) que pueden convertirse en productos de valor añadido, biocombustibles y productos químicos. Una biorrefinería es una instalación (o red de instalaciones) que integra procesos y equipos de conversión de biomasa para producir biocombustibles de transporte, energía y productos químicos a partir de la biomasa. Este concepto es análogo a la refinería de petróleo actual, que produce múltiples combustibles y productos derivados del petróleo. Un enfoque con visión de futuro es la conversión gradual de gran parte de la economía/industria global en una sociedad sostenible de base biológica que tenga bioenergía, biocombustibles y productos de base biológica como pilares principales y biorrefinerías como base. Tal sustitución del petróleo por biomasa requerirá algunos cambios radicales en la producción actual de bienes y servicios: las ciencias biológicas y químicas desempeñarán un papel de liderazgo en la generación de industrias futuras y se deben generar nuevas sinergias entre las ciencias biológicas, físicas, químicas y técnicas desarrolladas [5], [7].

La producción eficiente de biocombustibles para el transporte es vista como uno de los principales factores de promoción para el desarrollo futuro de las biorrefinerías [8]. De hecho, el sector del transporte está

creciendo constantemente y la demanda de (bio)combustibles renovables, que solo pueden obtenerse de la biomasa, crece en consecuencia. Como consecuencia, el principal desafío para el desarrollo de la biorrefinería parece ser la producción eficiente y rentable de biocombustibles para el transporte, mientras que a partir de los biomateriales y productos bioquímicos coproducidos se pueden obtener beneficios económicos y ambientales adicionales.

Los principales productos de base biológica se obtienen hoy en día a partir de la conversión de biomasa en productos básicos como almidón, aceite y celulosa. Además, en la industria alimentaria se producen y utilizan productos químicos como el ácido láctico y los aminoácidos. Otros productos de base biológica ya disponibles comercialmente incluyen adhesivos, compuestos de limpieza, detergentes, fluidos dieléctricos, colorantes, fluidos hidráulicos, tintas, lubricantes, materiales de embalaje, pinturas y revestimientos, papel y cartón, rellenos plásticos, polímeros, disolventes y adsorbentes. Algunos ejemplos de industrias de biorrefinería y biomasa no convencional que ya son competitivas en el mercado se reportan en la literatura [3], [9], [10], junto con algunas plantas piloto y de demostración existentes.

La mayoría de los biocombustibles y bioquímicos existentes se producen actualmente en cadenas de producción únicas y no dentro de un concepto de biorrefinería, y generalmente requieren materiales que compiten con la industria de alimentos y piensos. Por lo tanto, su explotación está limitada. Por el contrario, los cultivos lignocelulósicos reducen la competencia por la tierra fértil, ya que pueden cultivarse en terrenos no aptos para cultivos agrícolas. Además, en comparación con los cultivos convencionales que pueden contribuir solo con una pequeña fracción de la biomasa en pie anterior, las biorrefinerías basadas en materias primas lignocelulósicas pueden depender de mayores rendimientos de biomasa por hectárea, ya que toda la cosecha está disponible como materia prima [11].

En cuanto a la planta de conversión, se debe minimizar el consumo de recursos energéticos no renovables durante el procesamiento de la biorrefinería, junto con los impactos ambientales relacionados, mientras se debe maximizar el uso completo y eficiente de la biomasa. Esta perspectiva ecológica requiere:

- análisis de tres ciclos agrícolas y forestales importantes, a saber, carbono (respiración, fotosíntesis y descomposición de materia orgánica), agua (precipitación, evaporación, infiltración y escorrentía) y nitrógeno (fijación de N, mineralización, desnitrificación) y sus interdependencias [12],

- evaluaciones de rendimiento del sistema a escala de planta [8],
- evaluaciones de impacto ambiental realizadas mediante la evaluación del ciclo de vida [13].

