



**TRABAJO DE GRADO**  
**Opción Seminario-Diplomado.**

**Hacia una Mayagüez Circular: Transformando procesos para un futuro sostenible**

Corporación Universitaria Remington  
Facultad de Ingenierías  
Ingeniería Industrial

EDWARD ANDRES ARCE CASTRO  
LINA MARIA VILLA HENAO  
Seminario-Diplomado.  
2024

## **Dedicatoria**

A mi querida familia,

Con profundo amor y gratitud, quisiera dedicar estas palabras a los pilares de mi vida: mi amada esposa y nuestros preciosos hijos. Dedico este trabajo a Dios, mi familia, quienes han sido mis pilares fundamentales de apoyo.

A mi esposa, mi compañera de vida, por ser mi apoyo incondicional, mi confidente y mi inspiración diaria, por tu amor incondicional y constante apoyo a mis hijos, a mis queridos hijos, ustedes son la razón de mi alegría de mi existencia y la razón de mis esfuerzos continuos. Sus sonrisas, risas y abrazos llenaron mi corazón de felicidad y esperanza. Cada uno de ustedes, con su singularidad y espíritu, aporta una belleza incomparable a nuestras vidas.

Gracias a mi familia por ser mi refugio y mi fuente inagotable de amor. Juntos hemos construido un hogar lleno de risas, aprendizaje y amor. Agradezco infinitamente cada momento que hemos compartido y cada recuerdo que hemos creado juntos. Gracias a mi madre por su paciencia y aliento; a mi padre que está en el cielo por inculcarme la perseverancia; a mis hermanas por estar siempre atentos a mi proceso; a mis sobrinos por traerme siempre alegría.

## **Agradecimientos**

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron posible el trabajo de esta carrera.

Primero que nada, agradezco sinceramente a Dios por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para completar este proyecto.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, amor y paciencia durante todo este proceso. Sin su constante aliento, este logro no habría sido posible.

Quisiera agradecer especialmente al Ingenio Mayagüez SA por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de grado en sus instalaciones. Agradezco a la dirección de la empresa por su confianza y apoyo ya todos los empleados por su colaboración y disposición para compartir sus conocimientos y experiencias.

Agradezco a Dios por las oportunidades que me ha brindado en mi vida, especialmente por permitirme seguir esta carrera y contribuir al campo de la ingeniería industrial, ya mi familia por su apoyo incondicional, amor y comprensión durante todo el proceso, y al Ingenio Mayagüez SA, me abrió las puertas y me permitió trabajar en la empresa durante veinte años, permitiéndome crecer personal y profesionalmente en diferentes puestos y poder realizar esta investigación en sus instalaciones.

Finalmente, agradezco a mis profesores y compañeros por su apoyo académico y moral. Sus enseñanzas y consejos han sido una parte crucial de mi formación profesional.

A todos ustedes, muchas gracias.

## Tabla de Contenidos

Resumen.....	7
Marco conceptual y contextual .....	8
Desarrollo e implementación del aprendizaje.....	14
Transformación y aprovechamiento de la biomasa .....	14
La biomasa de caña de azúcar: subproductos y su potencial .....	14
Transformación de la Biomasa: Procesos y Tecnologías .....	15
Impacto Ambiental y Sostenibilidad.....	16
Combustibles y energías renovables a partir de la biomasa .....	17
Potencial de la Biomasa de la Caña de Azúcar .....	18
Producción de Bioetanol .....	18
Cogeneración de Energía .....	18
Producción de Biogás y Otros Biocombustibles.....	19
Desafíos y Perspectivas.....	20
La biomasa de caña de azúcar incluye varios subproductos.....	20
Conclusiones.....	25
Referencias.....	27

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Comparación entre combustibles fósiles y energías renovables a partir de la Biomasa.	17
Tabla 2. Comparación entre energía producida con carbón vs energía producida con Biomasa ...	22
Tabla 3. Comparación de huella de carbono entre el Carbón vs Biomasa .....	23

**Lista de Ilustraciones**

Ilustración 1. Biomasa de Ingenio Mayagüez Julio 2024 .....	15
-------------------------------------------------------------	----

## Resumen

El Ingenio Mayagüez S.A., se presenta como un caso de estudio paradigmático de la economía circular en el sector azucarero. Tradicionalmente asociado a la producción de azúcar, la empresa ha diversificado sus operaciones para aprovechar integralmente los residuos de la caña, reduciendo su huella de carbono y generando valor agregado.

Un eje central de esta estrategia es la valorización del bagazo, principal residuo de la molienda. A través de alianzas estratégicas con empresas como Propal, Mayagüez S.A ha incursionado en la producción de papel a partir de este material, promoviendo una economía más circular y sostenible.

Otro frente de acción es la producción de bioetanol, un biocombustible que puede mezclarse con la gasolina para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Al suministrar bioetanol a las gasolineras del país, Mayagüez S.A contribuye significativamente a la disminución de la huella de carbono del transporte.

