



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria
de Colombia

**LA U VERDE
DE COLOMBIA**

Personería Jurídica No. 2599
del 13 de marzo de 1986,
Ministerio de Educación Nacional

**PROPUESTA DE UN SISTEMA TECNIFICADO, PARA EL
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS GENERADOS EN LOS PROCESOS DE
CORTE Y PULIDO DE MADERA EN LA EMPRESA LEH CARPINTERIA DE CHÍA
CUNDINAMARCA**

JORGE EDUARDO HERRERA GUITARRERO

JOHN SEBASTIAN RODRIGUEZ MEDINA

**FACULTAD DE CIENCIAS JURIDICAS Y SOCIALES
CURSO DE PROFUNDIZACIÓN EN RESPONSABILIDAD AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA
BOGOTÁ D.C**

2.025



**PROPUESTA DE UN SISTEMA TECNIFICADO, PARA EL
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS GENERADOS EN LOS PROCESOS DE
CORTE Y PULIDO DE MADERA EN LA EMPRESA LEH CARPINTERIA DE CHÍA
CUNDINAMARCA**

JORGE EDUARDO HERRERA GUITARRERO

JOHN SEBASTIAN RODRIGUEZ MEDINA

Trabajo de grado presentado para optar el título de

INGENIERO INDUSTRIAL

INGENIERO MECATRONICO

Directora:

DIANA JAZMÍN PÉREZ GUEVARA

FACULTAD DE CIENCIAS JURIDICAS Y SOCIALES

CURSO DE PROFUNDIZACIÓN EN RESPONSABILIDAD AMBIENTAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA

BOGOTÁ D.C

2.025



Tabla de contenido

Lista De Gráficos.....	6
Lista De Tablas.....	7
1. Resumen.....	8
2. Introducción.....	10
3. Definición del problema.....	12
4. Justificación.....	16
5. Objetivos.....	19
5.1. Objetivo General.....	19
5.2. Objetivos Específicos.....	19
6. Marco de referencia.....	20
6.1. Estado del arte:.....	20
6.2. Marco teórico:.....	23
6.2.1. Fundamentos mecánicos y sistemas de control.....	23
6.2.1.1. Tipos de Motores.....	23
6.2.1.2. Componentes mecánicos.....	24
6.2.1.3. Sistemas de control.....	25



6.2.1.3.1. Sensores	25
6.2.2. Gestión de Residuos Sólidos en la Industria de la Madera	26
6.2.3. Aprovechamiento de Residuos de Madera.....	28
6.2.4. Sistemas Tecnificados de Transformación de Residuos	29
6.2.5. Sostenibilidad Ambiental y Economía Circular.....	33
6.3. Marco legal:.....	35
6.3.1. Legislación Colombiana y normas INCONTEC.....	35
6.3.2. Normas Técnicas Internacionales.....	38
6.4. Marco geográfico contextual.....	39
7. Metodología	42
7.1. Tipo de Investigación	42
7.2. Diseño de la Investigación	42
7.3. Fuentes de Información.....	44
7.4. Técnicas de Recolección de Información.....	44
7.5. Análisis de la Información	44
7.6. Hipótesis.....	45
7.7. Desarrollo de la Propuesta.....	45
7.8. Validación de la Propuesta.....	46



8.	Resultados y discusión	47
8.1.	Diagnóstico inicial sobre los tipos y cantidades de residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera	47
8.2.	Alternativas tecnificadas existentes para el aprovechamiento de residuos de madera aplicables al contexto de la empresa.	57
8.2.1.	Peletizado de Madera	57
8.2.2.	Briquetado de Madera	62
8.2.3.	Gasificación de Residuos de Madera	65
8.3.	Evaluación de la viabilidad técnica y ambiental de las alternativas seleccionadas para su posible implementación.....	68
9.	Conclusiones	77
10.	Recomendaciones	80
11.	Referencias.....	81



Lista De Gráficos

Ilustración 1. Composición de Residuos Sólidos a nivel nacional.	12
Ilustración 2. Cantidad de residuos sólidos generados en Colombia.....	13
Ilustración 3. Residuos de madera generados al año	14
Ilustración 4. Economía Circular	34
Ilustración 5. Ubicación Geográfica Carpintería LEH	40
Ilustración 6. Recipiente medición residuos madera	52
Ilustración 7. Área de producción LEH Carpintería	53
Ilustración 8. Viruta de madera.....	54
Ilustración 9. Retazos de madera	55
Ilustración 10. Aserrín de madera.....	56
Ilustración 11. Diagrama de proceso de peletizado	57
Ilustración 12. Maquina peletizadora.....	58
Ilustración 13. Diagrama de proceso briquetado	63
Ilustración 14. Maquina Briqueteadora.....	64
Ilustración 15. Diagrama de proceso gasificación	66
Ilustración 16. Gasificadora de madera	67



Lista De Tablas

Tabla 1. Estrategias aprovechamiento residuos de madera	29
Tabla 2. Comparativa sistemas tecnificados de transformación de residuos de la madera	32
Tabla 3. Legislación Colombiana y normas INCONTEC	35
Tabla 4. Normas técnicas internacionales.....	38
Tabla 5. Cantidad de residuos de madera	51
Tabla 6. Proyección mensual de residuos de madera	51
Tabla 7. Tecnologías del peletizado.....	61
Tabla 8. Comparación de mecanismos y estructura.....	73
Tabla 9. Comparación de sistema de sensado, control y automatización	74
Tabla 10. Desempeño de maquinas	76



1. Resumen

Esta monografía presenta una propuesta de sistema tecnificado para el aprovechamiento de residuos generados durante los procesos de corte y pulido de madera en la empresa LEH Carpintería, ubicada en Chía, Cundinamarca. A través de una investigación de tipo documental y observacional, se identificaron los principales residuos (viruta, aserrín y retazos) y se evaluaron tres alternativas tecnológicas: peletizado, briquetado y gasificación. El estudio integra principios de sostenibilidad, economía circular y responsabilidad ambiental, así como criterios de eficiencia operativa y soluciones automatizadas. La propuesta busca disminuir el impacto ambiental de la empresa, optimizar el uso de recursos y aportar valor agregado mediante la transformación de desechos en productos reutilizables.

Palabras claves: Residuos de madera, sostenibilidad, economía circular, peletizado, briquetado, gasificación

Abstract

This monograph presents a proposal for a technified system aimed at utilizing wood waste generated from cutting and sanding processes at LEH Carpintería, located in Chía, Cundinamarca. Through documentary and observational research, the main types of waste (wood shavings, sawdust, and cuttings) were identified, and three technological alternatives were evaluated: pelletizing, briquetting, and gasification. The study incorporates principles of sustainability, circular economy, and environmental responsibility, as well as operational efficiency and



automated solutions. The proposal aims to reduce the company's environmental footprint, optimize resource usage, and add value by transforming waste into energy products or reusable materials.