Se espera que las industrias de biorrefinería se desarrollen como complejos industriales dispersos capaces de revitalizar las zonas rurales. A diferencia de la refinera de petróleo, que casi invariablemente significa plantas muy grandes, lo más probable es que las biorrefinerías abarquen una amplia gama de instalaciones de diferentes tamaños. En este contexto, varias bioindustrias pueden combinar sus flujos de materiales para alcanzar una utilización completa de todos los componentes de la biomasa: el residuo de una bioindustria (por ejemplo, la lignina de una planta de producción de etanol lignocelulósico) se convierte en insumo para otras industrias, dando lugar a sistemas bioindustriales integrados. Además, los recursos de biomasa están disponibles localmente en muchos países y su uso puede contribuir a reducir la dependencia nacional de los combustibles fósiles importados.

B. Tipos de materia prima

La biomasa se sintetiza a través del proceso fotosintético que convierte el dióxido de carbono atmosférico y el agua en azúcares. Las plantas utilizan el azúcar para sintetizar los materiales complejos que se denominan genéricamente biomasa. Una etapa importante en el sistema de biorrefinería es la provisión de un suministro renovable, consistente y regular de materia prima. Es posible que se requiera un procesamiento inicial para aumentar su densidad energética a fin de reducir los costos de transporte, manejo y almacenamiento.

Las materias primas renovables a base de carbono para la biorrefinería provienen de cuatro sectores diferentes:

1. agricultura (cultivos dedicados y residuos),
2. silvicultura,
3. industrias (residuos y sobras de procesos) y hogares (residuos sólidos municipales y aguas residuales),
4. acuicultura (algas y algas marinas).

Se puede hacer una distinción adicional entre aquellas materias primas que provienen de cultivos dedicados y residuos de actividades agrícolas, forestales e industriales, que pueden estar disponibles sin preocupaciones previas. Las principales materias primas de biomasa se pueden agrupar en 3 amplias categorías: carbohidratos y lignina, triglicéridos y residuos orgánicos mixtos.

1) Carbohidratos y lignina

Los carbohidratos (de almidón, celulosa y hemicelulosa) son moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno y son, con mucho, el componente de biomasa más común que se encuentra en las materias primas de las plantas. Los azúcares de "monosacárido" de una sola molécula de seis carbonos ($C_6H_{12}O_6$) incluyen glucosa, galactosa y manosa, mientras que los azúcares de 5 carbonos más comunes ($C_5H_{10}O_5$) son la xilosa y la arabinosa. Los dos cultivos de azúcar más importantes son la caña de azúcar y la remolacha azucarera que, junto con el maíz (un cultivo de almidón), suministran casi todo el etanol que se produce en la actualidad [14].

El almidón ($(C_6H_{10}O_5)_n$) es una molécula de polímero muy grande compuesta por muchos cientos o miles de moléculas de glucosa (polisacáridos), que deben descomponerse en una o dos moléculas antes de ser fermentadas. Los cultivos de almidón más difundidos son el trigo y el maíz. Una vez que los azúcares han sido despolimerizados (para cultivos de almidón) o extraídos (para cultivos de azúcar), pueden fermentarse fácilmente a etanol o usarse como sustrato para reacciones químicas que conducen a una amplia gama de productos químicos.

La biomasa lignocelulósica tiene tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa ($(C_6H_{10}O_5)_n$) tiene una estructura molecular fuerte formada por largas cadenas de moléculas de glucosa (azúcar C_6). La distinción con el almidón viene dada por la configuración de los enlaces formados a través de la molécula de oxígeno que une dos unidades de hexosa. El almidón se puede hidrolizar fácilmente mediante enzimas o ataque ácido a los monómeros de azúcar individuales, mientras que la celulosa (30-50% de la materia seca lignocelulósica total) es mucho más difícil de hidrolizar y liberar monómeros de glucosa individuales. La hemicelulosa ($(C_5H_8O_5)_n$) es un componente relativamente amorfo que es más fácil de descomponer con productos químicos y/o calor que la celulosa; contiene una mezcla de azúcares C_6 y C_5 . Es el segundo componente principal de la biomasa lignocelulósica (20-40% de la materia seca total de la materia prima). La lignina ($(C_9H_{10}O_2(OCH_3))_n$), es esencialmente el pegamento que proporciona la rigidez general a la estructura de plantas y árboles y está hecha de polímeros fenólicos. Mientras que la celulosa y la hemicelulosa son polisacáridos que pueden hidrolizarse a azúcares y luego fermentarse a etanol, la lignina no puede usarse en procesos de fermentación, pero puede ser útil para otros fines (extracción química o generación de energía). La lignina (15-25 % de la materia seca total de la materia prima) es la fracción no carbohidratada más grande de la lignocelulosa.

