



UNIVERSIDAD TÉCNICO FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DEL BIOETANOL:
EVALUACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS A PARTIR DE RESIDUOS
AGRÍCOLAS**

Trabajo de Titulación para optar al
Título Técnico Universitario en
INGENIERÍA DE EJECUCIÓN EN
GESTIÓN Y CONTROL
AMBIENTAL

Alumno:

Paula Carmona Aravena

Profesor Guía:

Dr. Daniel Moena_Flandes

RESUMEN

Este trabajo se centra en la optimización del proceso de producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas, presentando una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. El bioetanol, como biocombustible renovable, desempeña un papel clave en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la eficiencia de su producción depende en gran medida de las tecnologías aplicadas en cada una de las etapas del proceso.

Los residuos agrícolas, frecuentemente subutilizados o desechados, poseen un alto potencial energético. Este estudio investiga cómo la integración de tecnologías emergentes en las fases de pretratamiento, fermentación y destilación puede mejorar la eficiencia energética del proceso de producción de bioetanol. Además, al aprovechar estos residuos para otros productos como biogás o fertilizantes, se contribuye al impulso de una economía circular.

El objetivo principal de esta investigación es identificar y evaluar las tecnologías clave que optimicen la producción de bioetanol, promoviendo la sostenibilidad y minimizando su impacto ambiental. Adicionalmente, se busca generar recomendaciones prácticas para mejorar la eficiencia del proceso y aprovechar de manera más eficaz los recursos agrícolas disponibles.

KEYWORDS: SOSTENIBILIDAD, BIOCOMBUSTIBLE, EMISIONES, RESIDUOS, EFICIENCIA ENERGÉTICA, SOSTENIBILIDAD.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
SIGLAS	7
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES SOBRE EL BIOETANOL	4
1. ANTECEDENTES GENERALES.....	5
1.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN	6
1.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES.....	9
1.3 PRODUCCIÓN GLOBAL Y REGIONAL.....	16
CAPÍTULO II: PROCESO PRODUCTIVO DEL BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS AGRÍCOLAS.....	20
2. PROCESO PRODUCTIVO DEL BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS AGRÍCOLAS	21
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO	21
2.2 DESAFÍOS DEL PROCESO ACTUAL	25
2.3 CASOS DE ÉXITO EN EL USO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS	26
CAPÍTULO III: PROPUESTA DE MEJORA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN	30
3. PROPUESTA DE MEJORA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN	31
3.1 DIAGNÓSTICO DE COSTOS EN EL PROCESO ACTUAL.....	31
3.2 INNOVACIONES TECNOLÓGICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN	34
3.3 COMPARATIVA DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD	36

DISCUSIÓN.....	46
CONCLUSIÓN	47
BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Recopilación de antecedentes relacionados al bioetanol	6
Figura 1-2: Modelo T de Henry Ford.	7
Figura 1-3: Emisiones mundiales de CO ₂	15
Figura 1-4: Producción global de bioetanol en campaña 2005/2006.	17
Figura 2-1: Esquema simplificado de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar. 21	
Figura 2-2: Gráfica que ilustra muchas de las estrategias de reducción de la intensidad de carbono de POET.	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Resumen y comparación de las características del bioetanol.....	10
Tabla 1-2: Poder calorífico de distintos combustibles.....	11
Tabla 1-3: Poder calorífico de distintos combustibles.....	15
Tabla 3-1: Resumen de factores claves en el diagnóstico de costos.....	33
Tabla 3-2: Resumen de las etapas del proceso productivo	39

SIGLAS

GEI:	Gas de efecto invernadero
EIA:	Agencia Internacional de Energía
EE.UU:	Estados Unidos
RFS:	Renewable Fuel Standard
CO ₂ :	Dióxido de Carbono
CO:	Monóxido de Carbono
SO ₂ :	Dióxido de Azúfre
NO _x :	Óxidos de Nitrógeno
C ₂ H ₅ OH:	Etanol

SIMBOLOGÍA

°C:	Grado Celsius
Kg:	Kilogramo
g:	Gramo
Cm:	Centímetro
MJ:	Megajuls
Nº:	Número

INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles es una prioridad global, especialmente frente a la creciente crisis climática, el agotamiento de los recursos fósiles y las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero (IEA, 2022). Los combustibles fósiles, responsables de la mayor parte del consumo energético mundial, no solo contribuyen al calentamiento global, sino que también generan problemas asociados como la contaminación del aire y la dependencia energética de ciertos países. En este escenario, los biocombustibles, particularmente el bioetanol, han surgido como una alternativa viable, capaz de mitigar estos impactos negativos. El bioetanol no solo tiene el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con los combustibles fósiles tradicionales, sino que también contribuye al desarrollo económico y a la diversificación de las fuentes energéticas (Demirbas, 2009).

Una de las principales ventajas del bioetanol radica en su capacidad para ser producido a partir de recursos renovables, como residuos agrícolas lignocelulósicos. Estos residuos, que incluyen pajas, cáscaras, bagazos y otros desechos agrícolas, son generados en grandes cantidades a nivel global y, en muchos casos, son subutilizados o gestionados de manera ineficiente, como su quema a cielo abierto, que agrava la contaminación del aire. Su aprovechamiento como materia prima no solo disminuye la presión sobre los cultivos alimenticios, sino que también ofrece una solución a la acumulación de desechos agrícolas, fomentando una economía circular (Zabed et al., 2017).

A pesar de las ventajas, la producción de bioetanol enfrenta desafíos significativos, como la eficiencia del pretratamiento de los residuos lignocelulósicos, los costos asociados a las enzimas utilizadas en la hidrólisis y la integración de tecnologías más sostenibles y escalables. En los últimos años, se han desarrollado tecnologías emergentes, como pretratamientos fisicoquímicos avanzados, procesos de fermentación simultánea y nuevas estrategias de biorefinería, que buscan superar

estas barreras y mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del proceso (Agbor et al., 2011; AINIA, 2022).

El presente trabajo tiene como objetivo identificar y evaluar estas tecnologías emergentes aplicadas a la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas. Se abordará el análisis de su eficiencia energética e impacto ambiental con el fin de proponer estrategias prácticas que maximicen el aprovechamiento de estos desechos. Además, se explorará cómo estas tecnologías pueden integrarse en procesos industriales complementarios contribuyendo a una economía circular y sostenible.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de producción del bioetanol a partir de residuos agrícolas, incorporando tecnologías emergentes y promoviendo la economía circular, con el fin de mejorar la eficiencia energética, reducir el impacto ambiental y generar beneficios económicos y sociales en áreas rurales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar la relevancia del bioetanol como combustible renovable.
2. Explorar el potencial de los residuos agrícolas como materia prima para la producción de bioetanol, identificando los tipos de residuos más adecuados y evaluando su valor energético en comparación con otras fuentes de biomasa.
3. Investigar las tecnologías emergentes aplicables en las etapas de pretratamiento, fermentación y destilación del proceso de producción de bioetanol.
4. Evaluar el impacto ambiental de la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES SOBRE EL BIOETANOL

1. ANTECEDENTES GENERALES

El bioetanol es un biocombustible producido principalmente a partir de materiales orgánicos ricos en carbohidratos, como caña de azúcar, maíz y otros cultivos. Su uso como fuente de energía alternativa ha ganado relevancia debido a su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la seguridad energética y fomentar el desarrollo rural sostenible (Velásquez-Arredondo et al., 2010; Restrepo-Tarquino et al., 2021).

A lo largo de los años, el bioetanol ha evolucionado desde un simple aditivo de gasolina hasta convertirse en un combustible principal en diversas regiones, particularmente en países como Brasil y Estados Unidos, que lideran su producción a nivel mundial (CEPAL, 2014).

Este capítulo se centrará en contextualizar el desarrollo histórico, las características y el panorama actual de la producción global y regional de bioetanol, sentando las bases para analizar los desafíos y oportunidades en su optimización a partir de residuos agrícolas. Estos residuos, que incluyen bagazo de caña, paja de trigo y mazorcas de maíz, presentan un alto potencial para su valorización en biocombustibles avanzados, evitando la competencia con la producción de alimentos (Gómez-Castro et al., 2014; Quintero et al., 2008).

1.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN

El bioetanol, como combustible, tiene una historia ligada al desarrollo de los motores de combustión interna. A continuación, se detalla su evolución:

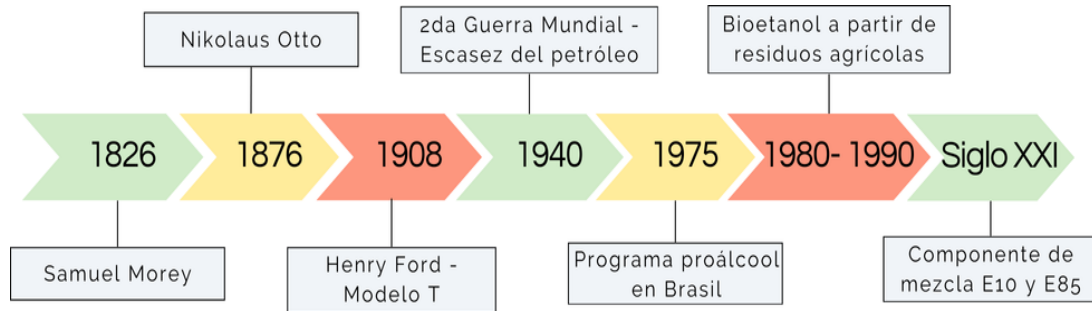


Figura 1-1: Recopilación de antecedentes relacionados al bioetanol

Fuente: Elaboración propia utilizando herramienta web Canva

1.1.1 PRIMEROS DESARROLLOS (SIGLO XIX)

La historia del bioetanol comienza con la experimentación en motores de combustión interna. En 1826, Samuel Morey utilizó alcohol como combustible en su motor, aunque su uso fue experimental. En 1876, Nikolaus Otto perfeccionó el motor de combustión interna y utilizó alcohol como una fuente de energía alternativa, abriendo la puerta a los biocombustibles como opción energética. Estos primeros pasos fueron cruciales, aunque el etanol no llegó a ser ampliamente utilizado hasta mucho después debido a la falta de infraestructura.