Keywords: wood waste, sustainability, circular economy, pelletizing, briquetting, gasification



2. Introducción

El crecimiento de la industria de la carpintería en Colombia ha generado múltiples beneficios económicos y sociales, ya que se movilizan 2.88 millones de m³ al año cifra reportada por fedemaderas (Fedemaderas, 2024), pero también ha traído diferentes desafíos significativos relacionados con la gestión de residuos sólidos, debido a que se generan aproximadamente entre 0,65 a 1,31 millones de toneladas de residuos de madera al año (Lopez Chalarca, et al., 2019), lo cual es una cifra significativa, porque se generan especialmente aquellos derivados de los procesos de corte y pulido de madera. Estos residuos son considerados desechos y representan una oportunidad para su aprovechamiento mediante sistemas que permitan su transformación en productos reutilizables.

La presente investigación tiene como propósito fundamental crear una propuesta de un sistema tecnificado que permita el aprovechamiento de residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera en la empresa LEH Carpintería, ubicada en Chía, Cundinamarca. Esta propuesta busca no solo mitigar el impacto ambiental derivado de la acumulación de residuos, sino también mejorar la eficiencia productiva de la empresa mediante la transformación de sus residuos generados.



El desarrollo de este proyecto se sustenta en la necesidad de adoptar prácticas sostenibles, mediante tecnologías que permitan aprovechar los residuos de la madera y dar cumplimiento de normativas ambientales, generando un valor agregado para la empresa.

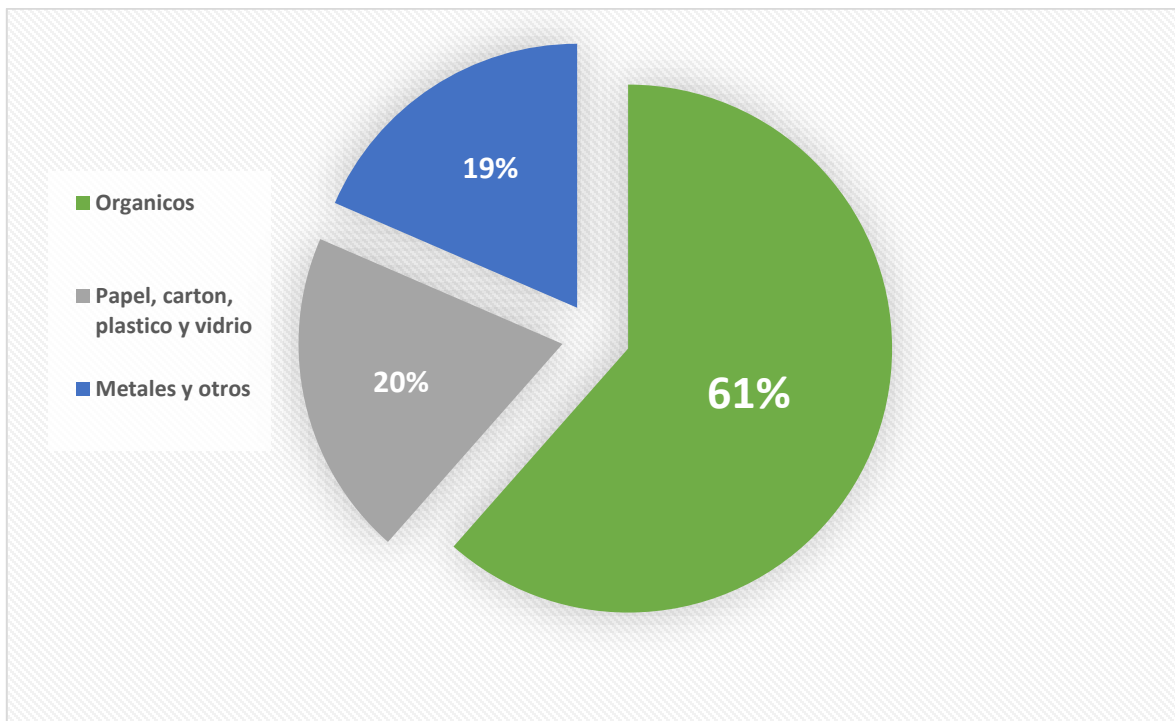
La metodología empleada incluye un análisis descriptivo y documental, acompañado de un estudio de caso específico en LEH Carpintería, permitiendo adaptar las soluciones propuestas a las necesidades y características particulares de la empresa. A lo largo del documento, se presentará un diagnóstico inicial de la situación actual de la empresa, así mismo, una propuesta concreta del sistema tecnificado y se analizará su viabilidad técnica y ambiental.

De esta manera, la investigación pretende ofrecer una solución práctica y sostenible para el aprovechamiento de residuos de madera, fortaleciendo así la competitividad de LEH Carpintería y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental en el sector.

3. Definición del problema

Los residuos sólidos generados a nivel mundial varían en su composición en donde el 46% corresponde a residuos sólidos orgánicos (RSO) (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). En la siguiente ilustración se observa que a nivel nacional se presentan un porcentaje de 61% de residuos orgánicos, siendo esto una cifra importante a la hora de determinar los residuos de la madera.

Ilustración 1. Composición de Residuos Sólidos a nivel nacional.



Fuente: Polania Chacón, 2017

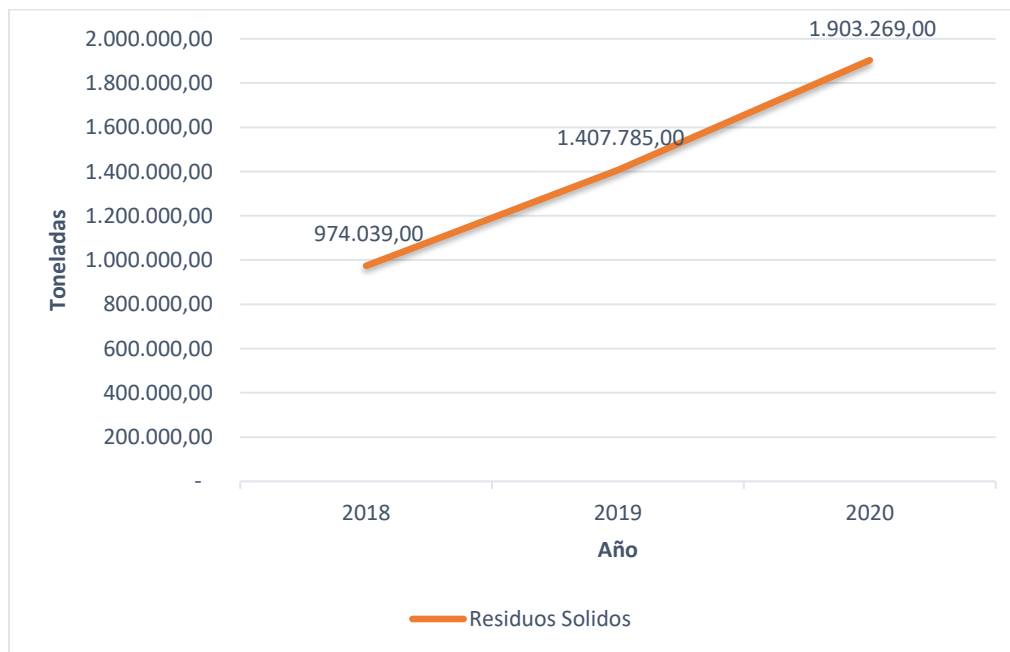
Colombia en la actualidad se enfrenta a muchos desafíos en relación con el manejo adecuado de residuos sólidos, debido al incremento de los residuos generados en el país alcanzando