La generación de energía eléctrica a partir de la biomasa también es un componente clave de esta estrategia. Mayagüez S.A., cuenta con su propia planta de cogeneración, que utiliza el bagazo para producir energía eléctrica y térmica. El excedente de energía se vende a empresas como Celsia, contribuyendo a la matriz energética nacional.

Finalmente, el biocompost, un abono orgánico elaborado a partir de los residuos de la producción cierra el ciclo al devolver nutrientes al suelo y mejorar su fertilidad. Esta práctica no solo promueve la agricultura sostenible, sino que también reduce la dependencia de fertilizantes químicos.

Al transformar los residuos en recursos valiosos, Mayagüez S.A, demuestra que la economía circular es una vía viable para lograr un desarrollo sostenible y competitivo. Este caso de estudio puede servir de inspiración para otras empresas del sector agroindustrial y contribuir al diseño de políticas públicas que fomenten la transición hacia una economía más circular en nuestro país.

## **Palabras clave**

- Economía Circular
- Valorización de Residuos
- Bioenergía
- Sostenibilidad
- Agricultura Sostenible

## **Marco conceptual y contextual**

### **Marco Conceptual:**

El marco conceptual de esta investigación se sustenta en los principios de la economía circular, que promueve la reducción, la reutilización y el reciclaje de recursos. En este contexto, se analizarán los siguientes conceptos:

#### **1. Introducción a la Economía Circular**

La economía circular es un modelo económico que tiene como objetivo minimizar los residuos y maximizar el uso eficiente de los recursos mediante la reducción, la reutilización y el reciclaje de materiales. A diferencia del modelo económico lineal tradicional de “extraer, producir, consumir y eliminar”, la economía circular propone un sistema regenerativo que convierte los residuos en nuevos recursos. (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

#### **2. Principios de la Economía Circular**

**Reducción:** Este principio se centra en minimizar el uso de recursos naturales y la generación de residuos. En el contexto de un ingenio azucarero, la reducción puede lograrse mediante prácticas agrícolas sostenibles, optimización de procesos industriales y eficiencia energética (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016).

Reutilización: Implica dar una nueva vida útil a productos y materiales que de otro modo serían desechados. Los ingenios azucareros pueden implementar sistemas de reutilización de subproductos como el bagazo de caña, que puede ser empleado como materia prima para generar energía o en la fabricación de papel y materiales de construcción (Liu, Rinz, & Kazmierczak, 2018).

### **3. Aplicación de la Economía Circular en Ingenios Azucareros**

- Reducción en la Producción Agrícola

Los ingenios azucareros pueden adoptar prácticas de agricultura de precisión para optimizar el uso de insumos agrícolas como agua, fertilizantes y pesticidas. La implementación de sistemas de riego eficientes y técnicas de cultivo de bajo impacto contribuyen a la reducción del consumo de recursos naturales (Zhang et al., 2015).

- Reutilización de Subproductos

Uno de los principales subproductos de la industria azucarera es el bagazo de caña, que puede ser reutilizado como combustible en las calderas del ingenio para la generación de vapor y electricidad, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Además, la melaza, otro subproducto, puede ser utilizada en la producción de etanol y otros productos fermentados (Rodrigues et al., 2017).

- Reciclaje de Residuos

La economía circular en los ingenios azucareros también promueve el reciclaje de residuos. Por ejemplo, los residuos orgánicos pueden ser compostados para enriquecer los suelos agrícolas. Las aguas residuales del proceso de producción pueden ser tratadas y recicladas, reduciendo la extracción de agua fresca y minimizando el impacto ambiental (Molina-Moreno et al., 2017).

### **4. Beneficios de la Economía Circular en Ingenios Azucareros**

La implementación de principios de economía circular ofrece múltiples beneficios:

- **Sostenibilidad Ambiental:** Disminuye la extracción de recursos naturales y la generación de residuos, reduciendo la huella ecológica de la producción azucarera (Geng & Doberstein, 2008).
- **Eficiencia Económica:** Mejora la eficiencia de los procesos productivos y reduce los costos asociados a la gestión de residuos y la compra de insumos (Stahel, 2016).
- **Responsabilidad Social:** Fomenta prácticas sostenibles que benefician a las comunidades locales y promueven un entorno más saludable (Murray, Skene, & Haynes, 2017).

#### **Marco Contextual:**

El marco contextual de la investigación se centrará en el sector azucarero colombiano y en las políticas públicas relacionadas con la sostenibilidad, la energía y el medio ambiente. De ello, se precisará información que permite realizar un contexto sobre el lugar en el que se centra el presente trabajo.