La biomasa lignocelulósica se puede proporcionar como cultivo o como residuo. Se pueden producir

grandes cantidades de biomasa celulósica a través de cultivos dedicados como especies de plantas herbáceas perennes o cultivos leñosos de rotación corta. Otras fuentes de biomasa lignocelulósica son los desechos y residuos, como la paja de la agricultura, los desechos de madera de la industria de la celulosa y el papel y los residuos forestales. El uso de biomasa residual ofrece una forma de crear valor para la sociedad, desplazando los combustibles fósiles con material que normalmente se descompondría, sin uso adicional de suelo para su producción [15].

2) Triglicéridos

Los aceites y las grasas son triglicéridos que típicamente consisten en glicerina y ácidos grasos saturados e insaturados (la longitud de su cadena oscila entre C8 y C20, pero los 16, 18 y 20 carbonos son los más comunes). Las fuentes de aceites y grasas son una variedad de materias primas vegetales y animales. Los aceites de soja, palma, colza y girasol son los más importantes en términos de producción mundial [16]. Los aceites vegetales se utilizan hoy en día para la producción de biodiesel al reaccionar con un alcohol, generalmente metanol. Sin embargo, también pueden usarse como sustrato para reacciones químicas gracias a dos sitios químicamente reactivos: el doble enlace en la cadena de ácidos grasos insaturados y el grupo ácido de la cadena de ácidos grasos [11]. Al igual que los cultivos de azúcar y almidón, los cultivos de semillas oleaginosas se caracterizan por un bajo rendimiento y un alto uso de insumos. En el futuro, los cultivos no comestibles como *Jatropha curcas* y *Pongamia pinnata*, que requieren menores insumos y son adecuados para tierras marginales, pueden convertirse en los cultivos oleaginosos más extendidos para fines de biorrefinería, especialmente en regiones secas y semiáridas [17]. Otras fuentes de aceite vegetal para la conversión de biocombustibles se pueden encontrar en los flujos de desechos de la industria alimentaria, donde el aceite

comestible de desecho se genera principalmente a partir de servicios comerciales y plantas de procesamiento de alimentos, como restaurantes, cadenas de comida rápida y hogares [18].

3) Residuos orgánicos mixtos

Otros tipos de fuentes de biomasa que no entran dentro de las categorías anteriores son la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), estiércol, frutos y cultivos silvestres, proteínas y residuos de industrias hortofrutícolas frescas. Las características físicas y químicas de este amplio espectro de recursos de biomasa varían en gran medida. Ciertos flujos, como los lodos de depuradora, el estiércol de las granjas lecheras y porcinas y los residuos del procesamiento de alimentos, son muy húmedos, con un contenido de humedad superior al 70 %. Por lo tanto, estas materias primas son más adecuadas para un proceso de digestión anaeróbica para generar biogás, en lugar de otros combustibles o productos químicos. Otros flujos, como los RSU orgánicos, pueden estar más o menos contaminados con metales pesados u otros elementos, pero representan un alto potencial para la recuperación de energía [19]. Claramente, las diferentes propiedades y características de los residuos de biomasa requieren la aplicación de diferentes tecnologías de conversión.

C. Procesos tecnológicos en biorrefinería

El objetivo del proceso tecnológico en biorrefinería es la despolimerización y desoxigenación de los componentes de la biomasa. Para convertir la materia prima de biomasa en productos valiosos dentro de un enfoque de biorrefinería, se deben aplicar varios procesos tecnológicos de manera conjunta. Se pueden dividir en cuatro grupos principales: procesos termoquímicos, bioquímicos, mecánicos/físicos y químicos, los cuales se analizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los procesos de conversión