la cifra 32.580 toneladas/día para el año 2020 esta información fue la más reciente entregada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (Minambiente, 2022)

En la Ilustración se evidencia un incremento en la generación de residuos sólidos en Colombia entre 2018 y 2020, pasando de 974.039 toneladas a 1.903.269 toneladas, lo que representa un aumento aproximado al 95 % en tres años, esta tendencia da a entender el crecimiento urbano e industrial del país, así como la limitada aplicación de estrategias de aprovechamiento y reciclaje dentro del modelo de economía circular.

Ilustración 2. Cantidad de residuos sólidos generados en Colombia

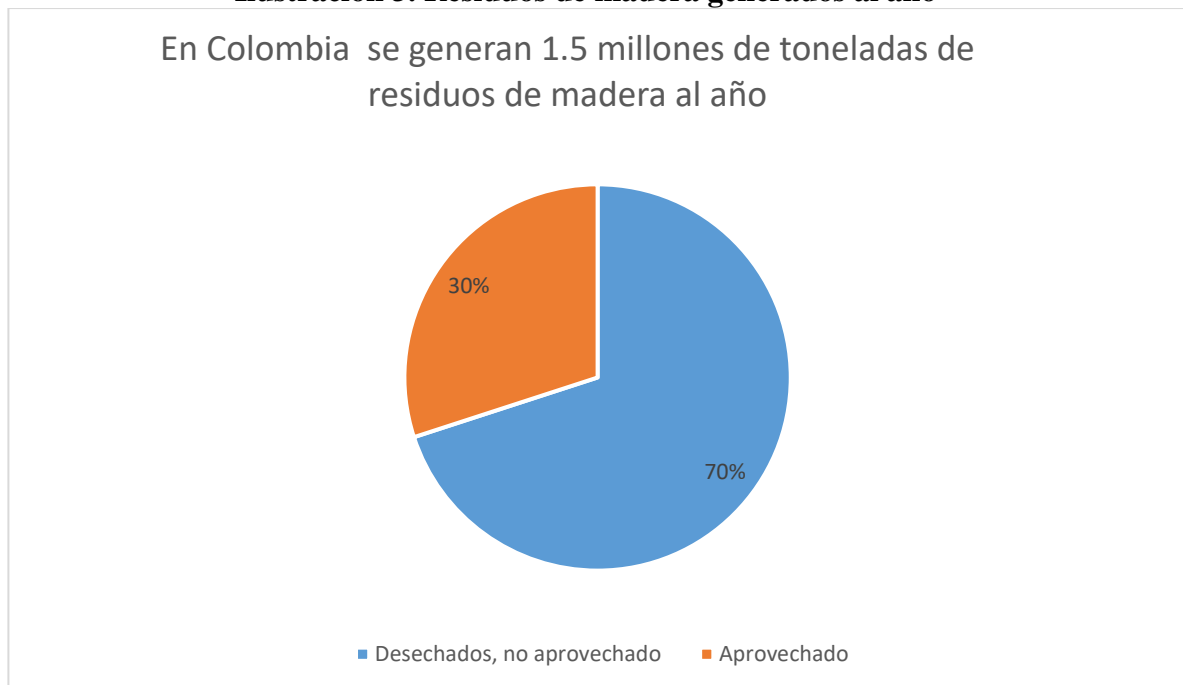


Fuente: Minambiente, 2022



La industria de la madera en Colombia es un sector importante para la economía del país, generando empleo y contribuyendo al desarrollo regional. Sin embargo, esta actividad también conlleva impactos ambientales significativos, especialmente por la generación de residuos durante en la transformación de la madera. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020) en Colombia se generan aproximadamente 1.5 millones de toneladas de residuos de madera al año, de los cuales solo un 30% es aprovechado, mientras que el resto es dispuesto en rellenos sanitarios o quemado, lo que contribuye a la contaminación del aire y al deterioro de los recursos naturales (MinAmbiente, 2020)

Ilustración 3. Residuos de madera generados al año



Fuente: Minambiente, 2020



En el municipio de Chía se generan aproximadamente 1100 toneladas/día, siendo una cifra relevante que va incrementado de manera exponencial cada año, dando a conocer el impacto ambiental del municipio; (Porrás Reyes, 2018) estos residuos están siendo enviados a disposición final al relleno sanitario nuevo Mondoñedo, este relleno tiene una vida útil de 10 años, por lo cual es necesario buscar alternativas, debido a que actualmente el nuevo relleno tiene capacidad hasta el año 2037. (Gobernación de Cundinamarca, 2024)

En el caso específico de la empresa LEH Carpintería, ubicada en Chía, Cundinamarca, se ha logrado identificar que durante los procesos de corte y pulido de madera se generan grandes cantidades de residuos, como aserrín, virutas y trozos de madera no utilizables, estos residuos no son aprovechados de una manera eficiente, representando una pérdida de recursos y un impacto ambiental negativo. Se observó la necesidad de tener un sistema tecnificado para el manejo de estos residuos, puesto que se limita la posibilidad de convertirlos en subproductos útiles, como tableros aglomerados, biomasa para generación de energía o compostaje.

¿Qué condiciones técnicas, ambientales y operativas deben considerarse para implementar un sistema de transformación tecnificado de residuos en LEH Carpintería, que contribuya a la sostenibilidad de sus procesos?



4. Justificación

La industria maderera en Colombia, y particularmente en el municipio de Chía, Cundinamarca, ha crecido de manera continua en los últimos años debido a la alta demanda de productos de carpintería. Esta actividad ha conllevado también un incremento en la generación de residuos sólidos, principalmente viruta, aserrín y trozos de madera en los procesos de corte y pulido. En empresas como LEH Carpintería, estos residuos representan no solo un problema ambiental, sino también una pérdida de material potencialmente aprovechable.