El Ingenio Mayagüez es una empresa colombiana que se constituyó en 1937. Con una larga trayectoria, ha consolidado su presencia en el mercado azucarero, destacándose por su producción y comercialización de azúcar y productos derivados de la caña de azúcar. A lo largo de las décadas, el ingenio ha experimentado un crecimiento sostenido, expandiendo su capacidad de producción y diversificando sus operaciones. En los años 60 y 70, Mayagüez incrementó significativamente su producción de azúcar y empezó a explorar la generación de energía a partir del bagazo de la caña.

Opera en el sector agroindustrial, específicamente en la industria azucarera. Este sector abarca la producción de azúcar y otros derivados de la caña de azúcar, así como la generación de energía y la producción de bioetanol. De ello, el principal producto del

Ingenio Mayagüez es el azúcar. Además de este, la empresa produce otros derivados de la caña de azúcar como melaza, bagazo, bioetanol y energía eléctrica a partir de biomasa.

El Ingenio Mayagüez comercializa sus productos tanto en el mercado nacional como en el internacional. En el mercado interno, abastece a empresas de alimentos, bebidas y otros sectores industriales que requieren azúcar y sus derivados como insumo. El Ingenio Mayagüez también realiza exportaciones de azúcar y otros productos derivados de la caña de azúcar. Sus productos llegan a diversos mercados internacionales, contribuyendo a la economía exportadora de Colombia y posicionando al ingenio como un actor relevante en el comercio global de azúcar y productos afines.

El Ingenio Mayagüez cuenta con una amplia gama de clientes tanto a nivel nacional como internacional. Sus principales clientes se encuentran en sectores como la industria de alimentos y bebidas, empresas productoras de biocombustibles, y compañías de energía. A continuación, se detalla un perfil general de sus principales clientes:

#### 1- Industria de Alimentos y Bebidas

- Nestlé
- Coca-Cola
- PepsiCo
- Grupo Nutresa

Estas empresas utilizan el azúcar como uno de los ingredientes fundamentales en la producción de sus productos, tales como refrescos, jugos, galletas, chocolates y otros alimentos procesados.

#### 2- Productores de Biocombustibles

- BioD S.A.
- Manuelita S.A.

Estos clientes adquieren bioetanol producido a partir de la caña de azúcar, un combustible renovable que se mezcla con la gasolina para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

### 3- Empresas de Energía:

- Celsia
- Emgesa

El Ingenio Mayagüez genera energía eléctrica a partir de la biomasa (bagazo de caña), que es vendida a estas empresas para su distribución en la red eléctrica nacional. Mercado Internacional:

- Trader Azucarero Internacionales
- Empresas de Alimentos en América del Norte y Europa

El Ingenio Mayagüez exporta una parte significativa de su producción de azúcar a mercados internacionales, donde es utilizado por diversas industrias de alimentos y bebidas.

El Ingenio Mayagüez es una empresa clave en el sector agroindustrial colombiano, con una sólida tradición en la producción y comercialización de azúcar y derivados de la caña de azúcar. Su capacidad de exportación y su presencia en el mercado interno la consolidan como una de las empresas líderes en su campo.

El Ingenio Mayagüez emplea a una cantidad significativa de personas, reflejando su tamaño y la complejidad de sus operaciones. Aunque el número exacto de empleados puede variar con el tiempo debido a factores como la estacionalidad de la cosecha de caña de azúcar y las necesidades operativas, generalmente, el Ingenio Mayagüez cuenta con varios miles de empleados.

Para proporcionar un número aproximado, se menciona que el Ingenio Mayagüez emplea entre 2,000 y 3,000 personas. Este personal incluye trabajadores de campo, operarios de planta, técnicos, ingenieros, y personal administrativo, entre otros.

En la actualidad, el Ingenio Mayagüez es uno de los ingenios azucareros más importantes de Colombia. Con una capacidad de producción significativa y un enfoque en la sostenibilidad, la empresa sigue siendo un actor clave en la industria azucarera nacional e internacional. Además de azúcar, produce bioetanol y energía eléctrica a partir de biomasa, contribuyendo a la diversificación de sus ingresos y al desarrollo de energías renovables.

El Ingenio Mayagüez se distingue por su capacidad para adaptarse a los cambios del mercado y por su compromiso con la innovación, la sostenibilidad y el desarrollo social. Su historia es un testimonio de la importancia de la industria azucarera en Colombia y de la capacidad de las empresas locales para competir en el mercado global.

## **Desarrollo e implementación del aprendizaje**

### **Transformación y aprovechamiento de la biomasa**

La caña de azúcar es una de las plantas más cultivadas en todo el mundo, siendo fundamental para la producción de azúcar y otros productos derivados. Sin embargo, más allá del azúcar, la caña de azúcar representa una fuente significativa de biomasa, la cual tiene un enorme potencial de aprovechamiento. La biomasa derivada de la caña de azúcar incluye el bagazo, la paja, y la melaza, que son subproductos de los ingenios azucareros y pueden ser transformados en una variedad de productos útiles, desde biocombustibles hasta materiales de construcción. Este artículo explora las diferentes formas de transformar y aprovechar la biomasa de la caña de azúcar, resaltando la importancia de esta práctica en la sostenibilidad energética y la economía circular.