1.1.2 INICIOS DEL SIGLO XX

A principios del siglo XX, los avances en la automoción generaron un renovado interés en los biocombustibles. En 1908, Henry Ford diseñó el Modelo T, un automóvil que podía funcionar con etanol. Ford reconoció las ventajas del etanol como combustible renovable, económico y disponible en abundancia, especialmente en áreas rurales. Esto representó un hito en la historia del bioetanol, ya que el uso de

este combustible en los automóviles fue visto como una alternativa viable a los combustibles fósiles.

En 1925 Henry Ford declaraba a un reportero del New York Times, que el etanol (alcohol etílico) era el combustible del futuro, opinión ampliamente compartida en la industria automovilística. Como apunte, Rudolph Diesel diseñó su motor (DIESEL) para ser utilizado con aceite de cáñamo. Ford llegó a decir: "El combustible del futuro se obtendrá de la fruta, rastrojos, serrín, cualquier cosa. Hay combustible en cualquier materia vegetal que pueda ser fermentada. Se obtiene suficiente alcohol, en la cosecha anual de 1 acre de patata, para operar la maquinaria necesaria en el cultivo de ese acre durante 100 años". [6]



Figura 1-2: Modelo T de Henry Ford.

Fuente: Wikipedia [7]

1.1.3 PROGRESOS DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL

Durante la Segunda Guerra Mundial, las naciones que se vieron afectadas por la escasez de petróleo comenzaron a explorar alternativas energéticas. El bioetanol fue una de las soluciones más atractivas, especialmente en países como Estados Unidos y Brasil. En 1941, en Brasil, el gobierno comenzó a utilizar etanol como aditivo en la gasolina para aumentar la autonomía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Esta época también marcó un punto de inflexión en el reconocimiento del bioetanol como una solución energética viable, aunque no a gran escala. (Wikipedia, s. f.).

1.1.4 PROGRAMA PROÁLCOOL EN BRASIL (1975)

El Programa Proálcool, lanzado por Brasil en 1975, fue una respuesta directa a la crisis del petróleo de 1973. Este programa promovió la producción de etanol a partir de caña de azúcar para sustituir parte de las importaciones de petróleo. Proálcool no solo favoreció la industria azucarera, sino que permitió a Brasil convertirse en un líder mundial en la producción de bioetanol. Además, este programa sentó las bases para el modelo de biocombustibles basado en cultivos energéticos que ha influido en políticas energéticas en todo el mundo. (SciDev.net, 2013).

1.1.5 FINALES DEL SIGLO XX Y AVANCES TECNOLÓGICOS

En las décadas de 1980 y 1990, la evolución de la tecnología permitió la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos, como residuos agrícolas. Esto dio lugar a la creación de los biocombustibles de segunda generación, que no compiten con los cultivos alimentarios. Este avance permitió que el bioetanol fuera producido a partir de una mayor variedad de fuentes, mejorando la sostenibilidad del proceso y reduciendo la presión sobre los recursos agrícolas. Además, se introdujeron nuevas técnicas de fermentación y destilación que hicieron más eficiente el proceso. (Motta & Suárez, 2012).

1.1.6 SIGLO XXI: AVANCES Y USO GLOBAL

Hoy en día, el bioetanol es una pieza clave en la estrategia global para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar las fuentes de energía. En

países como Brasil y Estados Unidos, el bioetanol se mezcla con gasolina para crear combustibles más limpios, como el E85 (85% etanol). Además, la industria continúa investigando nuevas formas de optimizar la producción de bioetanol, como la fermentación de algas y otros residuos biológicos. La tecnología avanza hacia una producción aún más eficiente y menos dependiente de los cultivos alimentarios. (Bolsa de Comercio de Rosario, 2023).

1.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

El bioetanol es un tipo de alcohol que se obtiene principalmente a través de la fermentación de azúcares presentes en cultivos como la caña de azúcar, el maíz y, más recientemente, residuos agrícolas. Como biocombustible renovable, se utiliza principalmente como aditivo en la gasolina o como sustituto parcial de la misma, con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. (Repsol, s.f.).

1.2.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOETANOL

El bioetanol es un alcohol simple (C_2H_5OH) que posee una serie de características que lo convierten en un combustible atractivo. Una de sus principales ventajas es que proviene de fuentes renovables, es decir, su producción puede repetirse sin agotar los recursos naturales. Además, el bioetanol tiene un alto contenido energético, con un poder calorífico de aproximadamente 29.7 MJ/kg, que lo hace apto para su uso en motores de combustión interna. A diferencia de los combustibles fósiles, el bioetanol produce menos emisiones de gases contaminantes como CO_2 cuando se produce y utiliza de manera adecuada (Bioethanolshop.nl, 2019).

Entre sus características destacadas se encuentran:

a) Renovabilidad:

- Fuente sostenible: A diferencia de los combustibles fósiles, que se forman a lo largo de millones de años, el bioetanol se deriva de materias primas renovables, lo que garantiza su disponibilidad continua.

- Ciclo de carbono cerrado: Durante su combustión, el bioetanol libera dióxido de carbono (CO₂), pero este puede ser reabsorbido por las plantas en el siguiente ciclo de producción, contribuyendo a reducir el impacto neto de las emisiones de GEI.

Tabla 1-1: Resumen y comparación de las características del bioetanol.

Fuente de energía	Materia Prima	Renovabilidad	Disponibilidad	Impacto Ambiental
Bioetanol	Residuos agrícolas	Renovable	Amplia	Bajo
Biogas	Residuos orgánicos	Renovable	Alta	Bajo
Energía solar	Radiación solar	Inagotable	Depende	Mínimo
Energía eólica	Viento	Inagotable	Depende	Mínimo
Combustible fósil	Petróleo, carbón, gas natural	No renovable	Alta	Alto

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 1-1, el bioetanol se posiciona como una alternativa competitiva dentro de las fuentes renovables. Su dependencia de residuos agrícolas y cultivos energéticos no solo lo hace sostenible, sino que también promueve el aprovechamiento de subproductos que de otro modo serían desechados. Esto contrasta marcadamente con los combustibles fósiles, cuya extracción y uso implican una huella ambiental significativamente mayor. De este modo, el

desarrollo del bioetanol se alinea con los principios de economía circular y transición energética hacia un futuro más sostenible.

b) Alto poder calorífico:

- El poder calorífico es una medida clave para evaluar la cantidad de energía que un combustible puede liberar durante su combustión. Esta comparación resalta la posición del bioetanol frente a otros combustibles convencionales y alternativos, considerando su capacidad energética y sus posibles usos en motores y sistemas de energía. Ver tabla 1-2.
- Aunque su poder calorífico (29.7 MJ/kg) es ligeramente inferior al de la gasolina, el bioetanol sigue siendo una fuente energética eficiente y adecuada para motores de combustión interna. Su mezcla con combustibles fósiles, como en el caso del etanol al 10% (E10), optimiza el desempeño energético al tiempo que disminuye la dependencia de los hidrocarburos.

Tabla 1-2: Poder calorífico de distintos combustibles

Combustible	Poder calorífico (MJ/kg)
Bioetanol	29,7
Gasolina	44,4
Biodiésel	37,8
Gas natural	55,5
Hidrógeno	120,0
Carbón	24,0

Fuente: Elaboración propia

c) Bajo impacto ambiental:

- Menores emisiones contaminantes: El bioetanol genera menos emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos y partículas en comparación con los combustibles fósiles.
- Biodegradabilidad: Su naturaleza orgánica facilita su descomposición en el medio ambiente, reduciendo el riesgo de contaminación en caso de derrames.
- Potencial para el uso circular: Al integrarse residuos agrícolas o forestales en su producción, se promueve la economía circular, disminuyendo la presión sobre los ecosistemas.

d) Compatibilidad técnica:

- El bioetanol puede utilizarse en motores de combustión interna modificados o en mezclas con gasolina sin necesidad de realizar cambios significativos en la infraestructura existente. Esto facilita su adopción en sistemas de transporte convencionales.

e) Contribución a la independencia energética:

- El uso de bioetanol fomenta la diversificación de fuentes energéticas, reduciendo la dependencia de las importaciones de petróleo y fortaleciendo la seguridad energética de los países.

f) Potencial para aplicaciones industriales y domésticas:

- Además de su uso como biocombustible, el bioetanol también se utiliza en la industria química, farmacéutica y cosmética, ampliando su rango de aplicaciones y su valor económico.