Proceso	Técnica	Descripción	Referencia
Termo-químico	Combustión	Conversión térmica de biomasa en presencia de un oxidante (normalmente O ₂) para producir CO ₂ Y H ₂ O	[20]
	Gasificación	Descomposición térmica de biomasa a alta temperatura (>700°C) con niveles limitados de O ₂ para generar gas de síntesis (H ₂ , CO,CO ₂ ,CH ₄)	[21]
	Mejoramiento hidrotermal	Transformación hidrotermal de biomasa en crudo orgánico.	[22]
	Pirólisis	La biomasa se somete a temperaturas intermedias (300-600°C) en ausencia de oxígeno para obtener aceite pirolítico (bioaceite) carbón vegetal y gases ligeros.	[23]
Bioquímico	Fermentación	Utiliza microorganismos para transformar un sustrato en productos recuperables (alcoholes y ácidos orgánicos) a baja temperatura y velocidad de reacción.	[24]

ISSN 2590-5929		REVISTA PARA LA DIFUSIÓN Y PROMOCIÓN DE AVANCES DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN	
	Digestión anaeróbica	La biomasa se somete a descomposición bacteriana en ausencia de oxígeno a 30-65°C. El principal producto obtenido es el biogás (CH ₄ Y CO ₂).	[19]
	Digestión aeróbica	La biomasa se somete a descomposición bacteriana en presencia de oxígeno. Esta técnica se aplica en el tratamiento de aguas residuales	[2]
	Procesos enzimáticos	Utiliza enzimas para transformar un sustrato en productos recuperables (alcoholes y ácidos orgánicos) a baja temperatura y velocidad de reacción.	[25]
Químico	Procesos catalíticos	Reacción donde interviene uno o más reactivos, que tiene la presencia de un catalizador.	[16]
	Esterificación/ Transesterificación	Estas reacciones son las más comunes para la producción de biodiesel usando KOH o NaOH como catalizador. Los aceites vegetales se convierten es ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos.	[26]
	Hidrogenación	Reacción entre H ₂ y otro compuesto o elemento para producir biomoléculas, normalmente en presencia de un catalizador.	[27]
	Hidrólisis	Esta técnica puede utilizar ácidos, álcalis, vapor o enzimas para degradar la biomasa en sus azúcares simples.	[28]
	Oxidación	Combinación de oxígeno con otros elementos. Proceso donde hay aparentemente pérdida de electrones o iones.	[29]
Mecánico/Físico	Pretratamiento	Proceso donde se produce el acondicionamiento de la biomasa para su posterior transformación de productos de valor añadido.	[30]
	Separación	Método para lograr la separación de un producto químico de una mezcla, es decir, la purificación de un producto interesante.	[6]
	Destilación	Proceso de separación de un componente de una mezcla líquida por evaporación y condensación selectiva.	[31]
	Fluido supercrítico	Se utiliza un fluido supercrítico (condiciones supercríticas, temperatura y presión) para separar un componente (extracto) de otro (matriz). Además, se puede utilizar para extracciones de líquidos.	[32]

IV. DE REFINERÍA DE PETRÓLEO A BIORREFINERÍA

A. Biomasa vs. fósiles como materia prima

La estructura de las materias primas de la biorrefinería es totalmente diferente a aquella en la que se basa la actual refinería de petróleo. De hecho, el petróleo crudo es una mezcla de muchos compuestos de hidrocarburos orgánicos diferentes. El primer paso de la refinería de petróleo es eliminar el agua y las impurezas, luego destilar el petróleo crudo en sus diversas fracciones como gasolina, combustible diésel, queroseno, aceites lubricantes y asfaltos. Luego, estas fracciones pueden transformarse químicamente en varios productos químicos industriales y productos finales.

A diferencia del petróleo, la composición de la biomasa no es homogénea, porque la materia prima de la biomasa puede estar hecha de granos, madera, pasto, desechos biológicos, etc., y la composición elemental es una mezcla de C, H y O (más otros componentes menores como N, S y otros compuestos minerales). Si se compara con el petróleo, la biomasa generalmente tiene muy poco hidrógeno, demasiado oxígeno y una fracción más baja de carbono. La variedad de composición en las materias primas de biomasa es tanto una ventaja como una desventaja. Una ventaja es que las biorrefinerías pueden fabricar más clases de productos que las refinerías de petróleo y pueden depender de una gama más amplia de materias primas. Una desventaja es que se

necesita una gama relativamente mayor de tecnologías de procesamiento, y la mayoría de estas tecnologías aún se encuentran en una etapa precomercial [6].