#### La biomasa de caña de azúcar: subproductos y su potencial

La caña de azúcar es una planta rica en biomasa. Según Souza et al. (2017), alrededor del 30% de la biomasa de la caña de azúcar se convierte en bagazo durante el proceso de extracción del jugo para la producción de azúcar. El bagazo, que es la fibra seca que queda después de extraer el jugo, ha sido tradicionalmente utilizado como combustible para las calderas en los ingenios azucareros, generando vapor para la producción de energía eléctrica. Este uso del bagazo para la cogeneración es uno de los ejemplos más antiguos de aprovechamiento de biomasa en la industria azucarera.

Además del bagazo, otros subproductos como la paja de caña (las hojas y las puntas de la caña) y la melaza también tienen un alto potencial de aprovechamiento. La paja de caña se suele dejar en los campos después de la cosecha, donde se quema o se incorpora al suelo, lo cual contribuye al ciclo del carbono y mejora la fertilidad del suelo. Sin embargo, cuando se procesa adecuadamente, la paja también puede ser utilizada para la producción de biocombustibles, como el bioetanol de segunda generación (2G), que es una forma avanzada de biocombustible que no compite con la producción de alimentos (Silva et al., 2018).

### Transformación de la Biomasa: Procesos y Tecnologías

Existen diversas tecnologías para la transformación de la biomasa derivada de la caña de azúcar. Una de las más desarrolladas es la fermentación del bagazo y la paja para producir bioetanol. Este proceso implica la pretratamiento de la biomasa para romper la estructura lignocelulósica, seguido por la hidrólisis enzimática para liberar azúcares fermentables, que luego son convertidos en etanol por medio de la fermentación (Hamelinck et al., 2005). El bioetanol producido puede mezclarse con gasolina para crear un combustible más limpio, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.



*Ilustración 1. Biomasa de Ingenio Mayagüez Julio 2024*

Otra tecnología prometedora es la gasificación de biomasa, que convierte el bagazo en gas de síntesis, una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Este gas puede ser utilizado para generar electricidad o como base para la producción de otros biocombustibles líquidos, como el biodiésel o el biometanol (Rosillo-Calle et al., 2019). La gasificación es particularmente interesante porque permite un aprovechamiento casi total de la energía contenida en la biomasa, con menores emisiones de contaminantes en comparación con la combustión directa.

Además de la producción de biocombustibles, la biomasa de caña de azúcar también puede transformarse en productos con un alto valor agregado, como bioplásticos, fertilizantes orgánicos, y materiales compuestos para la construcción. Por ejemplo, el bagazo puede ser

utilizado para fabricar paneles de fibra que se emplean en la construcción de muebles y en la industria automotriz (Jiang et al., 2018). Estos paneles, además de ser más ecológicos que los convencionales, presentan buenas propiedades mecánicas y un menor impacto ambiental.

### Impacto Ambiental y Sostenibilidad

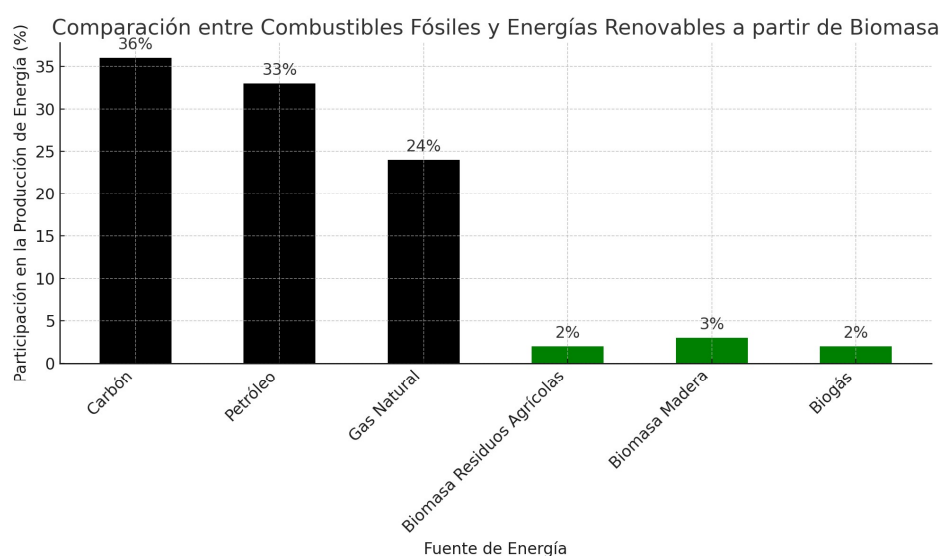
El aprovechamiento de la biomasa de la caña de azúcar tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental. En primer lugar, reduce la dependencia de los combustibles fósiles, contribuyendo a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Según un estudio de Borrero et al. (2020), la utilización de bioetanol producido a partir de la caña de azúcar puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 90% en comparación con la gasolina.