En este contexto, se justifica plenamente la propuesta de un sistema de transformación tecnificado, que permita convertir los residuos generados en productos reutilizables o en fuentes de energía alternativa. Dicho sistema no solo aportaría soluciones a nivel ambiental, sino que también optimizaría los procesos internos y los costos de operación de la empresa. La valorización de residuos como estrategia de sostenibilidad se ha convertido en una práctica clave para el desarrollo industrial moderno (Rios & Martinez, 2022).

Desde una perspectiva técnica, es esencial evaluar las tecnologías más apropiadas para la transformación de residuos de la madera. Equipos como trituradoras, peletizadoras y briquetadoras permiten convertir los residuos en productos reutilizables o en fuentes de energía alternativa (Escobar Córdoba, 2018). La implementación de estas tecnologías debe ir acompañada de un



diagnóstico detallado de la composición y características de los residuos generados, para garantizar la eficiencia del sistema propuesto.

Además, la adopción de tecnologías adecuadas para el procesamiento de residuos de madera puede mejorar la eficiencia energética de la empresa y reducir su dependencia de fuentes de energía no renovables. Por ejemplo, la utilización de residuos de madera como fuente de energía renovable ha demostrado ser una estrategia efectiva para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la economía circular (Reciman, 2024)

Desde una perspectiva operativa, la implementación de un sistema tecnificado requiere considerar algunos aspectos como la capacitación del personal, la adaptación de procesos existentes y la inversión en maquinaria adecuada. Estos factores son fundamentales para poder garantizar la viabilidad y sostenibilidad del sistema en la empresa a largo plazo.

Este proyecto se enmarca en los pilares misionales de UNIAGRARIA, los cuales son conocidos como el SER: Sustentabilidad, Emprendimiento y Regionalización. La sustentabilidad se ve reflejada en la implementación de un sistema tecnificado que promueve el aprovechamiento eficiente de los residuos madereros, contribuyendo a la conservación del medio ambiente. El emprendimiento se manifiesta en la innovación y desarrollo de soluciones tecnológicas que



generan valor agregado a partir de los residuos, fomentando una cultura emprendedora dentro de la empresa LEH carpintería. La regionalización se evidencia en el impacto positivo que este proyecto tiene en el desarrollo económico y social de la región de Chía, Cundinamarca, al fortalecer las capacidades locales y generar oportunidades de empleo. (Uniagraria, 2023)

En conclusión, la propuesta de un sistema de transformación tecnificado para el aprovechamiento de residuos de la madera en LEH Carpintería representa una oportunidad para mejorar la sostenibilidad ambiental y económica de la empresa. Al abordar las condiciones técnicas, ambientales y operativas necesarias para su implementación, esta monografía contribuirá al desarrollo de soluciones prácticas y eficientes en el manejo de residuos en la industria de la carpintería.



5. Objetivos

5.1.Objetivo General

Elaborar una propuesta de sistema de transformación tecnificado, para el aprovechamiento de residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera en la empresa LEH carpintería de Chía Cundinamarca

5.2.Objetivos Específicos

Realizar un diagnóstico inicial sobre los tipos y cantidades de residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera.

Identificar alternativas tecnificadas existentes para el aprovechamiento de residuos de madera aplicables al contexto de la empresa.

Evaluar la viabilidad técnica y ambiental de las alternativas seleccionadas para su posible implementación.



6. Marco de referencia

6.1. Estado del arte:

Estado del Arte: Aprovechamiento de Residuos Madereros en Colombia

En Colombia, la industria maderera genera una cantidad significativa de residuos durante los procesos de corte y pulido. Estos residuos, si no se gestionan adecuadamente, pueden representar un problema ambiental y económico para las empresas del sector. Por ello, se han desarrollado diversas investigaciones y proyectos enfocados en el aprovechamiento eficiente de estos residuos, contribuyendo así a la sostenibilidad de los procesos productivos.

Uno de los enfoques principales ha sido la transformación de residuos madereros en biocombustibles. El proyecto SusValEn, busca convertir residuos lignocelulósicos en combustibles sostenibles como hidrógeno renovable, biometano y biometanol, reduciendo así el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria de transformación de la madera. (Fedemaderas, 2024)

Este proyecto demuestra que se puede generar un aprovechamiento de los residuos de la madera en productos sostenibles que contribuyan a reducir el impacto que genera esta industria en el contexto nacional, como lo son los biocombustibles del proyecto de SusValEn.

Además, se han explorado tecnologías para la transformación de residuos de material aglomerado de madera con fines de reúso o reciclaje. Estas tecnologías incluyen procesos como la producción de pellets y briquetas, la gasificación y la pirolisis, que permiten convertir los residuos



en productos reutilizables o en fuentes de energía alternativa. (Reyes Echeverría, Bautista Rojas, & Quintero Cardenas, 2016)

Según lo anterior, se han evidenciado diferentes alternativas tecnológicas para la transformación de residuos de madera, que benefician en la creación de fuentes de energía alternativas o de nuevos productos.

En el contexto colombiano, también se han desarrollado herramientas de decisión para la valorización de los residuos de madera. Estas herramientas permiten clasificar los desechos de madera basándose en análisis de contaminantes, facilitando así la elección de las mejores opciones de reciclaje o incineración. (Pazzaglia & Castellani, 2023)

Según Pazzaglia & Castellani se han desarrollado herramientas que identifican residuos madereros en Colombia, analizando diferentes tipos de contaminantes para su valorización a la hora de transformarlos.

Por otro lado, se han realizado estudios sobre el aprovechamiento de los residuos de madera generados en el sector de la construcción en ciudades como Bogotá. Estos estudios proponen la recolección y trituración de la madera para venderla a productores de aglomerados, promoviendo así la economía circular y la sostenibilidad en el sector de la construcción. (Florez Correa, Gonzalez Acero, & Murcia Paez, 2016)

En el estudio anterior desarrollado en la ciudad de Bogotá, se evidencia que el sector de la construcción, se beneficia a partir del residuo de madera, debido a que se generan una economía circular, siendo esto un factor importante para el uso de residuos.



En resumen, el aprovechamiento de residuos madereros en Colombia ha sido objeto de diversas investigaciones y proyectos que buscan transformar estos residuos en recursos valiosos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica del país.

Generación distribuida mediante gasificación de biomasa

El estudio desarrollado por Pérez et al. (2012) constituye una referencia clave en la generación distribuida de energía a partir de biomasa, al analizar la viabilidad técnica y económica de sistemas de gasificación acoplados a motores de combustión interna (Perez, Lenis, Rojas, & Leon, 2012). Este trabajo expone diferentes tecnologías de gasificación de lecho fijo y lecho fluidizado, comparando su eficiencia energética, costos de inversión y reducción de emisiones de CO₂. En este proyecto se destaca la relevancia de sensores de temperatura, flujo y presión para monitorear el comportamiento del reactor y optimizar la producción de gas de síntesis, el aporte de esta investigación es fundamental, ya que demuestra cómo la integración de control automatizado puede mejorar la sostenibilidad energética, un enfoque directamente aplicable al aprovechamiento de residuos de madera en la empresa LEH Carpintería.