Para ser utilizada para la producción de biocombustibles y productos químicos, la biomasa debe despolimerizarse y desoxigenarse. La desoxigenación es necesaria porque la presencia de O en los biocombustibles reduce el contenido de calor de las moléculas y, por lo general, les da una alta polaridad, lo que dificulta la mezcla con los combustibles fósiles existentes [33]. Las aplicaciones químicas pueden requerir mucha menos desoxigenación, ya que la presencia de oxígeno a menudo proporciona valiosas propiedades físicas y químicas al producto.

A diferencia del petróleo, la biomasa experimenta cambios estacionales, ya que no se puede recolectar durante todo el año. Un cambio de petróleo crudo a biomasa puede requerir un cambio en la capacidad de las industrias químicas, con el requisito de generar los materiales y productos químicos en un marco de tiempo estacional. Alternativamente, es posible que la biomasa deba estabilizarse antes del almacenamiento a largo plazo para garantizar el funcionamiento continuo de la biorrefinería durante todo el año [31].

La biorrefinería representa un cambio de la refinería de petróleo tradicional basada en una gran explotación de recursos naturales y una gran producción de residuos hacia sistemas integrados en los que se aprovechan todos los recursos. Un ejemplo de cómo evolucionará la biorrefinería del futuro se puede encontrar en la historia

de la industria de molienda húmeda de maíz existente [11]. Inicialmente, la industria de molienda húmeda de maíz producía almidón como producto principal. A medida que se desarrolló la tecnología y la necesidad de productos de mayor valor impulsó el crecimiento de la industria, la cartera de productos se expandió desde varios derivados del almidón, como los jarabes de glucosa y maltosa, hasta el jarabe de maíz con alto contenido de fructosa. Posteriormente se añadieron productos de fermentación derivados del almidón y la glucosa como ácido cítrico, ácido glucónico, ácido láctico, lisina, treonina y etanol. Ahora se están produciendo muchos otros subproductos, como gluten de maíz, aceite de maíz, fibra de maíz y alimentos para animales. El cuadro final es que el desarrollo de la infraestructura técnica, comercial y política de una refinera de biomasa (biorrefinería) la hace similar al concepto actual de refinera de petróleo.

B. Plataformas químicas actuales en refinera de petróleo

La industria química actual procesa el petróleo crudo en un número limitado de fracciones básicas [5]. Usando numerosos catalizadores de craqueo y refinación y usando la destilación como el proceso de separación dominante, el petróleo crudo se refina en fracciones como nafta, gasolina, queroseno, gasóleo y residuos. Los volúmenes relativos de las fracciones formadas dependen de las condiciones de procesamiento y de la composición del crudo. La fracción de nafta se utiliza posteriormente como materia prima para la producción de unos pocos productos químicos de plataforma de los que se derivan posteriormente todos los principales productos químicos a granel. Una característica importante de la materia prima de nafta es que, a diferencia de la biomasa, tiene un contenido de oxígeno muy bajo. La mayoría de los productos químicos a granel se pueden producir a partir de estos pocos productos químicos de plataforma:

- etileno,
- propileno,
- C4-olefinas,
- los aromáticos benceno, tolueno y xileno (a menudo denominados BTX).

Estos productos químicos de plataforma que contienen hidrógeno y carbono se utilizan posteriormente, por ejemplo, como disolventes (benceno, tolueno), material de partida para polímeros (etileno, propileno, butadieno) o se funcionalizan aún más mediante la introducción de elementos como oxígeno, nitrógeno o cloro [5], [6].