Además, el uso de subproductos como el bagazo y la paja en lugar de dejarlos sin aprovechar reduce la cantidad de residuos sólidos generados por los ingenios, lo que minimiza los problemas de disposición y el impacto ambiental asociado. El reciclaje de estos residuos en la forma de bioproductos cierra el ciclo de producción, promoviendo una economía circular en la industria azucarera.

Finalmente, es importante destacar que el aprovechamiento de la biomasa también tiene beneficios económicos. La producción de biocombustibles y otros bioproductos puede generar ingresos adicionales para los ingenios azucareros, diversificando sus fuentes de ingresos y aumentando su competitividad en el mercado global. Esto es particularmente relevante en un contexto de creciente demanda por productos sostenibles y energías renovables.

### Combustibles y energías renovables a partir de la biomasa

En Colombia, la caña de azúcar es un cultivo de gran relevancia económica y social, principalmente en la región del Valle del Cauca. Además de su importancia en la producción de azúcar, la caña de azúcar es una fuente significativa de biomasa, la cual puede ser transformada en combustibles y energías renovables. Estos subproductos, como el bagazo y la paja, ofrecen un enorme potencial para contribuir a la sostenibilidad energética del país. Este artículo explora las oportunidades y desafíos asociados con el aprovechamiento de la biomasa derivada de la caña de azúcar para la producción de combustibles y energías renovables en Colombia, destacando el impacto ambiental y socioeconómico de estas tecnologías.



*Tabla 1. Comparación entre combustibles fósiles y energías renovables a partir de la Biomasa*

Aunque la participación de la biomasa es baja en comparación con los combustibles fósiles, diferentes formas de biomasa contribuyen significativamente a la energía renovable, especialmente en áreas ricas en recursos agrícolas y forestales. Este gráfico ilustra la diferencia de escala entre las fuentes de energía convencionales y renovables, destacando este punto. El potencial de crecimiento de la biomasa como fuente de energía más limpia y sostenible.

### Potencial de la Biomasa de la Caña de Azúcar

La industria azucarera en Colombia genera una gran cantidad de subproductos, principalmente el bagazo, la paja, y la melaza. Según datos de Asocaña (2021), Colombia produce aproximadamente 30 millones de toneladas de caña de azúcar al año, lo que genera una cantidad significativa de bagazo, estimada en alrededor del 30% del peso de la caña. Este bagazo, tradicionalmente utilizado como combustible para las calderas de los ingenios, se ha convertido en un recurso clave para la producción de energía renovable.

### Producción de Bioetanol

El bioetanol es uno de los biocombustibles más importantes derivados de la caña de azúcar. En Colombia, la producción de bioetanol a partir de caña se ha consolidado como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, con una capacidad instalada que permite cubrir una parte significativa de la demanda de etanol para la mezcla con gasolina. Según Gómez et al. (2018), la producción de bioetanol en Colombia no solo reduce la dependencia de combustibles importados, sino que también contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, dado que el etanol emite hasta un 70% menos de CO<sub>2</sub> en comparación con la gasolina.

El proceso de producción de bioetanol comienza con la extracción del jugo de caña, seguido de la fermentación y destilación para obtener el alcohol etílico. Además, la melaza, un subproducto del proceso azucarero, se utiliza como materia prima en la producción de etanol, lo que maximiza el aprovechamiento de la caña y minimiza los residuos. En Colombia, se han implementado programas para incentivar el uso de bioetanol, lo que ha impulsado el desarrollo de una industria robusta que abastece el mercado interno y tiene potencial de exportación (Arango et al., 2016).

### Cogeneración de Energía

Otro uso significativo del bagazo es en la cogeneración de energía eléctrica. La cogeneración consiste en la producción simultánea de electricidad y vapor mediante la

combustión del bagazo en calderas de alta eficiencia. Esta práctica no solo satisface las necesidades energéticas de los ingenios, sino que también permite vender el excedente de electricidad a la red nacional, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética del país (Sánchez et al., 2017).

En Colombia, la cogeneración a partir del bagazo de caña de azúcar ha demostrado ser una opción viable y rentable. Los ingenios azucareros del Valle del Cauca son pioneros en esta tecnología, generando una cantidad significativa de electricidad que es comercializada a la red, lo que ayuda a estabilizar la oferta de energía durante las temporadas secas, cuando la generación hidroeléctrica disminuye (Garzón et al., 2019). Esta sinergia entre la industria azucarera y el sector energético es un ejemplo de cómo la biomasa puede integrarse en un modelo de desarrollo sostenible.

#### Producción de Biogás y Otros Biocombustibles

Además del bioetanol y la cogeneración, la biomasa de caña de azúcar también puede ser utilizada para la producción de biogás a través de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, como la vinaza, que es un subproducto líquido del proceso de destilación. El biogás producido puede ser utilizado como combustible para generar electricidad o calor, y el digestato, el material residual de la digestión, puede aplicarse como fertilizante, cerrando así el ciclo de nutrientes en la agricultura (Osorio et al., 2020).