1.2.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

El bioetanol tiene propiedades que lo hacen apto para ser utilizado como combustible. Estas propiedades fisicoquímicas son fundamentales para su rendimiento en motores y su almacenamiento:

Punto de ebullición:

- El punto de ebullición del bioetanol es 78.37 °C, lo que permite que se evapore a temperaturas relativamente bajas, facilitando su combustión en motores de vehículos.

a) Densidad:

- La densidad del bioetanol es de aproximadamente 0.789 g/cm³ a 20°C, lo que implica que es más ligero que la gasolina (0.75 a 0.77 g/cm³). Esto significa que, para obtener la misma cantidad de energía, se necesita un mayor volumen de bioetanol en comparación con la gasolina.

b) Solubilidad en agua:

- El bioetanol es completamente miscible con agua, lo que le permite mezclarse fácilmente con otros líquidos, pero también puede presentar desafíos en cuanto a almacenamiento y manejo debido a la formación de soluciones acuosas.

c) Viscosidad:

- La viscosidad del bioetanol es baja, lo que permite que fluya fácilmente a través de los sistemas de distribución de combustible en los motores sin obstrucciones.

1.2.3 PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN

En términos de combustión, el bioetanol tiene varias ventajas, pero también algunos aspectos que deben considerarse al usarlo como sustituto de la gasolina. Aunque el bioetanol tiene un poder calorífico más bajo que la gasolina (aproximadamente un 30% menos), su capacidad para mezclarse con la gasolina permite que sea utilizado eficazmente en motores de combustión interna.

a) Poder calorífico:

- Aunque el poder calorífico del bioetanol es menor que el de la gasolina, esta diferencia puede compensarse con mezclas de etanol y gasolina (por ejemplo, E10, que es 10% etanol y 90% gasolina, o E85, que es 85% etanol).

b) Combustión:

- La combustión del bioetanol produce menos monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂) que la gasolina, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación. Sin embargo, como cualquier proceso de combustión, también genera óxidos de nitrógeno (NO_x) en ciertas condiciones de alta temperatura.

1.2.4 MEZCLAS DE BIOETANOL CON OTROS COMBUSTIBLES

El bioetanol se utiliza principalmente en mezclas con gasolina, lo que ha demostrado ser una alternativa eficiente y menos contaminante a la gasolina pura. Las mezclas comunes incluyen E10 (10% etanol y 90% gasolina) y E85 (85% etanol y 15% gasolina). Estas mezclas son comunes en países como Brasil y Estados Unidos, donde se promueve su uso debido a sus beneficios ambientales y económicos.

Las ventajas de las mezclas de bioetanol incluyen:

a) Reducción de emisiones de CO₂:

- Las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida del bioetanol (desde su producción hasta su consumo) son generalmente menores que las de la gasolina, contribuyendo a mitigar el cambio climático.

Tabla 1-3: Poder calorífico de distintos combustibles

Combustible/ Mezcla	Emisión CO ₂ (g/km)
Gasolina pura	240- 260
E10 (10% bioetanol)	200- 220
E85 (85% bioetanol)	60- 80
Biodiésel	160- 200
Gas natural	100- 120

Fuente: Elaboración propia

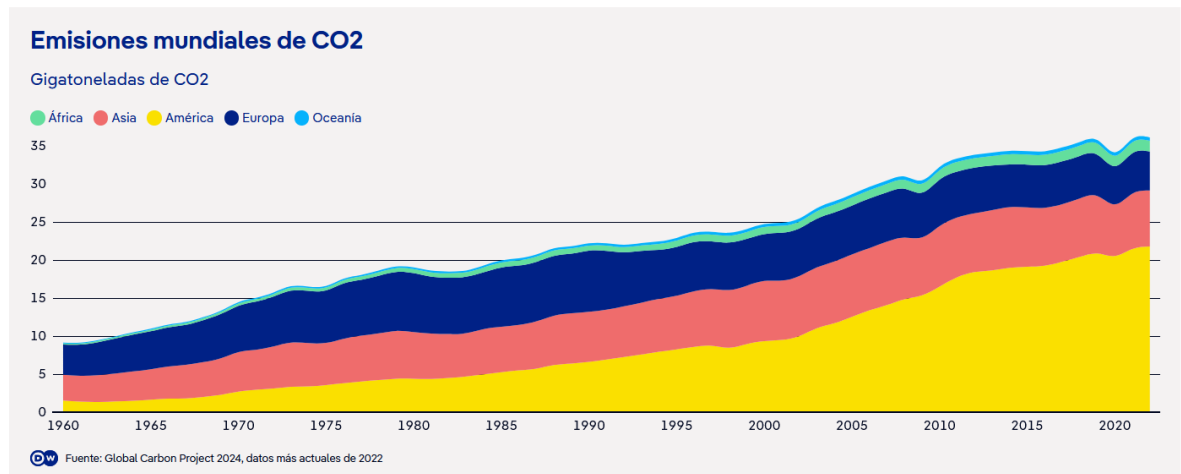


Figura 1-3: Emisiones mundiales de CO₂

Fuente: Global Carbon Project 2024

El uso de mezclas de bioetanol, especialmente en proporciones altas como E85, demuestra un potencial significativo para reducir las emisiones de CO₂ en comparación con combustibles fósiles como la gasolina pura. Esto se debe a que el bioetanol captura carbono durante su ciclo de vida, compensando parte de las emisiones generadas durante su combustión. De esta manera, su integración en la matriz energética contribuye a mitigar el cambio climático mientras se avanza hacia un sistema de transporte más sostenible.

b) Mayor octanaje:

- El bioetanol tiene un índice de octano más alto que la gasolina, lo que ayuda a evitar el golpeteo del motor y mejora la eficiencia de la combustión, lo que puede traducirse en un mejor rendimiento del vehículo.

1.3 PRODUCCIÓN GLOBAL Y REGIONAL

El bioetanol ha experimentado un crecimiento significativo en su producción y utilización a nivel global, impulsado por la necesidad de fuentes de energía renovables, la reducción de las emisiones de gases contaminantes y la diversificación de las fuentes de combustibles. Los principales países productores de bioetanol han aprovechado sus recursos agrícolas y políticas de incentivo para posicionarse como líderes en la producción y uso de este biocombustible. A continuación, se detallan las principales características de la producción de bioetanol a nivel global y en algunas regiones clave.

1.3.1 PRODUCCIÓN GLOBAL

A nivel mundial, la producción de bioetanol se ha incrementado significativamente en las últimas décadas. Según datos de 2022, Estados Unidos y Brasil juntos producen aproximadamente el 80% del etanol mundial, consolidándose como los

principales productores de este biocombustible (HedgePoint Global Markets, 2023).

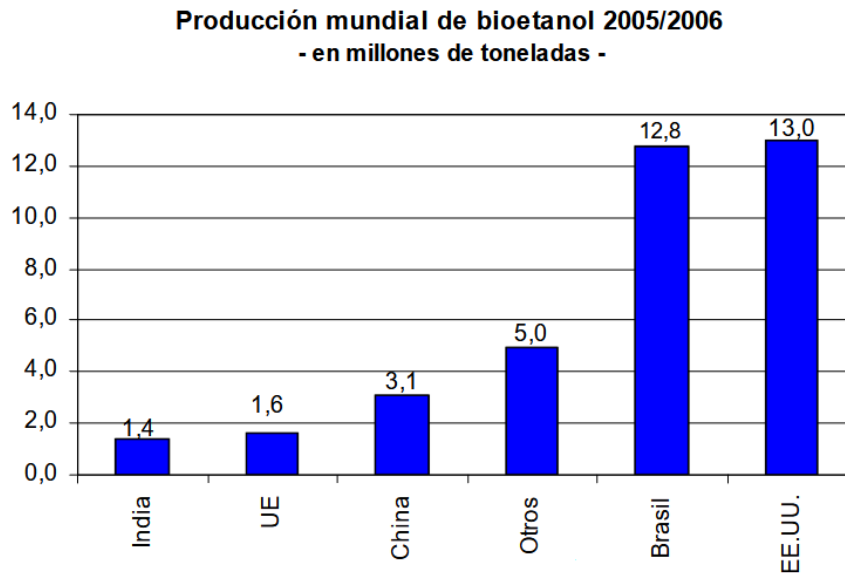


Figura 1-4: Producción global de bioetanol en campaña 2005/2006.

Fuente: F.O. Licht, FAPRI 2006 – 15/21 [9]

a) Brasil:

Brasil es uno de los mayores productores y consumidores de bioetanol en el mundo. Desde la implementación del Programa Proálcool en 1975, el país ha estado a la vanguardia de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar. En 2023, la producción de etanol y biodiésel en Brasil alcanzó casi 43.000 millones de litros, consolidando su posición en el mercado global (OpenDemocracy, 2023).

b) Estados Unidos:

Estados Unidos es otro de los grandes productores de bioetanol, especialmente derivado del maíz. Con más de 210 plantas de etanol repartidas por el cinturón de maíz del país, es capaz de producir más de 58.7 mil millones de litros de etanol por año, representando una parte significativa del mercado mundial (U.S. Grains Council, s.f.).

c) Unión Europea:

En Europa, la producción de bioetanol ha crecido considerablemente, aunque no al mismo ritmo que en Brasil o Estados Unidos. Los países de la UE producen principalmente etanol a partir de cultivos como el trigo, la remolacha azucarera y el maíz. En 2022, la Unión Europea produjo aproximadamente 17.610 millones de litros de etanol, destinando una parte significativa al mercado interno (Bolsa de Comercio de Rosario, s.f.).

d) China y otros países asiáticos:

China, aunque no es un gran productor en términos absolutos, ha incrementado su producción de bioetanol en los últimos años. En 2022, China produjo alrededor de 3% del total mundial de bioetanol, reflejando su interés en reducir la dependencia del petróleo importado y mejorar la seguridad energética (Tecnicaña, 2024).