6.2.Marco teórico:

6.2.1. Fundamentos mecánicos y sistemas de control

El desarrollo de sistemas tecnificados para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos requiere una comprensión integral de los fundamentos mecánicos y de control que intervienen en los procesos de peletizado, briqueteado y gasificación. Estas máquinas integran principios de la mecánica aplicada, la ingeniería eléctrica y el control, con el fin de garantizar una operación eficiente, segura y sostenible dentro de la industria.

6.2.1.1. Tipos de Motores

Un motor eléctrico es un dispositivo electromecánico que convierte energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de campos magnéticos y conductores de corriente, con la excepción de los motores piezoeléctricos y ultrasónicos. (Smith & Godwin, 2016)

En los equipos industriales modernos predominan los motores eléctricos de inducción trifásicos, debido a su robustez, bajo mantenimiento y alta eficiencia (WEG, 2024). Estos motores se utilizan comúnmente para accionar rodillos, prensas o tornillos sinfín, gracias a su buena relación torque-velocidad.

En casos donde se requiere control preciso de velocidad o torque, se emplean variadores de frecuencia, los cuales modulan la frecuencia de alimentación eléctrica, permitiendo ajustes precisos y un ahorro energético (Sanchez Abril, 2023). Dichos variadores integran controladores Proporcional Integral Derivado para mantener la estabilidad de la operación bajo cargas variables.



En zonas rurales o industrias con restricciones eléctricas, los motores de combustión interna representan una alternativa viable, especialmente cuando se integran a sistemas de cogeneración que aprovechan el gas producto de la gasificación de residuos para generar electricidad y calor (Lesme Jaén et al., 2022).

6.2.1.2. Componentes mecánicos

Los mecanismos constituyen la parte estructural y funcional del proceso de densificación, en las máquinas de pelletizado y briquetado, los componentes principales incluyen el sistema de transmisión, el mecanismo de compresión y los sistemas de alimentación.

Los ejes y rodamientos deben dimensionarse según el torque máximo, considerando la fatiga y las condiciones de operación continua. Las matrices o troqueles, que confieren forma y densidad al producto, están fabricadas con aceros tratados térmicamente para poder resistir el desgaste abrasivo de la biomasa. Su diseño en la parte del espesor, diámetro y geometría de los orificios influye directamente en la resistencia mecánica del pellet o briqueta (Mejía Vega & Perez Lozano, 2018)



La estructura mecánica de la máquina debe resistir vibraciones, choques y esfuerzos repetitivos. Para ello, los bastidores y bases se fabrican con un acero estructural, con uniones atornilladas o soldadas que mantengan la alineación. En el sistema de lubricación y sellado es crucial para proteger los componentes contra polvo, fricción y sobrecalentamiento, especialmente en ambientes con partículas de madera.

6.2.1.3. Sistemas de control

Los sistemas de control permiten garantizar la calidad del producto final, la seguridad operativa y la eficiencia energética. En equipos semitecnificados, el control más común es el PID clásico, que regula variables como velocidad del motor, presión del pistón o temperatura del proceso (Verdes Kairuz & Gonzalez Santos, 2015). En máquinas más avanzadas, los PLC se coordinan diferentes etapas de alimentación, prensado, corte y descarga, mediante lazos cerrados con sensores de temperatura, presión y humedad.

6.2.1.3.1. Sensores

Son dispositivos que detectan y miden diferentes tipos de variables físicas o químicas, transformándolas en señales eléctricas, las cuales pueden ser procesadas y analizadas.



Los sensores son componentes esenciales en los sistemas de automatización, ya que permiten registrar y analizar variables físicas del entorno para controlar distintos procesos. Entre los más utilizados se encuentran los sensores de temperatura, que emplean tecnologías como termistores o termopares para medir niveles de calor o frío en aplicaciones como climatización, electrodomésticos o sistemas industriales. Asimismo, los sensores de luz, que funcionan con fotodiodos o fototransistores, permiten detectar la intensidad lumínica, siendo fundamentales en cámaras, sistemas de iluminación automática y equipos de seguridad. (Ramirez Estrada & Hernandez Sanchez, 2024)

Otros dispositivos destacados son los sensores de presión, encargados de medir la presión de gases o líquidos en ámbitos médicos e industriales; los sensores de movimiento, que detectan presencia o desplazamiento de objetos mediante tecnologías infrarrojas, ultrasónicas o de detección de seguridad; y los sensores de humedad, que determinan la cantidad de agua presente en el aire o el suelo a través de variaciones en la resistencia o la capacitancia. Estos últimos resultan indispensables en aplicaciones agrícolas, monitoreo ambiental y sistemas de riego automatizados, optimizando la eficiencia y el control de diferentes procesos tecnológicos.

6.2.2. Gestión de Residuos Sólidos en la Industria de la Madera

La industria maderera genera una cantidad significativa de residuos sólidos, como aserrín, virutas y recortes, durante los procesos de corte y pulido. La gestión inadecuada de estos residuos puede ocasionar impactos ambientales negativos y pérdidas económicas para las empresas. Según



Amaya Cubillos, muchas empresas del sector no cuentan con planes de manejo de residuos sólidos, lo que representa una oportunidad para implementar estrategias que conviertan estos residuos en recursos aprovechables. (Amaya Cubillos, 2015)

Tipo de residuos generados:

En la industria maderera, los residuos sólidos pueden clasificarse en:

- Residuos de Corte: Fragmentos de madera resultantes de procesos de aserrado y dimensionado.
- Residuos de Pulido: Polvo de madera generado durante el lijado y acabado.
- Residuos de Recorte: Piezas sobrantes que no cumplen con las especificaciones de diseño.
- Aserrín y Virutas: Material resultante de la operación de sierras y cepillos industriales.

Impacto Ambiental de los Residuos

Los residuos madereros, si no se gestionan adecuadamente, pueden generar impactos ambientales significativos, tales como:

- Contaminación del suelo y del agua por acumulación de materiales orgánicos.
- Emisión de partículas y polvo en suspensión que afectan la calidad del aire.
- Riesgo de incendios debido a la naturaleza combustible de la madera.