V. PRODUCTOS DE BIORREFINERÍA

Los productos de los sistemas de biorrefinería se pueden agrupar en dos grandes categorías: productos materiales y productos energéticos. Los productos energéticos son aquellos productos que se utilizan por su contenido energético, proporcionando electricidad, calor o servicio de transporte. Por otro lado, los productos materiales no se utilizan para generar energía sino por sus propiedades químicas o físicas. En algunos casos, se necesita una distinción adicional para la caracterización de los productos porque algunos productos como el biohidrógeno o el bioetanol pueden usarse como combustibles o como compuestos químicos en la síntesis química. En estos casos, es necesario identificar los mercados abordados, por ejemplo, el sector del transporte de H₂ y bioetanol [34].

Los productos de una biorrefinería deben ser capaces de reemplazar los productos basados en combustibles fósiles provenientes de la refinera de petróleo, tanto químicos como energéticos. En cuanto a los productos químicos, este objetivo puede cumplirse produciendo la misma especie química a partir de biomasa en lugar de fósiles (por ejemplo, fenoles), o produciendo una molécula que tenga una estructura diferente pero una función equivalente. En cuanto a los combustibles, una biorrefinería debe reemplazar los combustibles fósiles convencionales (principalmente gasolina, diésel, petróleo pesado, carbón y gas natural) por biocombustibles provenientes del mejoramiento de biomasa [14], [35].

Los productos energéticos más importantes que se pueden producir en las biorrefinerías son [2]:

- biocombustibles gaseosos (biogás, gas de síntesis, hidrógeno, biometano),
- biocombustibles sólidos (pellets, lignina, carbón),
- biocombustibles líquidos para el transporte (bioetanol, biodiésel, combustibles FT, bioaceite).

Los productos químicos y materiales más importantes son los siguientes [13]:

- productos químicos (químicos finos, bloques de construcción, productos químicos a granel),
- ácidos orgánicos (succínico, láctico, itacónico y otros derivados del azúcar),
- polímeros y resinas (plásticos a base de almidón, resinas fenólicas, resinas de furano),
- biomateriales (paneles de madera, pulpa, papel, celulosa),
- alimentos y piensos,
- fertilizantes.

VI. CONCLUSIONES

La reducción de las emisiones de CO₂ fósil, la necesidad de un suministro de energía seguro y la revitalización de las zonas rurales fomentan el uso de la biomasa como materia prima para la producción bioenergética y bioquímica. La energía de biomasa y la recuperación de materiales se maximizan si se considera un enfoque de biorrefinería, donde muchos procesos tecnológicos se aplican conjuntamente a diferentes tipos de materia prima de biomasa para producir una amplia gama de bioproductos. Luego se pueden establecer muchas rutas de biorrefinería, desde la materia prima hasta los productos, de acuerdo con los diferentes tipos de materia prima, tecnologías de conversión y productos. El concepto de biorrefinería es análogo a la refinería de petróleo actual, que produce múltiples combustibles y productos a partir del petróleo.

Un impulsor clave para el desarrollo y la implementación de biorrefinerías es el crecimiento de la demanda de energía, combustibles y productos químicos. En consecuencia, el objetivo de la investigación es desarrollar nuevas tecnologías y crear nuevos procesos, productos y capacidades para garantizar que el crecimiento sea sostenible desde las perspectivas económica, ambiental y social. La investigación adicional y la adopción de tecnología indicarán qué nuevos productos y procesos contribuyen a un rendimiento más sostenible en comparación con los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles. El término mismo de sostenibilidad necesita un acuerdo sobre una definición y criterios comunes para su evaluación. Esto será necesario para la comunicación con las organizaciones no gubernamentales (ONG), el público en general, los reguladores y los encargados de formular políticas sobre, por ejemplo, las reducciones de CO₂.