El desarrollo de tecnologías para la producción de biogás a partir de subproductos de la caña de azúcar es aún incipiente en Colombia, pero representa una oportunidad significativa para reducir las emisiones de metano y mejorar la sostenibilidad de la producción de caña. Además, la producción de otros biocombustibles avanzados, como el biodiésel a partir de aceites extraídos de las semillas de caña, está siendo explorada como una alternativa viable, aunque aún enfrenta desafíos tecnológicos y económicos (Zapata et al., 2021).

### **Desafíos y Perspectivas**

A pesar de los avances, el aprovechamiento de la biomasa de caña de azúcar en Colombia enfrenta desafíos significativos. Entre ellos, se encuentran las limitaciones tecnológicas, la necesidad de inversiones en infraestructura, y la competencia con otros usos de la tierra. Sin embargo, las perspectivas son alentadoras, ya que las políticas públicas están cada vez más enfocadas en promover la sostenibilidad y la diversificación energética.

El futuro del aprovechamiento de la biomasa en Colombia depende en gran medida de la capacidad de la industria y el gobierno para superar estos desafíos y fomentar la innovación tecnológica. La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, como la producción de bioetanol de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos, son cruciales para maximizar el potencial de la biomasa de caña de azúcar (Arango et al., 2016).

En el caso específico del Ingenio Mayagüez en Colombia, la biomasa generada principalmente como bagazo puede ser aprovechada para producir energía térmica, la cual es esencial para el funcionamiento de las calderas. A continuación, se describen los procesos de transformación de la biomasa de caña de azúcar y un enfoque para convertirla en combustible para las calderas del Ingenio Mayagüez.

La biomasa de caña de azúcar incluye varios subproductos

- El Bagazo, es el residuo fibroso que queda después de extraer el jugo de la caña.
- La Paja, consiste en las hojas y puntas de la caña que son removidas durante la cosecha.
- Melaza: Un subproducto viscoso del proceso de extracción de azúcar, aunque menos relevante para la combustión directa.

Estos subproductos pueden ser transformados a través de varios procesos:

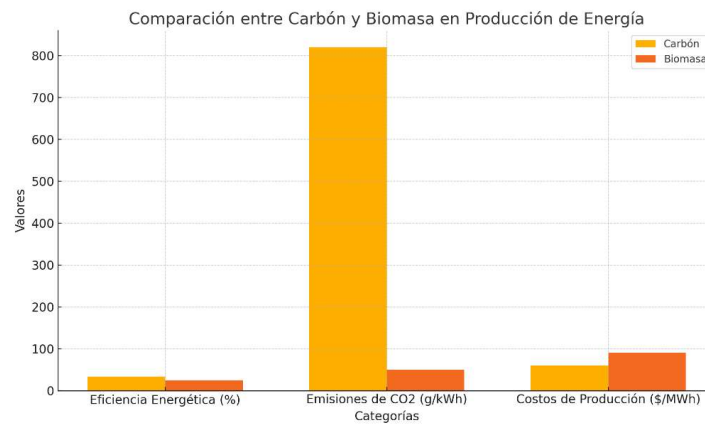
1. Combustión Directa: La combustión directa es el proceso más comúnmente utilizado en los ingenios azucareros. El bagazo de caña se quema directamente en las calderas para generar vapor. Este vapor es luego utilizado para mover turbinas que producen electricidad

y también para los procesos de evaporación en la producción de azúcar. La eficiencia de este proceso depende de la humedad y la densidad energética del bagazo, factores que se pueden optimizar mediante el secado previo del material.

2. Cogeneración: La cogeneración es una tecnología que permite la producción simultánea de electricidad y calor útil. En los ingenios azucareros, el bagazo es quemado en calderas de alta presión para producir vapor, el cual es utilizado para generar electricidad a través de turbinas de vapor. El vapor de escape de las turbinas se utiliza luego para los procesos de calentamiento en la producción de azúcar. Este método maximiza el aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa, permitiendo que los ingenios sean autosuficientes en términos de energía e incluso puedan vender el excedente de electricidad a la red nacional.

3. Gasificación: La gasificación es un proceso en el cual la biomasa, como el bagazo de caña, se convierte en un gas de síntesis (syngas) mediante la aplicación de calor en un entorno con bajo contenido de oxígeno. Este gas de síntesis, compuesto principalmente de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, puede ser utilizado como combustible en calderas, o convertido en electricidad y otros productos químicos. La gasificación es menos común en los ingenios debido a su complejidad y costo, pero ofrece la ventaja de ser más limpia y eficiente que la combustión directa.