6.2.3. Aprovechamiento de Residuos de Madera

El aprovechamiento de residuos de madera implica la transformación de desechos en productos útiles, como tableros aglomerados, pellets de biomasa y compost. Este proceso no solo reduce la cantidad de residuos enviados a vertederos, sino que también contribuye a la economía circular al extender el ciclo de vida de los materiales. Se destaca que el aprovechamiento adecuado de los residuos maderables puede generar beneficios económicos y ambientales significativos. (Gonzalez Beltran, Mejia Martinez, & Mendez Ariza, 2018)

Clasificación de Residuos de Madera

Los residuos de madera pueden clasificarse en:

- Residuos Primarios: Generados en procesos de corte y aserrado (aserrín, virutas).
- Residuos Secundarios: Provenientes de procesos de pulido y acabado (polvo de lijado).
- Residuos Terciarios: Restos de producción, como piezas defectuosas o recortes. (Lopez Chalarca, Vega Rodriguez, Rendon Colorado, & Tobón Rojas, 2019)

Estrategias de aprovechamiento

Existen diversas estrategias para el aprovechamiento de residuos de madera, entre estas se destacan, las siguientes:



Tabla 1. Estrategias aprovechamiento residuos de madera

Estrategia	Descripción	Ejemplos de Productos
Reciclaje	Transformar residuos en nuevos productos	Tableros aglomerados, pellets.
Compostaje	Utilización de residuos orgánicos como fertilizante	Compost, abono orgánico.
Biomasa Energética	Uso de residuos como fuente de energía	Generación de calor y electricidad.
Reutilización Directa	Uso de piezas sobrantes en nuevos productos	Artículos decorativos, muebles.

Fuente: Autores

Como se observa en la tabla, los residuos de madera pueden ser aprovechables mediante la implementación de distintas estrategias, en las que su transformación contribuye al cuidado del medio ambiente y la reducción de emisiones de dióxido de carbono.

6.2.4. Sistemas Tecnificados de Transformación de Residuos

Los sistemas tecnificados de transformación de residuos utilizan tecnologías avanzadas para procesar materiales de manera eficiente y segura. Estos sistemas incluyen maquinaria especializada, como molinos, compactadoras y prensas, que permiten optimizar el aprovechamiento de residuos. Escobar Córdoba señala que la implementación de tecnologías adecuadas en la transformación de residuos maderables puede mejorar la eficiencia del proceso y reducir los impactos ambientales. (Escobar Córdoba, 2018)



Trituradoras de Madera

Las trituradoras de madera son equipos diseñados para reducir el tamaño de residuos madereros como aserrín, virutas y recortes, facilitando su manejo y procesamiento. Estas máquinas funcionan mediante cuchillas giratorias que fragmentan el material en partículas más pequeñas, las cuales pueden ser utilizadas para la producción de compost, pellets de biomasa o tableros aglomerados. (UNTHA)

Ventajas:

- Reducción significativa del volumen de residuos.
- Mejora en la eficiencia del almacenamiento.
- Permite una posterior valorización de los residuos.

Prensas Compactadoras

Las prensas compactadoras aplican presión sobre los residuos de madera para formar tableros aglomerados o briquetas. Este proceso es ampliamente utilizado en la industria maderera para transformar residuos en productos comercializables. (Zambrano, y otros, 2013)

Ventajas:

- Generación de productos reutilizables (tableros).
- Reducción del espacio de almacenamiento.
- Incremento del valor agregado de los residuos.



Sistemas de Secado y Peletización

Estos sistemas permiten transformar residuos de madera en pellets de biomasa, que pueden ser utilizados como fuente de energía renovable. El proceso implica la deshidratación de los residuos y su compactación en forma de pequeños cilindros. (Martinez Pulido, 2019)

Ventajas:

- Aprovechamiento de residuos como fuente de energía.
- Generación de productos con alto valor energético.
- Contribución a la sostenibilidad energética.

Pirolisis

La pirolisis es un proceso termoquímico que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando tres productos principales: biochar (carbón vegetal), bioaceite y gases combustibles. Este método es altamente eficiente para la transformación de residuos madereros. (Chakrabarti & Shinde, 2024)

Ventajas:

- Producción de biochar, útil como enmienda agrícola.
- Generación de bioaceite, utilizable como biocombustible.
- Aprovechamiento de gases combustibles.



Carbonización Hidrotérmica

La carbonización hidrotérmica es un proceso que transforma biomasa húmeda en carbón hidrotermal, aplicando calor y presión en un entorno cerrado. Esta tecnología es particularmente adecuada para residuos madereros con alto contenido de humedad (Libra, S Ro, Kammann, & Funke, 2011)

Ventajas:

- Producción de carbón hidrotermal como fuente de energía.
- Reducción de la humedad del material.
- Conversión de residuos en productos de valor agregado.

Tabla 2. Comparativa sistemas tecnificados de transformación de residuos de la madera

Tecnología	Descripción	Productos Generados	Ventajas
Trituradoras de Madera	Reducción del tamaño de residuos	Astillas, virutas	Fácil manejo y almacenamiento.
Prensas Compactadoras	Compactación para productos reutilizables.	Tableros, briquetas	Generación de productos de valor agregado.
Secado y Peletización	Transformación en pellets de biomasa	Pellets de biomasa	Fuente de energía renovable.
Pirolisis	Descomposición térmica sin oxígeno.	Biochar, bioaceite, gases.	Producción de biocombustibles y enmiendas.



Carbonización Hidrotérmica	Transformación de biomasa húmeda en carbón.	Carbón hidrotermal	Producción de biocombustibles sólidos.