Al desarrollar la química para futuras biorrefinerías, es importante que los métodos y técnicas utilizados minimicen el impacto en el medio ambiente y que los productos finales sean verdaderamente ecológicos y sostenibles. El uso de materias primas sostenibles no es suficiente para garantizar un futuro próspero para la generación posterior; También se requiere la protección del medio ambiente utilizando metodologías más ecológicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería de Producción del Instituto Universitario de la Paz-UNIPAZ, por el tiempo concedido para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] P. I. Capellán, M. Mediavilla, and L. J. De Castro, Carlos. Carpintero, Óscar. Miguel, "Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socioeconómicos : un enfoque integrado," *Energy*, pp. 1–62, 2014.
- [2] V. R. Moreira *et al.*, "Circular economy in biorefineries: Scale-up of anaerobic/aerobic membrane bioreactors for vinasse recycling," *J. Clean. Prod.*, vol. 377, no. September, 2022.
- [3] C. A. Cardona Alzate, Ó. J. Sánchez Toro, M. I. Montoya Rodríguez, and J. A. Quintero Suárez, "Producción de etanol carburante: material lignocelulósico una nueva alternativa," *Ing. Recur. Nat. y del Ambient.*, no. 3, pp. 47–55, 2005.
- [4] A. Gupta and J. P. Verma, "Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 550–567, 2015.
- [5] A. R. C. Morais, A. M. Da Costa Lopes, and R. Bogel-Łukasik, "Carbon dioxide in biomass processing: Contributions to the green biorefinery concept," *Chem. Rev.*, vol. 115, no. 1, pp. 3–27, 2015.
- [6] A. A. Kiss, J. P. Lange, B. Schuur, D. W. F. Brilman, A. G. J. van der Ham, and S. R. A. Kersten, "Separation technology—Making a difference in biorefineries," *Biomass and Bioenergy*, vol. 95, pp. 296–309, 2016.
- [7] S. W. Fitzpatrick, "The biofine technology: A 'bio-refinery' concept based on thermochemical conversion of cellulosic biomass," *ACS Symp. Ser.*, vol. 921, pp. 271–287, 2006.
- [8] G. Taylor, "Biofuels and the biorefinery concept," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4406–4409, 2008.
- [9] C. C. Geddes, I. U. Nieves, and L. O. Ingram, "Advances in ethanol production," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 22, no. 3, pp. 312–319, 2011.
- [10] T. Romero Cortes, J. A. Cuervo-Parra, V. José Robles-Olvera, E. Rangel Cortes, and P. A. López Pérez, "Experimental and Kinetic Production of Ethanol Using Mucilage Juice Residues from Cocoa Processing," *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 16, no. 11, 2018.
- [11] L. E. Rincón, J. Moncada, and C. A. Cardona, "Analysis of potential technological schemes for the development of oil palm industry in Colombia: A biorefinery point of view," *Ind. Crops Prod.*, vol. 52, pp. 457–465, 2014.
- [12] E. Caballero and C. Soto, "Valorization of Agro-Industrial Waste into Bioactive Compounds: Techno-Economic Considerations," *Biorefinery*, pp. 235–252, 2019.
- [13] J. Clark and F. Deswarte, "The Biorefinery Concept: An Integrated Approach," *Introd. to Chem. from Biomass Second Ed.*, vol. 9781118714485, pp. 1–29, 2015.
- [14] S. I. Mussatto *et al.*, "Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production,"

- Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 6, pp. 817–830, 2010.
- [15] E. Castillo, “Production of Cellulosic Ethanol from Palm Empty Fruit Bunches: the Perspective of Ecopetrol,” *Palmas*, vol. 2, no. 37, pp. 115–118, 2016.
- [16] T. L. Chew and S. Bhatia, “Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7911–7922, 2008.
- [17] S. Et.al, “Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador,” *Rev. Cuba. Química*, vol. 30, no. 1, pp. 143–159, 2017.
- [18] S. Samanta and R. R. Sahoo, “Waste Cooking (Palm) Oil as an Economical Source of Biodiesel Production for Alternative Green Fuel and Efficient Lubricant,” *Bioenergy Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 163–174, 2021.
- [19] L. Zhang *et al.*, “Biorefinery-oriented full utilization of food waste and sewage sludge by integrating anaerobic digestion and combustion: Synergistic enhancement and energy evaluation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 380, no. P1, p. 134925, 2022.
- [20] H. B. Carminati, R. de F. D. Milão, J. L. de Medeiros, and O. de Q. F. Araújo, “Bioenergy and full carbon dioxide sinking in sugarcane-biorefinery with post-combustion capture and storage: Techno-economic feasibility,” *Appl. Energy*, vol. 254, no. January, p. 113633, 2019.
- [21] S. Consonni, R. E. Katofsky, and E. D. Larson, “A gasification-based biorefinery for the pulp and paper industry,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 9, pp. 1293–1317, 2009.
- [22] H. A. Ruiz, R. M. Rodríguez-Jasso, B. D. Fernandes, A. A. Vicente, and J. A. Teixeira, “Hydrothermal processing, as an alternative for upgrading agriculture residues and marine biomass according to the biorefinery concept: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 35–51, 2013.
- [23] M. Mora, E. Fàbregas, F. Céspedes, J. Bartrolí, and N. Puy, “Production and separation of value-added compounds from pine wood using pyrolysis and biorefinery techniques,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 238, no. September, 2022.
- [24] S. Rehman, M. Khairul Islam, N. Khalid Khanzada, A. Kyoungjin An, S. Chairapat, and S. Y. Leu, “Whole sugar 2,3-butanediol fermentation for oil palm empty fruit bunches biorefinery by a newly isolated *Klebsiella pneumoniae* PM2,” *Bioresour. Technol.*, vol. 333, no. April, p. 125206, 2021.
- [25] A. Bouaid, N. Tardon, O. Hurtado, and J. M. Marchetti, “Enzymatic production of sustainable jojoba fatty alcohols. Biorefinery approach,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 139, pp. 89–97, 2023.
- [26] D. D. Nguyen *et al.*, “Transesterification and fuel characterization of rice bran oil: A biorefinery path,” *Fuel*, vol. 253, no. January, pp. 975–987, 2019.
- [27] C. Moustani *et al.*, “Novel aqueous-phase hydrogenation reaction of the key biorefinery platform chemical levulinic acid into Γ -valerolactone employing highly active, selective and stable water-soluble ruthenium catalysts modified with nitrogen-containing ligands,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 238, no. June, pp. 82–92, 2018.
- [28] J. K. Saini, Himanshu, Hemansi, A. Kaur, and A. Mathur, “Strategies to enhance enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for biorefinery applications: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 360, no. April, p. 127517, 2022.
- [29] C. Liu *et al.*, “Lignin-first biorefinery of corn stalk via zirconium(IV) chloride/sodium hydroxide-catalyzed aerobic oxidation to produce phenolic carbonyls,” *Bioresour. Technol.*, vol. 354, no. February, p. 127183, 2022.
- [30] S. C. Rabelo, P. Y. S. Nakasu, E. Scopel, M. F. Araújo, L. H. Cardoso, and A. C. da Costa, “Organosolv pretreatment for biorefineries: Current status, perspectives, and challenges,” *Bioresour. Technol.*, vol. 369, no. September 2022, 2023.
- [31] N. Van Duc Long, J. Hong, L. C. Nhien, and M. Lee, “Novel hybrid-blower-and-evaporator-assisted distillation for separation and purification in biorefineries,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 123, no. August 2017, pp. 195–203, 2018.
- [32] F. Temelli and O. N. Ciftci, “Developing an integrated supercritical fluid biorefinery for the processing of grains,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 96, pp. 77–85, 2015.
- [33] B. Kumar, N. Bhardwaj, K. Agrawal, V. Chaturvedi, and P. Verma, “Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 199, no. July 2019, 2020.
- [34] J. M. Sigüencia Avila, J. W. Delgado Noboa, F. R. Posso Rivera, and J. P. Sánchez Quezada, “Estimación del potencial de producción de bioetanol para los residuos de la corteza del cacao en Ecuador,” *Cienc. Tecnol. Agropecu.*, vol. 21, no. 3, pp. 1–20, 2020.
- [35] E. A. Llanes Cedeño, “Producción e Impacto del Biodiesel: Una Revisión,” *INNOVA Res. J.*, vol. 2, no. 7, pp. 59–76, 2017.



Karen Vanessa Mateus Calderón 1. Ingeniera Química de la Universidad de Santander-UIS, y docente investigadora del Instituto Universitario de la Paz-UNIPAZ. Su Investigación más reciente, enfocada en el desarrollo de procesos sostenibles, se basa en el aprovechamiento y valorización de residuos electrónicos para la producción de materiales oxidantes funcionales en la descontaminación del agua.