4. Pirólisis: La pirólisis es un proceso térmico que descompone la biomasa en ausencia de oxígeno, produciendo biocarbón, bioaceite y gas de síntesis. El biocarbón puede ser utilizado como combustible sólido, mientras que el bioaceite y el gas de síntesis pueden ser refinados para producir biocombustibles líquidos o gaseosos. Este proceso es más avanzado y no se utiliza ampliamente en ingenios azucareros, pero representa una opción para diversificar la producción de biocombustibles.



*Tabla 2. Comparación entre energía producida con carbón vs energía producida con Biomasa*

Es por ello que realizamos la comparación entre la producción de energía utilizando carbón (un mineral fósil) y biomasa revelan diferencias significativas en eficiencia energética, impacto ambiental y costo.

El carbón tiene una alta eficiencia energética, siendo la eficiencia de conversión promedio de las centrales térmicas del 33-40%. Biomasa: debido a la baja densidad energética y la composición variable del material, la eficiencia energética de la biomasa es generalmente menor que la del carbón, rondando el 20-25%.

El carbón, es uno de los combustibles fósiles más contaminantes, emitiendo aproximadamente 820 gramos de dióxido de carbono por kilovatio hora de electricidad generada. Aunque la biomasa también emite dióxido de carbono cuando se quema, se considera carbono neutral porque el dióxido de carbono liberado se compensa con el dióxido de carbono absorbido por la planta a medida que crece. Las emisiones pueden ser tan bajas como 50 gramos de CO<sub>2</sub> por kWh, según el tipo de biomasa y el proceso utilizado.

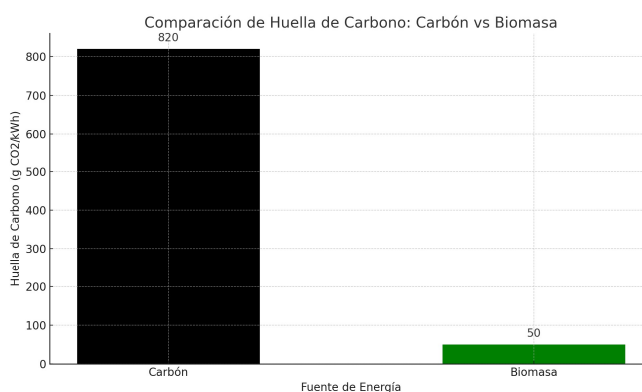
Para el Ingenio Mayagüez, un enfoque viable sería la cogeneración a partir del bagazo de caña, un proceso que ya es utilizado por muchos ingenios en Colombia y ha demostrado ser eficiente y rentable.

1. Preparación del Bagazo: El bagazo debe ser preparado para optimizar su uso como combustible. Esto incluye el secado para reducir su contenido de humedad, lo cual mejora su eficiencia de combustión. Se puede utilizar el calor residual de las calderas para este secado.

2. Combustión en Calderas de Alta Presión: Una vez seco, el bagazo es alimentado en calderas de alta presión. Estas calderas queman el bagazo para generar vapor a alta presión, que es luego utilizado para generar electricidad mediante turbinas de vapor. El uso de calderas de alta eficiencia es clave para maximizar la generación de energía.

3. Uso del Vapor de Escape: El vapor de escape de las turbinas no se desperdicia. En cambio, es utilizado en los procesos de producción de azúcar, como la evaporación del jugo de caña y la cristalización. Esto asegura un uso eficiente de la energía térmica disponible.

4. Gestión de Residuos y Mantenimiento: Es fundamental mantener un sistema de gestión de residuos eficiente para manejar las cenizas resultantes de la combustión del bagazo. Estas cenizas pueden ser recicladas como fertilizante en los campos de caña, cerrando el ciclo de nutrientes.



*Tabla 3. Comparación de huella de carbono entre el Carbón vs Biomasa*

Este gráfico muestra la diferencia en la huella de carbono al producir energía utilizando carbón (un mineral fósil) frente a biomasa. Esto incluye las emisiones de CO<sub>2</sub> por kilovatio-hora producidas por cada fuente de energía.

Respecto de cada kWh de energía producida del carbón, se producen aproximadamente 820 gramos de CO<sub>2</sub>, lo que supone una enorme huella de carbono. La biomasa produce mucho menos CO<sub>2</sub>, en torno a 50 gramos por kWh, lo que la convierte en una opción más sostenible desde el punto de vista medioambiental. El contraste resalta las ventajas ambientales de la biomasa sobre el carbón, particularmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, tal como lo menciona la International Energy Agency (2020), la cual es una fuente clave de información global sobre energía y emisiones, ésta proporciona un análisis exhaustivo de las tendencias mundiales de energía y emisiones de dióxido de carbono en su informe.

### **Conclusiones**

El Ingenio Mayagüez, al igual que otros ingenios en Colombia, tiene un enorme potencial para aprovechar la biomasa de caña de azúcar, especialmente el bagazo, para la generación de energía. La cogeneración se presenta como el proceso más adecuado, ya que permite maximizar el uso de la biomasa para la producción de electricidad y calor, garantizando la autosuficiencia energética del ingenio y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica del sector azucarero.