1.3.2 PRODUCCIÓN REGIONAL

a) América Latina:

- América Latina, liderada por Brasil, es una región clave en la producción de bioetanol. México también ha comenzado a incrementar su producción y está promoviendo políticas para utilizar más biocombustibles, incluidos programas para producir bioetanol a partir de residuos agrícolas. (CEPAL, 2007).

b) Asia:

- En Asia, India ha comenzado a adoptar el bioetanol de manera más activa en los últimos años, impulsado por políticas gubernamentales que fomentan la producción a partir de cultivos como el arroz. China también ha mostrado interés en ampliar la producción de bioetanol como parte de su estrategia para diversificar las fuentes de energía y reducir las emisiones. (Aris Bioenergía, 2020)

c) África:

- La producción de bioetanol en África es aún incipiente, aunque algunos países están explorando la producción a pequeña escala para el consumo local y el abastecimiento de combustible en áreas rurales. En Sudáfrica, el etanol se utiliza principalmente como aditivo en la gasolina, pero el potencial de expansión en el continente es alto, dada la cantidad de residuos agrícolas y cultivos disponibles. (Marques, 2018).

1.3.3 DESAFIOS Y OPORTUNIDADES

a) Desafíos:

- A pesar del crecimiento de la producción de bioetanol, existen varios desafíos que incluyen las preocupaciones sobre la sostenibilidad de la producción de bioetanol a partir de cultivos alimentarios, los impactos ambientales asociados con el uso intensivo de tierras agrícolas y la competencia con la producción de alimentos. La conversión de cultivos alimentarios en biocombustibles ha generado preocupaciones sobre la seguridad alimentaria, especialmente en países en desarrollo.

b) Oportunidades:

- El desarrollo de tecnologías avanzadas, como los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos y lignocelulosa, ofrece una oportunidad para superar estos desafíos. Además, el crecimiento del mercado global de biocombustibles y las políticas de transición energética en varios países abren nuevas oportunidades para los productores de bioetanol.

**CAPÍTULO II: PROCESO PRODUCTIVO DEL BIOETANOL A PARTIR
DE RESIDUOS AGRÍCOLAS**

2. PROCESO PRODUCTIVO DEL BIOETNAOL A PARTIR DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

El proceso productivo del bioetanol a partir de residuos agrícolas comprende varias etapas clave que transforman los materiales lignocelulósicos en bioetanol. Este proceso no solo promueve la reutilización de residuos, sino que también reduce la dependencia de materias primas alimenticias como el maíz o la caña de azúcar. (Rodríguez García, 2019).

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

El proceso de producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas consta de varias etapas clave, ver figura 2-1, cada una de las cuales desempeña un papel crucial en la conversión eficiente de biomasa en etanol. Estas etapas se detallan a continuación:

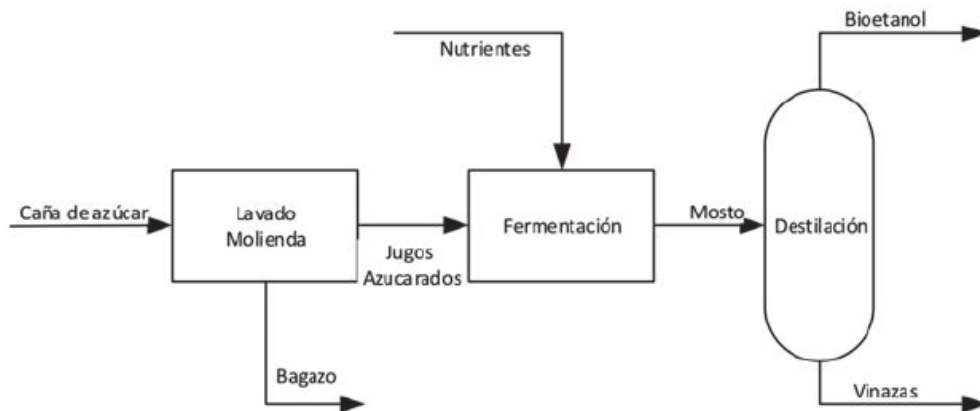


Figura 2-1: Esquema simplificado de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar.

Fuente: Sánchez, M. (2015).

2.1.1 RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

La primera etapa consiste en la recolección de residuos lignocelulósicos derivados de actividades agrícolas, tales como paja, bagazo de caña, mazorcas de maíz, cáscaras y otros subproductos vegetales. Estos materiales, que suelen tener un bajo valor comercial y estar ampliamente disponibles, son sometidos a un proceso de limpieza para eliminar impurezas como tierra, piedras o contaminantes. Posteriormente, se acondicionan mediante operaciones como la trituración para reducir el tamaño de las partículas y el secado para ajustar el contenido de humedad, lo cual mejora su manejo y eficiencia en las etapas posteriores. (Yenque & Rodríguez, 2020).

2.1.2 PRETRATAMIENTO

En esta etapa, los residuos lignocelulósicos son sometidos a procesos destinados a descomponer la estructura compleja de la biomasa. La lignina, un componente recalcitrante que protege a la celulosa y hemicelulosa, se rompe mediante tratamientos físicos, químicos o biológicos. Entre los métodos más comunes se encuentran:

a) **Hidrólisis ácida:**

La hidrólisis ácida utiliza ácido diluido o concentrado para descomponer la lignina y liberar azúcares de las fracciones de celulosa y hemicelulosa presentes en la biomasa. Este proceso es efectivo para romper los enlaces de los polímeros de lignina, pero puede requerir condiciones de temperatura y presión moderadas. Sin embargo, el uso de ácidos fuertes puede causar problemas de corrosión y alto coste operativo, además de que los subproductos generados, como los derivados del ácido, pueden inhibir las enzimas durante las etapas de hidrólisis y fermentación.

b) **Hidrólisis alcalina:**

En este método se emplean soluciones alcalinas para romper los enlaces entre la lignina y los carbohidratos, facilitando así la accesibilidad de las

enzimas. La hidrólisis alcalina es menos eficaz que la hidrólisis ácida para romper la lignina, pero presenta ventajas como la menor corrosividad y menor riesgo de generar subproductos inhibidores. Sin embargo, el consumo de energía puede ser alto y la solubilización de azúcares puede ser menos eficiente debido a la reactividad limitada de las soluciones alcalinas.

c) Explosión con vapor:

La explosión con vapor somete la biomasa a altas temperaturas y presiones, y luego se libera rápidamente la presión. Este proceso provoca un choque térmico que rompe la estructura lignocelulósica, liberando azúcares y facilitando la accesibilidad de las enzimas. Es un método eficaz para reducir la recalcitrancia de la biomasa, aunque puede generar problemas de alta energía consumida y la posible generación de compuestos inhibidores que pueden afectar la fermentación.

El objetivo principal del pretratamiento es maximizar la accesibilidad de las enzimas en las etapas posteriores del proceso de producción de bioetanol, reduciendo al mínimo las pérdidas de azúcares y limitando la generación de inhibidores que puedan afectar la eficiencia del proceso. Además, el pretratamiento busca optimizar las condiciones de proceso para minimizar los costos operativos y maximizar la eficiencia energética, convirtiéndose así en un factor determinante en la rentabilidad de la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas.

2.1.3 HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

En esta fase, las enzimas específicas, como celulasas y hemicelulasas, catalizan la descomposición de la celulosa y hemicelulosa en azúcares simples, principalmente glucosa y xilosa. Este proceso se lleva a cabo bajo condiciones controladas de temperatura y pH, que optimizan la actividad enzimática. La eficiencia de esta etapa es crucial, ya que determina la cantidad de azúcares disponibles para la fermentación.

2.1.4 FERMENTACIÓN

Los azúcares liberados durante la hidrólisis enzimática son convertidos en etanol por microorganismos, principalmente levaduras del género *Saccharomyces*. En algunos casos, se emplean cepas modificadas genéticamente capaces de fermentar tanto azúcares hexosas como pentosas, lo que mejora significativamente el rendimiento global del proceso. Las condiciones de fermentación, como la temperatura, pH y concentración de nutrientes, son cuidadosamente controladas para maximizar la producción de etanol.

2.1.5 DESTILACIÓN

El producto de la fermentación contiene etanol junto con agua y otros compuestos secundarios. Para separar el etanol y aumentar su concentración hasta un 95%, se utiliza un proceso de destilación. En aplicaciones que requieren etanol anhidro (99.5% de pureza o más), se implementan procesos adicionales de deshidratación, como la adsorción con tamices moleculares o el uso de columnas de destilación con agentes deshidratantes.

2.1.6 TRATAMIENTO DE SUBPRODUCTOS

La etapa final del proceso se centra en el manejo y valorización de los subproductos generados. Los residuos sólidos, como la lignina y otros compuestos no fermentables, pueden ser utilizados como combustibles para generar energía térmica, como fertilizantes orgánicos o como materia prima para la producción de químicos de alto valor agregado. Este enfoque no solo reduce el impacto ambiental, sino que también mejora la rentabilidad del proceso al aprovechar al máximo todos los componentes de la biomasa.