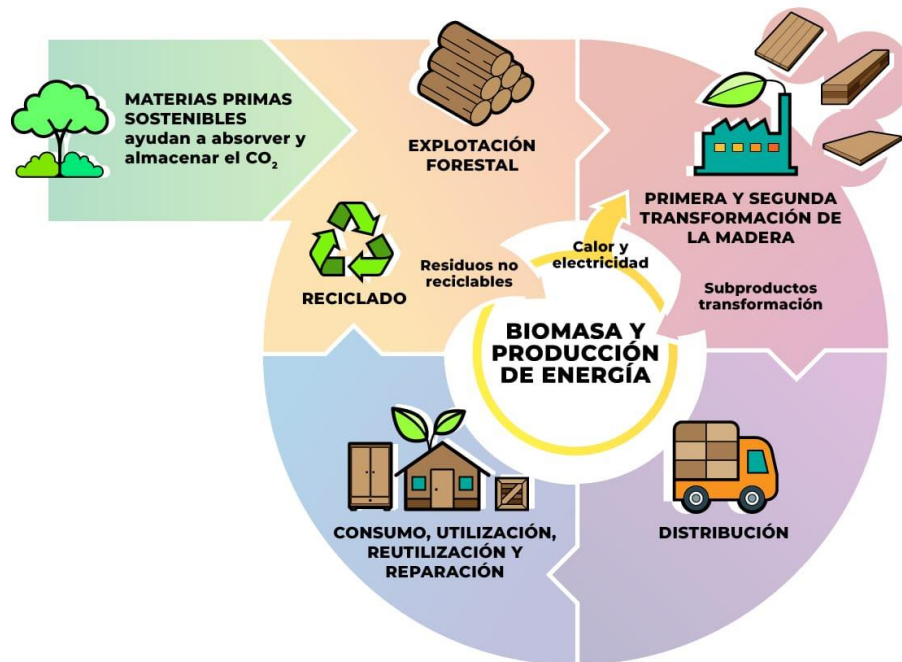
Fuente: Autores

6.2.5. Sostenibilidad Ambiental y Economía Circular

La sostenibilidad ambiental se refiere a la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer los recursos para futuras generaciones. En el ámbito industrial, esto implica adoptar prácticas de producción más limpias y promover la reutilización de materiales. La economía circular, por su parte, es un modelo de producción que busca minimizar el desperdicio y maximizar la reutilización de materiales, reduciendo la necesidad de materia prima virgen. Sánchez destaca que la implementación de la economía circular en el sector industrial colombiano puede traer beneficios significativos en términos de reducción de residuos y eficiencia en el uso de recursos.

La economía circular en la industria de la madera implica el aprovechamiento de residuos generados en procesos de corte y pulido, reduciendo la necesidad de materia prima virgen. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede generar beneficios económicos para las empresas. La implementación de prácticas de economía circular en el sector maderero colombiano puede mejorar la competitividad de las empresas y reducir su impacto ambiental. (Sanchez Quintero, 2019)

Ilustración 4. Economía Circular



Fuente: (Sierolam, 2021)

Como se puede observar en la figura, existe procesos que pueden ayudar a que la industria de madera tenga un aprovechamiento de la totalidad de residuos, generando así una transformación y creando subproductos que favorezcan en la disminución del impacto generado.



6.3. Marco legal:

6.3.1. Legislación Colombiana y normas INCONTEC

El desarrollo de un sistema de transformación tecnificado para el aprovechamiento de residuos madereros en la empresa LEH Carpintería debe estar enmarcado dentro de la legislación colombiana vigente en materia ambiental, de residuos sólidos, salud ocupacional y producción limpia. Estas normativas establecen los lineamientos que garantizan la sostenibilidad de los procesos industriales y la protección del entorno natural y la salud de los trabajadores.

Tabla 3. Legislación Colombiana y normas INCONTEC

Normativa	Descripción	Fuente jurídica
Constitución Política de Colombia de 1991	La Constitución establece en el artículo 79 que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano, y que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente. Además, el artículo 80 ordena al Estado planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible.	Constitución política de Colombia Art. 79 y Art. 80 (Congreso de la República de Colombia, 1991)
Ministerio del medio ambiente	Esta ley crea el Ministerio del Medio Ambiente y establece los principios generales de la gestión ambiental en Colombia. En ella se introducen conceptos clave como el desarrollo sostenible, la gestión integral de residuos y la responsabilidad compartida entre los generadores y el Estado.	Ley 99 de 1993 (Congreso de la República de Colombia, 1993, 22 de diciembre)



Gestión integral de residuos industriales no peligrosos	Regula la gestión integral de residuos industriales no peligrosos, como los generados en los procesos de carpintería. Establece obligaciones para los generadores, transportadores y gestores de estos residuos, incluyendo la necesidad de sistemas de recolección, almacenamiento y transformación tecnificada.	Ley 1252 de 2008 (Ley 252 de 2008, 2008, 31 de julio)
Diseño industrial	Esta ley reconoce el Diseño Industrial como una profesión y reglamenta su ejercicio en Colombia. Establece que el diseño industrial comprende actividades relacionadas con la proyección del uso, funcionamiento, fabricación y distribución de productos industriales, siempre que estas actividades estén encaminadas a mejorar la utilización y el beneficio de tales productos. Esta ley es relevante para el diseño de maquinaria, ya que establece los lineamientos profesionales y éticos que deben seguirse en la creación de productos industriales.	Ley 157 de 1994 (Congreso de la Republica de Colombia, 1994, 2 de agosto)
Ingeniería en Colombia	Esta ley modifica la reglamentación del ejercicio de la ingeniería y sus profesiones afines en Colombia. Define el concepto de ingeniería y establece que el ejercicio de esta profesión incluye actividades como el diseño, construcción y mantenimiento de maquinaria. La ley también adopta un código de ética profesional y establece que todo trabajo relacionado con el ejercicio de la ingeniería debe ser	Ley 842 de 2003 (Congreso de la Republica de Colombia, 2003)



	dirigido por un ingeniero inscrito en el registro profesional.	
Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Contiene disposiciones reglamentarias sobre la gestión ambiental empresarial, incluyendo la evaluación de impacto ambiental y la implementación de planes de manejo de residuos. Es clave para establecer los parámetros técnicos y procedimientos ante la autoridad ambiental competente.	Decreto 1076 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, 26 de mayo)
Aprovechamiento de los residuos	Aunque está orientada principalmente a envases y empaques, establece criterios importantes sobre aprovechamiento y valorización de residuos, que son aplicables a estrategias de economía circular en el sector maderero.	Resolución 1407 de 2018 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018, 26 de julio)
Gestión integral de residuos generados	Establece los criterios para la gestión integral de residuos generados en actividades industriales, incluyendo su almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final.	Decreto 4741 de 2005 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005, 30 de diciembre)
Manejo de residuos sólidos no peligrosos	Define los lineamientos para el almacenamiento, recolección y aprovechamiento de residuos sólidos industriales no peligrosos, como los generados por carpinterías.	NTC 4595 (INCONTEC, 2000)
Seguridad en el trabajo: uso de maquinaria	Esta norma establece los lineamientos para la instalación y operación segura de equipos industriales, y es especialmente aplicable al funcionamiento de maquinaria tecnificada.	NTC 5401 (INCONTEC, 2004)

Fuente: Autores



6.3.2. Normas Técnicas Internacionales

Es fundamental considerar el cumplimiento de estándares internacionales y nacionales de calidad, gestión ambiental y seguridad laboral, que aseguran la eficiencia del sistema tecnificado y su aceptación en el marco de la economía circular.