La biomasa derivada de la caña de azúcar es un recurso valioso para la producción de combustibles y energías renovables en Colombia. Desde el bioetanol y la cogeneración hasta la producción de biogás, estas tecnologías ofrecen oportunidades para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar la matriz energética y promover el desarrollo económico en las zonas rurales. Aunque existen desafíos, las políticas y las inversiones en innovación tecnológica pueden llevar a Colombia a convertirse en un líder en la bioenergía, aprovechando al máximo el potencial de la caña de azúcar.

La biomasa derivada de la caña de azúcar representa un recurso valioso que, cuando se transforma y aprovecha adecuadamente, puede contribuir significativamente a la sostenibilidad energética y la reducción de residuos en la industria azucarera. Tecnologías como la fermentación para la producción de bioetanol, la gasificación para la generación de energía, y la fabricación de materiales de construcción a partir del bagazo, son solo algunas de las maneras en que la biomasa de caña de azúcar puede ser utilizada de manera eficiente. La implementación de estas tecnologías no solo tiene un impacto positivo en el medio ambiente, sino que también ofrece oportunidades económicas para los ingenios azucareros, promoviendo una transición hacia una economía más circular y sostenible.

Los Beneficios del Proceso en la implementación de un sistema de cogeneración en el Ingenio Mayagüez tiene varios beneficios, el primero es la Autosuficiencia Energética: El ingenio puede cubrir todas sus necesidades energéticas, reduciendo la dependencia de fuentes externas. El segundo, es la reducción de Costos, ya que, la energía generada in situ es más económica y menos susceptible a las fluctuaciones de precios de energía en el

mercado. Al utilizar un recurso renovable como el bagazo en lugar de combustibles fósiles, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. El tercero, es la posibilidad de venta de excedentes, ya que, el excedente de electricidad producido puede ser vendido a la red eléctrica nacional, generando ingresos adicionales.

El Ingenio Mayagüez, al igual que otros ingenios en Colombia, tiene un enorme potencial para aprovechar la biomasa de caña de azúcar, especialmente el bagazo, para la generación de energía. La cogeneración se presenta como el proceso más adecuado, ya que permite maximizar el uso de la biomasa para la producción de electricidad y calor, garantizando la autosuficiencia energética del ingenio y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica del sector azucarero.

### Referencias

- Bastidas, L.R. (2007). *El inicio del siglo XXI*. Planeta. Sitio web:  
<http://www.rbastidasl.com/libro-inicio-del-sigloxxi>.
- Borrero, E. E., Silva, M. A., & De Oliveira, M. A. (2020). The impact of sugarcane bioethanol on greenhouse gas emissions: A Brazilian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109-123.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32.
- Geng, Y., & Doberstein, B. (2008). Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development'. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(3), 231-239.
- Gómez, P. (2017). Evolución y desarrollo de los ingenios azucareros en Colombia. *Revista de Economía y Sociedad*, 12(2), 45-60.
- Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., & Faaij, A. P. C. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle-, and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 28(4), 384-410.
- Ingenio Mayagüez S.A. (n.d.). Historia. Recuperado de  
<https://www.Mayagüez.com.co/historia>
- Jiang, X., Li, Y., Huang, D., & Cui, Y. (2018). Performance of sugarcane bagasse composite panels as a sustainable material for building applications. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1553-1560.
- Liu, Y., Rinz, P., & Kazmierczak, R. (2018). Sugarcane bagasse: applications for energy and materials. *Energy Procedia*, 138, 725-730.
- Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J. C., Llorens-Montes, F. J., & Cortés-García, F. J. (2017). The use of a partial least squares-structural equation modeling approach to construct a novel index of sustainable development: A case study of the sugar-energy sector in Brazil. *Sustainability*, 9(4), 641.

- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380.
- Rodrigues, L. P., Almeida, R. M., & Silva, J. A. (2017). Bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. In *Bioethanol: Science and Technology* (pp. 27-56). Springer.
- Rosillo-Calle, F., Pelkmans, L., & Walter, A. (2019). A global overview of vegetable oils, with reference to biodiesel. *Energy Policy*, 37(1), 9-13.
- Silva, J. F., Costa, M. D., & Carvalho, M. G. (2018). Bioethanol from sugarcane biomass: Challenges and perspectives in developing countries. *Energy*, 142, 1192-1201.
- Souza, G. M., Victoria, R. L., Joly, C. A., & Verdade, L. M. (2017). Sugarcane ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment. UNICA and FAPESP, 240.
- Sariatli, F. (2017). Linear economy versus circular economy: A comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 6(1), 31-34.
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438.
- Zhang, W., Liu, Y., Bi, J., Huang, M., & Bouman, B. (2015). Sustainable water use in China: From field to watershed. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 9, 663-671.