2.2 DESAFÍOS DEL PROCESO ACTUAL

Aunque la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas ofrece numerosos beneficios, enfrenta varios desafíos técnicos, económicos y logísticos:

a) Costos elevados de pretratamiento:

- La etapa de pretratamiento es una de las más costosas y energéticamente intensivas en el proceso de producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas. Durante este proceso, se separan las fibras de celulosa de los residuos lignocelulósicos como la paja de trigo o cáscaras de maíz. Este tratamiento requiere alta inversión en energía y química especializada, lo que incrementa los costos de producción y limita la competitividad del bioetanol frente a los combustibles fósiles más baratos y más sencillos de procesar. (Dialnet, n.d.).

b) Eficiencia enzimática:

- La utilización de enzimas en la hidrólisis enzimática es crucial para convertir los residuos lignocelulósicos en azúcares fermentables. Sin embargo, estas enzimas son caras y su efectividad puede verse afectada por la composición del material lignocelulósico. Variaciones en la estructura del residuo pueden reducir la degradación completa de la celulosa y hemicelulosa, disminuyendo la eficiencia del proceso y aumentando los costos de producción. (Studies Publicações, 2019).

c) Recolección y transporte de residuos:

- La dispersión geográfica de los residuos agrícolas plantea un reto significativo en términos de recolección y transporte eficientes. Los costos logísticos asociados con la recolección y transporte de grandes volúmenes de residuos agrícolas desde áreas dispersas aumentan significativamente la huella de carbono del proceso. Además, una infraestructura de transporte inadecuada puede llevar a la pérdida de residuos que no se recogen o utilizan

de manera óptima, limitando la disponibilidad de materia prima para la producción de bioetanol. (PetroPunto, 2021).

d) Competencia por el uso de residuos:

- En muchas regiones, los residuos agrícolas tienen otros usos económicos, como alimento para ganado o producción de energía. Esta competencia por el uso de los residuos puede reducir su disponibilidad para la producción de bioetanol, especialmente en contextos donde otros usos son más rentables. Esto requiere una planificación cuidadosa y adaptativa para garantizar que haya suficientes recursos disponibles para la producción de biocombustibles. (PetroPunto, 2021).

e) Integración de tecnologías emergentes:

- La implementación de tecnologías avanzadas en la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas, como la fermentación de celulosa o la combinación con microalgas, requiere una inversión inicial significativa y capacitación especializada. Estos procesos también demandan una infraestructura adecuada para su implementación y operación efectiva. La adopción masiva de estas tecnologías puede verse obstaculizada por barreras económicas y logísticas, que incluyen el acceso limitado a financiamiento y a recursos tecnológicos en algunas regiones. (Editverse, 2020).

2.3 CASOS DE ÉXITO EN EL USO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

A pesar de los desafíos, existen ejemplos exitosos de plantas y proyectos que han logrado producir bioetanol a partir de residuos agrícolas:

a) Programa Proálcool en Brasil:

- La producción de bioetanol en Brasil ha sido un caso de éxito destacado, especialmente a través del programa Proálcool iniciado en la década de 1970. Este programa tenía como objetivo reducir la dependencia de los combustibles fósiles mediante la expansión de la producción de etanol,

utilizando principalmente caña de azúcar como materia prima. Brasil invirtió significativamente en tecnología y expansión agrícola, alcanzando una producción superior al 8% del objetivo en 1985 durante la crisis energética global. A pesar de los desafíos en la década de los 90, cuando el biocombustible se volvió menos competitivo debido a la baja de los precios del petróleo, Brasil ha mantenido su relevancia en el mercado global gracias a mejoras en la eficiencia productiva y adaptaciones estratégicas en respuesta a los cambios de precio del petróleo y la demanda global de energía.

Brasil ha demostrado que a través de políticas y tecnologías adecuadas, puede mantener una industria robusta de bioetanol, lo que no solo ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también crea empleo y fomenta la seguridad energética. Al utilizar caña de azúcar como principal fuente de materia prima, el país ha establecido un modelo de producción que combina sostenibilidad con competitividad económica. Este enfoque no solo contribuye a la economía local, sino que también ha convertido a Brasil en un líder mundial en la producción de bioetanol, con políticas de mezcla obligatoria y regulaciones de sostenibilidad que aseguran un suministro constante de biocombustible en un mercado de energía global en constante cambio. (Parlamento Europeo, 2008).

b) Poet-DSM en Estados Unidos:

- Esta planta, ubicada en Iowa, utiliza mazorcas de maíz y otros subproductos agrícolas para producir bioetanol celulósico. POET-DSM ha integrado tecnologías que reducen los costos de producción y maximizan el uso de subproductos. La figura 2-2 ilustra muchas de las estrategias de reducción de la intensidad de carbono (CI) que POET considera para alcanzar sus objetivos de neutralidad de carbono. Estas estrategias incluyen:
- Desde 2005, POET ha logrado reducir su consumo anual de energía en un 18%.

- Desde 2005, POET ha incrementado su producción de biocombustible por bushel en un 8%.
- Desde 2007, POET ha reducido su uso anual de agua por galón en un 20%.

El bioetanol es un componente clave del mercado de gasolina estadounidense de 138 mil millones de galones. Al mezclarlo con gasolina, se mejora la calificación de octanos, se reduce el costo de producción por volumen y se facilita el cumplimiento de las normas de emisiones y de eficiencia de combustible.

El bioetanol es actualmente el combustible renovable más producido en los Estados Unidos, con aproximadamente 15,700 millones de galones producidos en 2019. Este biocombustible está presente en el 98% de la gasolina vendida en el país. (POET-DSM Project Liberty, 2019).

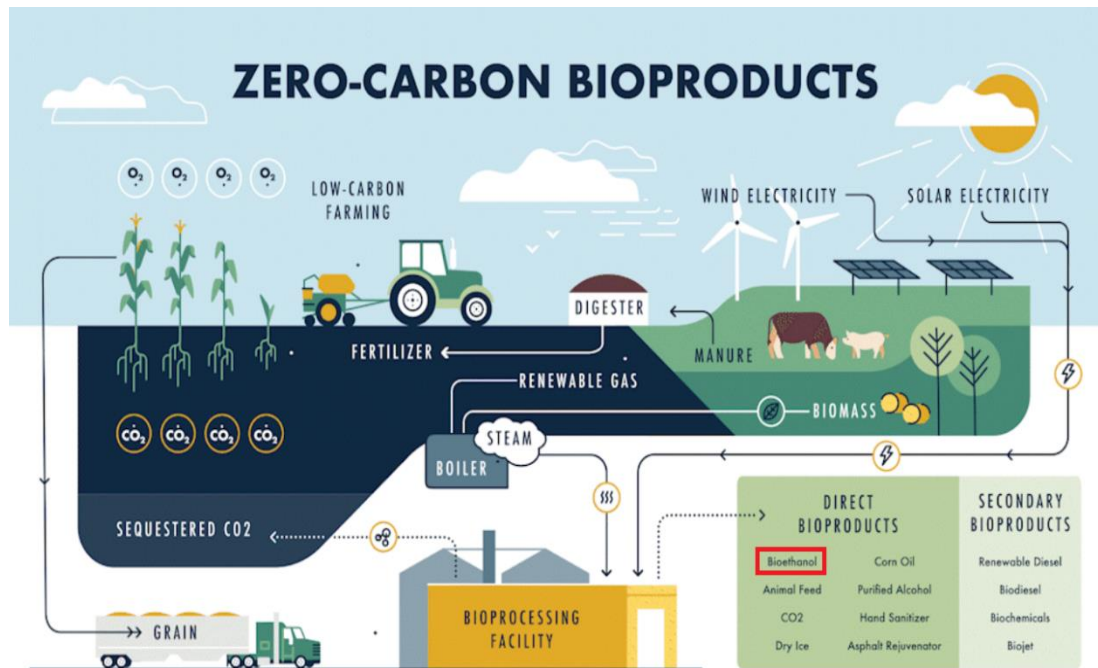


Figura 2-2: Gráfica que ilustra muchas de las estrategias de reducción de la intensidad de carbono de POET.

Fuente: POET-DSM Project Liberty [10]

Estos casos ilustran que, con la combinación adecuada de tecnologías y estrategias de gestión, es posible superar los desafíos inherentes al uso de residuos agrícolas en la producción de bioetanol, promoviendo una transición hacia un modelo más sostenible y eficiente.

**CAPÍTULO III: PROPUESTA DE MEJORA PARA INCREMENTAR LA
EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN**

3. PROPUESTA DE MEJORA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN

3.1 DIAGNÓSTICO DE COSTOS EN EL PROCESO ACTUAL

La producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas enfrenta retos significativos debido a los altos costos asociados con varias etapas clave del proceso. Estos costos se agrupan en cuatro categorías principales:

a) Materias primas:

- **Costo Inicial Bajo:** Los residuos agrícolas, como la paja de trigo o la cáscara de maíz, tienen un costo inicial bajo ya que son subproductos de la agricultura que, de otro modo, serían desechados. Sin embargo, su recolección no está exenta de desafíos. En áreas rurales, la falta de maquinaria adecuada y la distancia entre las fincas y las plantas de producción pueden encarecer el proceso de recolección y transporte.
- **Gastos en Infraestructura:** La necesidad de contar con infraestructura para la recolección, transporte y almacenamiento de los residuos representa un costo adicional significativo. Esto incluye la adquisición de camiones especializados, silos de almacenamiento y centros de recolección cercanos, lo que incrementa los costos de operación y puede limitar la rentabilidad del proyecto.

b) Tecnología:

- **Costos de Pretratamiento e Hidrólisis Enzimática:** El proceso de pretratamiento y la hidrólisis enzimática son esenciales para convertir los residuos en azúcares fermentables. Estos procesos son costosos debido a la necesidad de enzimas especializados y reactivos químicos. La producción de estas enzimas requiere una inversión en investigación y desarrollo, así como en la fabricación y transporte de los reactivos, incrementando así los costos operativos.

- **Tecnologías Avanzadas de Procesamiento:** Las tecnologías de separación y purificación también pueden ser costosas debido a los requisitos de equipos especializados y materiales resistentes al calor y a la corrosión. Estos costos deben ser considerados al evaluar la rentabilidad del proceso de producción.

c) **Energía:**

- **Consumo Elevado en Procesos Críticos:** En etapas como el pretratamiento, la fermentación y la destilación, el consumo de energía es alto. El calentamiento de las soluciones, la agitación de los reactores y el uso de bombas para mover líquidos a través del sistema son actividades que requieren grandes cantidades de electricidad y calor, impactando directamente los costos operativos.
- **Uso de Energía Renovable:** Utilizar fuentes de energía renovable puede ser una solución para reducir estos costos, pero requiere una inversión inicial en infraestructura y tecnología. El costo de energía también puede variar según la región y la disponibilidad de recursos como la biomasa, solar o eólica.

d) **Transporte:**

- **Costos de Distribución desde Zonas Rurales:** La recolección de residuos en zonas rurales y su transporte a las plantas de producción puede representar un gasto significativo. Las distancias largas y la falta de infraestructura adecuada en las regiones rurales afectan los costos de transporte. Además, el uso de caminos no pavimentados o carreteras en mal estado puede provocar daños en los vehículos de transporte y aumentar el costo de mantenimiento.
- **Estrategias para Minimizar los Costos:** Implementar sistemas de recolección centralizados, asociaciones con agricultores para compartir costos o utilizar tecnologías de telemetría para optimizar las rutas de

transporte son medidas que pueden ayudar a reducir estos costos de distribución y mejorar la rentabilidad del proceso.

Tabla 3-1: Resumen de factores claves en el diagnóstico de costos

Factor Clave	Ventajas	Desventajas
Materias Primas	Bajo costo inicial al utilizar residuos agrícolas. Disponibilidad constante de residuos como subproductos de la agricultura.	Costos significativos en recolección, transporte y almacenamiento, especialmente en áreas rurales sin infraestructura adecuada. Requiere inversiones en camiones especializados, silos y centros de recolección.
Tecnología	Procesos tecnológicos avanzados para convertir azúcares fermentables. Posibilidad de uso de energías renovables para reducir el consumo energético.	Costos altos por el desarrollo y producción de enzimas especializados y reactivos químicos. Equipos especializados necesarios para el pretratamiento y separación, impactando la rentabilidad del proceso.
Energía	Oportunidades para usar fuentes de energía renovable, reduciendo el impacto ambiental y los costos de energía. Integración de sistemas eficientes de gestión energética para optimizar el uso de	Consumo elevado en etapas críticas como pretratamiento, fermentación y destilación, afectando directamente los costos operativos. Inversiones iniciales en tecnología y adaptación de infraestructuras necesarias para fuentes renovables.

	recursos.	
Transporte	Reducción de costos al centralizar la recolección de residuos y optimizar las rutas. Uso de tecnologías como telemetría para mejorar la eficiencia del transporte.	Incremento en los costos por largas distancias y caminos en mal estado, especialmente en zonas rurales. Necesidad de inversión en tecnología y coordinación logística para optimizar las rutas de distribución.

Fuente: Elaboración propia

3.2 INNOVACIONES TECNOLÓGICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN

Las innovaciones tecnológicas desempeñan un papel crucial en la optimización del proceso de producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas, especialmente para mejorar la eficiencia energética, reducir el impacto ambiental y disminuir los costos de producción. A continuación se detallan las tecnologías más destacadas en este ámbito:

3.2.1 Tecnologías avanzadas de pretratamiento

Las tecnologías avanzadas de pretratamiento están diseñadas para romper la estructura de la biomasa lignocelulósica y liberar los componentes fermentables de manera más eficiente:

a) Vapor Explosivo:

- Este método físico-químico utiliza altas presiones y temperaturas para descomponer la biomasa en sus componentes más pequeños. La explosión de vapor genera un aumento en la accesibilidad de la celulosa y hemicelulosa, facilitando la hidrólisis posterior y mejorando el rendimiento de la conversión de azúcares en bioetanol.

b) Líquidos Iónicos:

- Los solventes ecológicos como los líquidos iónicos son capaces de disolver tanto la lignina como la celulosa de manera selectiva. Esta capacidad permite la separación de estos componentes y su procesamiento posterior con un menor impacto ambiental. Al disolver la lignina, los líquidos iónicos reducen las dificultades asociadas a la filtración y recuperación de los azúcares fermentables, mejorando la eficiencia del proceso.

c) Combinación de Métodos:

- La integración de pretratamientos físicos, químicos y biológicos ofrece una solución más robusta y eficiente. Utilizar varios métodos combinados permite optimizar el proceso, reduciendo tanto el tiempo como los costos de procesamiento. Además, esta combinación puede facilitar una mejor liberación de azúcares y una menor formación de compuestos inhibidores, mejorando así la viabilidad del proceso de producción de bioetanol.

3.2.2 Integración de procesos energéticamente eficientes

La integración de tecnologías energéticamente eficientes es fundamental para reducir el consumo de energía y mejorar la sostenibilidad del proceso:

a) Uso de Energías Renovables:

- La implementación de fuentes de energía renovables, como paneles solares o biomasa residual, para las operaciones de la planta de bioetanol es una estrategia clave para reducir la huella de carbono y el consumo energético. Estos recursos permiten un suministro constante de energía limpia y sustentable, reduciendo así la dependencia de combustibles fósiles.

b) Destilación por Membranas:

- Esta tecnología emergente reemplaza los métodos de destilación térmica tradicionales, que consumen grandes cantidades de energía. La destilación por membranas utiliza membranas selectivas para separar componentes del flujo de gas o líquido, reduciendo significativamente el consumo energético y mejorando la eficiencia del proceso de purificación del bioetanol.

c) Recuperación de Calor:

- La integración de sistemas de recuperación de calor en las etapas más intensivas energéticamente del proceso puede mejorar la eficiencia global. Estos sistemas capturan el calor residual de procesos exergónicos y lo reutilizan, reduciendo la necesidad de calefacción adicional y optimizando el uso de energía en todo el proceso de producción de bioetanol.

3.3 COMPARATIVA DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD

Un enfoque integral para la optimización de la producción de bioetanol debe incluir un análisis comparativo que evalúe tanto los costos como la sostenibilidad ambiental y los beneficios socioeconómicos asociados. Este análisis permite determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las tecnologías emergentes frente a los métodos tradicionales. A continuación, se describen los aspectos clave que deben considerarse en esta comparación:

3.2.1 ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos es una herramienta fundamental para evaluar la viabilidad económica del proceso de producción de bioetanol. A medida que se implementan tecnologías emergentes y mejoras tecnológicas, es crucial realizar una estimación detallada de los costos asociados a cada etapa del proceso, comparando los modelos

tradicionales con las innovaciones propuestas. A continuación, se desarrollan los puntos clave a considerar en este análisis:

a) Pretratamiento:

La etapa de pretratamiento es crucial en la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas, ya que influye significativamente en los costos operativos y en la eficiencia del proceso. En el modelo tradicional, el pretratamiento suele requerir altas cantidades de energía, principalmente para calentar y presurizar los residuos, lo que aumenta los costos debido a la demanda de combustibles fósiles. Implementar tecnologías más eficientes, como el pretratamiento enzimático o térmico a baja energía, puede reducir estos costos significativamente. El uso de enzimas especializadas en el desdoblamiento de la celulosa y hemicelulosa en residuos vegetales permite operar a menores temperaturas y presiones, reduciendo así la necesidad de energía y agua. Esto no solo disminuye los costos operativos relacionados con la energía, sino que también mejora la eficiencia del proceso al reducir las etapas de limpieza y preparación de los residuos. El análisis debe incluir la evaluación de los costos iniciales de implementación de estas tecnologías enzimáticas y su retorno sobre inversión, considerando la reducción en los costos energéticos y el aumento en el rendimiento de bioetanol.

b) Fermentación:

La fermentación es una etapa crítica en la producción de bioetanol, donde se puede influir significativamente en los costos mediante la adopción de nuevas tecnologías. El uso de microorganismos modificados genéticamente ha demostrado ser efectivo para aumentar los rendimientos de etanol al permitir un proceso más eficiente de conversión de azúcares en alcohol. Estos organismos pueden tolerar mejor condiciones extremas de pH y temperatura, lo que reduce las pérdidas de biomasa y aumenta la eficiencia del proceso. Sin embargo, la implementación de estos microorganismos puede implicar un costo inicial adicional para la investigación y desarrollo, así como para la obtención de licencias y patentes. Además, la adopción de

procesos de fermentación continuos, como el flujo de sustrato continuo, permite una operación más estable y un uso más eficiente del tiempo de reacción, reduciendo así la cantidad de equipo y tiempo necesario en comparación con los procesos por lotes. El análisis de costos debe considerar estos factores junto con la reducción en los costos operativos debido al menor consumo de energía y la eliminación de etapas de purificación adicionales.

c) Destilación:

La destilación es la etapa final en la producción de bioetanol y uno de los procesos más intensivos en consumo energético del sistema. La adopción de tecnologías como la destilación por membranas o los sistemas híbridos de separación puede proporcionar ahorros significativos en energía. La destilación por membranas utiliza permeabilidad selectiva para separar etanol y agua sin necesidad de calor adicional, lo que reduce el consumo de energía en comparación con los sistemas tradicionales que dependen de la evaporación. Estos sistemas también minimizan las pérdidas de etanol debido a la purificación ineficiente y permiten un manejo más directo del efluente. Aunque el costo inicial de implementación de estas tecnologías puede ser alto, los ahorros energéticos y operativos que generan hacen que valga la pena la inversión a largo plazo. El análisis debe incluir un estudio detallado del retorno sobre inversión, considerando la reducción en los costos de operación y los menores requerimientos de mantenimiento y repuestos.

d) Energía y servicios auxiliares:

El uso eficiente de energía y servicios auxiliares es clave para reducir los costos operativos en la producción de bioetanol. La estimación del ahorro energético derivado del uso de fuentes renovables, como la biomasa residual o la energía solar, es crucial para la sostenibilidad económica del proceso. La integración de calor residual, donde el calor producido en una etapa del

proceso se reutiliza en otras, también contribuye a la reducción de costos energéticos. La adopción de mejoras en la eficiencia energética, como la instalación de sistemas de recuperación de calor y el uso de motores de alta eficiencia, puede reducir significativamente los costos operativos asociados con el consumo energético. Además, la implementación de tecnologías de co-generación que permiten la producción simultánea de electricidad y calor puede ser una opción viable para mejorar la eficiencia del uso de recursos y reducir los costos operativos. Este análisis debe incluir un estudio de los costos iniciales de implementación de estas tecnologías y su impacto en los costos a largo plazo, evaluando el balance entre la inversión inicial y los ahorros continuos en los costos energéticos y operativos.

Tabla 3-2: Resumen de las etapas del proceso productivo

Etapas del proceso	Modelo tradicional	Mejoras tecnológicas	Ahorros/ Mejoras
Pretratamiento	Alta demanda de energía y uso intensivo de agua.	Pretratamiento enzimático o térmico a menor consumo energético.	Reducción de costos de energía, menor uso de agua y residuos.
Fermentación	Procesos por lotes, alto consumo de energía, necesidad de purificación adicional.	Microorganismos modificados genéticamente, procesos continuos.	Reducción de costos operativos, menor consumo energético.
Destilación	Alta energía requerida para evaporación, pérdidas de etanol.	Destilación por membranas o sistemas híbridos de separación.	Ahorros energéticos, mayor eficiencia en la purificación de etanol.

Energía y servicios auxiliares	Alta dependencia de combustibles fósiles, integración limitada de calor residual.	Fuentes renovables (biomasa residual, energía solar), integración de calor residual	Reducción en costos energéticos, mejora en la sostenibilidad.
--------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

La sostenibilidad es crucial para evaluar el proceso productivo del bioetanol, ya que no solo influye en su eficiencia económica, sino también en su viabilidad ecológica. Para ello, se deben considerar los siguientes indicadores ambientales:

a) Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):

Las emisiones de gases de efecto invernadero son un resultado directo de las actividades en la producción de bioetanol, incluyendo el uso de combustibles fósiles y la gestión de residuos agrícolas. Las fuentes principales de estas emisiones provienen del cultivo de las materias primas, el pretratamiento y la fermentación. En el cultivo de residuos agrícolas, las emisiones de GEI derivadas del uso de fertilizantes y la quema de residuos pueden ser significativas. Durante el pretratamiento, el consumo de agua caliente y vapor incrementa las emisiones de CO₂ si la energía proviene de fuentes no renovables. En la fermentación, el consumo de energía para calentar reactores y destilar el bioetanol incrementa las emisiones, especialmente si se utilizan combustibles fósiles.

Las opciones para reducir estas emisiones incluyen la optimización de procesos mediante el uso de enzimas que operan a menores temperaturas, la adopción de energías renovables para la generación de calor y electricidad, y

la implementación de tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos agrícolas, capturando metano y reduciendo las emisiones. Por ejemplo, se ha reportado que el uso de biomasa lignocelulósica en la producción de bioetanol puede reducir las emisiones de GEI hasta en un 90% en comparación con los combustibles fósiles (Bioethanolshop, s.f.). Además, en Europa, el bioetanol ha demostrado una reducción de más del 75% en las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles (Bio-E, 2021).

b) Consumo de agua:

El consumo de agua en la producción de bioetanol es significativo, especialmente durante el pretratamiento y la fermentación de los residuos agrícolas. Estas etapas requieren grandes cantidades de agua para el lavado de los residuos y la disolución de reactivos. Las fuentes principales de este consumo provienen del pretratamiento, que requiere el uso intensivo de agua caliente para limpiar y procesar los materiales, y de la fermentación, donde se emplean grandes volúmenes de agua para refrigerar los reactores y mezclar residuos. Las tecnologías emergentes que permiten la reducción del consumo de agua incluyen el uso de enzimas para realizar el pretratamiento a temperaturas más bajas y presiones menores, lo que disminuye la necesidad de agua caliente. Además, el reciclaje y tratamiento del agua utilizada en el proceso, mediante filtración y desinfección, puede permitir su reutilización en etapas posteriores, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos. (Sánchez et al., 2020).

c) Generación de residuos secundarios:

Durante el proceso de producción de bioetanol se generan una serie de subproductos, como paja, hollejos y residuos de fermentación. Estos residuos, si no se manejan adecuadamente, pueden representar un riesgo ambiental significativo, tanto por su acumulación como por sus propiedades contaminantes. Los subproductos sólidos como la paja y los hollejos pueden

ser reutilizados como biomasa para la generación de energía, reduciendo así la necesidad de combustibles fósiles y minimizando la acumulación de residuos. Los residuos líquidos generados en la fermentación pueden ser tratados mediante tecnologías de digestión anaerobia para convertirlos en biogás, reduciendo las emisiones de metano y produciendo un subproducto valioso para la agricultura. Además, el compostaje de residuos orgánicos es una opción viable para tratar residuos sólidos, aprovechando los nutrientes liberados como fertilizantes, lo que reduce la necesidad de fertilizantes químicos y contribuye a la sostenibilidad del suelo. Estas opciones de mejora permiten no solo optimizar el proceso de producción de bioetanol, sino también asegurar que la producción sea más sostenible, apoyando la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible a largo plazo. (López y Martínez, 2018)

3.3.3 BENEFICIOS ECONÓMICOS

La producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas no solo representa un avance significativo en términos de sostenibilidad ambiental, sino que también ofrece una serie de beneficios económicos sustanciales que impactan positivamente las comunidades rurales y la economía en general. Estos beneficios no solo fortalecen la infraestructura económica y social de las regiones, sino que también promueven un modelo de desarrollo más inclusivo y sostenible.

a) Generación de empleo:

La cadena de valor del bioetanol abarca una serie de actividades que van desde el acopio y transporte de residuos agrícolas hasta la operación de las plantas de bioetanol. Esta cadena es una fuente vital de empleo tanto directo como indirecto, especialmente en zonas rurales donde las oportunidades laborales son limitadas. Los empleos directos incluyen puestos de trabajo en la recolección de residuos agrícolas, manejo de biomasa, y en las plantas de procesamiento de bioetanol, donde se requiere personal calificado para las labores de producción, control de calidad y mantenimiento. La operación de

estas plantas también genera empleo indirecto en sectores como el suministro de insumos agrícolas, fabricación de maquinaria y equipos, y en los servicios de logística y transporte necesarios para mover la materia prima y los productos terminados. Estudios recientes han demostrado que cada planta de bioetanol puede generar entre 500 y 1,000 empleos indirectos, no solo mejorando la estabilidad económica de las comunidades rurales, sino también reduciendo las tasas de migración hacia zonas urbanas. Estos empleos representan una oportunidad significativa para el desarrollo de habilidades en la fuerza laboral local y fomentan la retención de talento en regiones donde los centros educativos y de capacitación son limitados.

b) Aprovechamiento de residuos agrícolas:

El uso de residuos agrícolas como materia prima para la producción de bioetanol promueve la economía circular al transformar lo que anteriormente era un desecho en un recurso de valor económico y ambiental. Los residuos agrícolas como paja de trigo, bagazo de caña de azúcar, y mazorcas de maíz son utilizados en el proceso de producción, reduciendo así la necesidad de cultivos específicos para la obtención de biomasa energética. Esta práctica no solo contribuye a la mitigación del cambio climático al evitar la quema de residuos y las emisiones de carbono negro, sino que también mejora la calidad del aire y la salud de los suelos. Los agricultores que antes trataban sus residuos como un costo innecesario ahora los ven como una fuente de ingresos adicionales. Vender estos residuos para la producción de bioetanol les permite diversificar sus fuentes de ingresos, integrándolos en una cadena productiva sostenible que puede financiar mejoras en sus prácticas agrícolas y tecnologías de manejo de recursos. Además, el uso de residuos agrícolas fomenta el desarrollo de nuevas tecnologías para la recolección y procesamiento de biomasa, promoviendo la innovación y el crecimiento en el sector agroindustrial.

c) Contribución al desarrollo regional:

La implementación de plantas de bioetanol y el fomento de una cadena de valor robusta no solo generan empleo y mejoran la economía local, sino que también transforman las regiones rurales en polos de desarrollo industrial. La construcción de estas instalaciones requiere de inversiones significativas en infraestructura, como carreteras, sistemas de transporte eficientes y servicios básicos, que mejoran la calidad de vida de las comunidades circundantes. La creación de estas infraestructuras no solo apoya la operación de las plantas de bioetanol, sino que también beneficia a la población en general, facilitando su acceso a servicios esenciales y mejorando la conectividad con otros mercados y zonas económicas.

Además, el desarrollo de plantas de bioetanol en áreas rurales promueve la inclusión social al ofrecer oportunidades de empleo y desarrollo a pequeños agricultores y comunidades marginadas. La integración de estos actores en la cadena de suministro del bioetanol permite que incluso las personas con acceso limitado a recursos puedan beneficiarse directamente del crecimiento económico derivado de esta industria. La diversificación económica también es clave, ya que el bioetanol ofrece una alternativa a las economías tradicionales basadas en la agricultura de subsistencia o la minería. Las regiones que adoptan esta industria encuentran nuevas vías para el desarrollo, como el establecimiento de parques tecnológicos, la incubación de empresas de biotecnología y la atracción de inversiones en proyectos de energía renovable y economía verde.

La presencia de plantas de bioetanol en regiones rurales también fomenta la atracción de inversiones adicionales, fortaleciendo la economía local y mejorando su competitividad a nivel global. Estas plantas no solo generan empleos y activan cadenas de suministro locales, sino que también actúan como polos de desarrollo que pueden atraer empresas relacionadas con la manufactura de bioplásticos, la producción de fertilizantes orgánicos y otras tecnologías sostenibles. La inclusión del bioetanol en la matriz energética nacional no solo

mejora la resiliencia económica de las regiones rurales, sino que también promueve un desarrollo económico más equitativo y sostenible, alineado con las necesidades de una economía global en transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

DISCUSIÓN

La producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas representa una alternativa prometedora en el marco de una economía circular, con beneficios ambientales significativos, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, este enfoque enfrenta desafíos técnicos, económicos y políticos que limitan su competitividad frente a los combustibles fósiles y su escalabilidad comercial.

Un aspecto crítico es el costo asociado al manejo de residuos lignocelulósicos. La dispersión geográfica de estos recursos eleva los gastos logísticos, especialmente en regiones rurales donde la infraestructura para la recolección y transporte es limitada. A esto se suma el pretratamiento de la biomasa, necesario para romper la compleja estructura lignocelulósica y liberar los azúcares fermentables. Este proceso, aunque esencial, sigue siendo tecnológicamente intensivo y costoso.

Otro factor limitante es el alto costo de las enzimas utilizadas en la hidrólisis enzimática, que, a pesar de los avances en biotecnología, siguen representando una barrera económica para la implementación a gran escala. Asimismo, las tecnologías emergentes como la destilación por membranas y la fermentación continua, aunque prometedoras, requieren inversiones iniciales significativas y personal capacitado, lo que restringe su adopción en países con recursos limitados.

En el ámbito político y económico, la falta de incentivos gubernamentales y el apoyo a los biocombustibles han sido un obstáculo recurrente. En muchos países, los subsidios a los combustibles fósiles dificultan la competitividad del bioetanol, a pesar de sus beneficios ambientales y sociales. Esto pone de manifiesto la necesidad de políticas públicas que fomenten el desarrollo del bioetanol mediante subsidios, créditos fiscales y financiamiento para la investigación.

CONCLUSIÓN

La producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas se perfila como una alternativa viable para la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y un modelo de economía circular. Si bien enfrenta desafíos significativos relacionados con los costos de logística, pretratamiento y tecnología, así como la falta de políticas que respalden su desarrollo, las oportunidades para superar estas barreras son notables.

Por ejemplo, la implementación de estrategias innovadoras, como el aprovechamiento integral de los residuos para la generación de subproductos como biogás y biofertilizantes, permite no solo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino también mejorar la rentabilidad del proceso. Se ha reportado que el uso de biomasa lignocelulósica en la producción de bioetanol puede disminuir las emisiones de GEI hasta en un 90 % en comparación con los combustibles fósiles. Además, en Europa, el bioetanol ya logra reducir más del 75 % de las emisiones de GEI en comparación con los combustibles tradicionales.

Por otra parte, el consumo de agua, que representa un aspecto crítico en el proceso, puede ser optimizado mediante tecnologías emergentes. El uso de enzimas para pretratamientos a temperaturas más bajas y el reciclaje de agua mediante sistemas de filtración permiten reducir significativamente el gasto hídrico.

El manejo de residuos secundarios, como los residuos líquidos de fermentación, puede convertirse en una ventaja competitiva. Por ejemplo, el tratamiento de estos residuos mediante digestión anaerobia no solo mitiga el impacto ambiental, sino que también genera biogás, un subproducto valioso que contribuye a la sostenibilidad económica del proceso.

El éxito de iniciativas como el Proálcool en Brasil subraya la importancia del respaldo gubernamental y la colaboración entre el sector público y privado para fomentar la inversión en tecnologías sostenibles. Dichas iniciativas han demostrado

que un marco regulatorio sólido, combinado con incentivos económicos, puede escalar significativamente la producción y uso del bioetanol

En resumen, aunque el camino hacia la consolidación del bioetanol a partir de residuos agrícolas es desafiante, su desarrollo ofrece beneficios ambientales, económicos y sociales que justifican los esfuerzos para superar las barreras actuales. La reducción de emisiones de GEI, la optimización en el uso del agua y el aprovechamiento de residuos secundarios son ejemplos tangibles de las oportunidades que esta industria puede ofrecer, siempre y cuando se logren integrar avances tecnológicos con un respaldo institucional sólido.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Internacional de la Energía (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*.
- [2] AINIA. (2022). *10 tecnologías innovadoras para la transformación de residuos en bioproductos de valor*.
- [3] Demirbas, A. (2009). *Biofuels: Securing the planet's future energy needs*. Springer.
- [4] Zabed, H., Sahu, J. N., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.076
- [5] Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., & Levin, D. B. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, 29(6), 675-685. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.05.005
- [6] <https://www.dinafem.org/es/blog/henry-ford-y-el-coche-de-ca-amo/>
- [7] https://es.wikipedia.org/wiki/Ford_T
- [8] International Energy Agency (IEA). (2020). "Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025."
- [9] https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/3671/analisis_produccion_etanol_biodiesel_paises_proveedores_chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] POET-DSM Project Liberty. (2019). "Innovations in bioethanol production from agricultural residues."

- [11] Velásquez-Arredondo, H. I., Ruiz-Colorado, A. A., & Cardona, C. A. (2010). Producción de bioetanol y biogás a partir de residuos agroindustriales: Retos y oportunidades. *Revista de Ingeniería Química*, 27(2), 143-157.
- [12] CEPAL (2014). *Producción sostenible de biocombustibles en América Latina y el Caribe: Oportunidades y riesgos*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- [13] Quintero, J. A., Montoya, M. I., Sánchez, O. J., Giraldo, O. H., & Cardona, C. A. (2008). Evaluación técnico-económica de tecnologías para la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos. *Ingeniería Química*, 30(3), 25-35.
- [14] Gómez-Castro, F. I., Ramírez-Márquez, C., & Cardona, C. A. (2014). Evaluación del potencial de residuos agrícolas en Colombia para la producción de bioetanol. *Ingeniería e Investigación*, 34(1), 56-62.
- [15] Wikipedia. (s. f.). *Etanol como combustible en Brasil*.
SciDev.net. (2013). *Etanol de caña de azúcar: El éxito de Brasil*.
- [16] Motta, A., & Suárez, N. (2012). Producción de bioetanol de segunda generación en América Latina. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 72-84.
- [17] Bolsa de Comercio de Rosario. (2023). *Bioetanol: Una apuesta al futuro energético sostenible*.
- [18] Repsol. (s.f.). *¿Qué es el bioetanol y para qué sirve?*.
Bioethanolshop.nl. (2019). *¿Cuál es la huella de carbono del bioetanol?*.
- [19] HedgePoint Global Markets. (2023). *La evolución del mercado de la bioenergía*.
- [20] OpenDemocracy. (2023). *El boom de los biocarburantes en Brasil: ¿economía verde o greenwashing?*.
- [21] U.S. Grains Council. (s.f.). *El Mercado del Etanol - América Latina*.
- [22] Bolsa de Comercio de Rosario. (s.f.). *El biocombustible en el mundo*.

- [23] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2007). Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe: potenciales y perspectivas. Naciones Unidas.
- [24] Marques, F. (2018). *Fronteras del etanol de caña de azúcar*. *Revista Pesquisa Fapesp*.
- [25] Sánchez, M. (2015). *Modelo de entrenamiento en toma de decisiones relacionadas con gestión de producción y operaciones de un sistema de fabricación de bioetanol*. ResearchGate.
- [26] Yenque, A., & Rodríguez, M. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales. *Revista de la Facultad de Ciencias Biológicas*, 26(1), 1–10.
- [27] Parlamento Europeo. (2008). *El bioetanol como alternativa energética: Oportunidades y desafíos*.
- [28] Sánchez, M., Torres, F., & Varela, E. (2020). *Reutilización del agua en procesos industriales de bioetanol: Un enfoque sostenible*. *Revista Iberoamericana de Ciencias Ambientales*, 16(1), 75-90.
- [29] López, J., & Martínez, R. (2018). *Gestión de residuos sólidos en la producción de bioetanol: Aprovechamiento y sostenibilidad*. *Revista de Energía Renovable*, 12(3), 45-58.