Tabla 4. Normas técnicas internacionales

Normativa	Descripción	Fuente de normativa
Sistemas de gestión ambiental	Esta norma internacional establece los requisitos para un sistema de gestión ambiental efectivo. Su implementación permite a la empresa identificar, priorizar y gestionar sus aspectos ambientales como parte integral de sus prácticas de negocio	ISO 14001:2015 (International Organization for Standardization, 2015)
Gestión de la energía	Orienta a las organizaciones en la implementación de sistemas para mejorar el desempeño energético, incluyendo la eficiencia en el uso de los recursos y la reducción de impactos ambientales derivados del consumo energético.	ISO 50001:2018 (International Organization for Standardization, 2018)
Gestión de la seguridad y salud en el trabajo	Establece directrices para garantizar ambientes laborales seguros, lo cual es esencial en el contexto de la operación de maquinaria tecnificada para la transformación de residuos.	ISO 45001:2018 (International Organization for Standardization, 2018)
Evaluar y reducir los riesgos asociados con la maquinaria	Esta norma internacional proporciona un enfoque sistemático para evaluar y reducir los riesgos asociados con la maquinaria. Establece principios generales de diseño y especificaciones técnicas para garantizar la seguridad en el diseño de máquinas.	ISO 12100:2010 (International Organization for Standardization., 2010)



Procedimientos para la validación de seguridad de los sistemas de control de maquinaria	Esta norma especifica los procedimientos para la validación de las partes relacionadas con la seguridad de los sistemas de control de maquinaria. Incluye requisitos para la planificación y ejecución de la validación, así como para la documentación de los resultados.	ISO 13849-2:2012 (International Organization for Standardization., 2012)
--	--	--

Fuente: Autores

6.4. Marco geográfico contextual

El municipio de Chía se encuentra ubicado en la región andina de Colombia, en el departamento de Cundinamarca, dentro de la Provincia de Sabana Centro. Está situado a una altitud promedio de 2.556 metros sobre el nivel del mar y hace parte del altiplano cundiboyacense, limita al norte con el municipio de Cajicá, al sur con Bogotá, al este con Sopó y La Calera, y al oeste con el municipio de Cota.

Cuenta con una superficie de aproximadamente 80,44 km², de los cuales más del 90% corresponde a suelo rural, que están distribuidos en: zonas agrícolas, forestales y de conservación ecológica; mientras que el suelo urbano comprende unos 6,3 km², donde se concentra el crecimiento poblacional y de infraestructura. (Gobernación de Cundinamarca, s.f.)

Descripción General de la Empresa

LEH Carpintería es una empresa ubicada en el municipio de Chía, Cundinamarca, dedicada a la fabricación y transformación de productos de madera. La empresa se especializa en la



producción de muebles, puertas, ventanas y otros productos derivados de la madera, utilizando técnicas tradicionales y tecnologías modernas para garantizar productos de alta calidad.

Ubicación Geográfica

LEH Carpintería se encuentra estratégicamente ubicada en el municipio de Chía, Cundinamarca, en la vereda La Balsa Sector La Virgen a pocos kilómetros de la ciudad de Bogotá, lo que le permite acceder a un mercado amplio tanto en la capital como en los municipios cercanos. Su ubicación facilita el acceso a proveedores de materia prima y reduce costos logísticos.

Ilustración 5. Ubicación Geográfica Carpintería LEH



Fuente: Autores



Proceso Productivo

El proceso productivo de LEH Carpintería se centra en las siguientes etapas:

- Recepción de materia prima (madera en bruto).
- Corte y pulido de madera para obtener las piezas necesarias.
- Ensamblaje de productos de madera (muebles, puertas, ventanas).
- Acabados y pintura para dar el aspecto final a los productos.
- Almacenamiento y distribución.

Generación de Residuos

Durante los procesos de corte y pulido, LEH Carpintería genera una cantidad significativa de residuos madereros, como aserrín, virutas y recortes. Estos residuos representan un desafío ambiental y una oportunidad para mejorar la sostenibilidad de la empresa.



7. Metodología

7.1. Tipo de Investigación

La presente monografía se enmarca en una investigación descriptiva, de enfoque cualitativo, orientada al análisis y diseño de un sistema tecnificado para el aprovechamiento de residuos de madera generados en LEH Carpintería, ubicada en Chía, Cundinamarca. La investigación se centra en la recolección, análisis y sistematización de información documental y técnica relacionada con la gestión de residuos de madera.

7.2. Diseño de la Investigación

Este estudio adopta un enfoque metodológico no experimental y de tipo documental, ya que se centra en la observación y análisis de datos existentes sin manipular variables de forma directa. Este diseño es adecuado cuando el objetivo de la investigación consiste en describir fenómenos tal como ocurren en su contexto natural, sin intervenir en ellos (**Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014**). El propósito de este enfoque es examinar, sistematizar y analizar información proveniente de fuentes secundarias confiables para construir una base teórica y técnica que oriente el diagnóstico de los residuos generados durante el proceso de corte y pulido de madera.

La investigación documental, permite recopilar información de libros, artículos científicos, informes institucionales y documentos normativos, lo que la convierte en una herramienta útil para comprender las prácticas actuales de manejo de residuos y los criterios técnicos existentes para su



clasificación y aprovechamiento (**Peñaranda Gonzalez, Montenegro Gomez, & Giraldo Abad, 2017**). Este tipo de investigación favorece el análisis crítico del conocimiento existente y la formulación de recomendaciones para la gestión ambiental basada en evidencia técnica.

La investigación documental puede ser eficaz para identificar alternativas sostenibles de manejo de residuos en sectores industriales, al permitir el acceso a experiencias y modelos ya aplicados en contextos similares (**Mejia Brizuela, Orozco Guillen, & Galaan Hernandez, 2016**), teniendo en cuenta la anterior apreciación, el presente trabajo se basa en una revisión de la literatura relevante, orientada a caracterizar los residuos madereros más comunes y estimar su volumen con base en estudios de caso comparables.

Se basa en la revisión y análisis de fuentes bibliográficas, normativas y técnicas relacionadas con:

- Sistemas de transformación tecnificada de residuos.
- Gestión de residuos de madera.
- Tecnologías aplicables a la transformación de residuos.
- Normativas ambientales aplicables en Colombia.



7.3. Fuentes de Información

Fuentes Primarias: Documentos técnicos y normativos relacionados con la gestión de residuos de madera en Colombia.

Fuentes Secundarias: Artículos científicos, libros, normas técnicas nacionales e internacionales, y otros documentos relacionados con sistemas de transformación de residuos.

7.4. Técnicas de Recolección de Información

Revisión Documental: Se realizará una búsqueda exhaustiva de información bibliográfica relacionada con la gestión y transformación de residuos de madera.

Observación Directa: Se llevará a cabo una observación de los procesos productivos de LEH Carpintería, con el fin de identificar las etapas de corte y pulido donde se generan residuos.

7.5. Análisis de la Información

Clasificación y Selección de Información: Se organizará la información recolectada, priorizando aquella directamente relacionada con tecnologías de transformación de residuos y normativas aplicables.

Sistematización de Resultados: Los datos recolectados serán analizados y organizados en



función de las necesidades de la propuesta del sistema tecnificado.

Comparación y Análisis Crítico: Se realizará una comparación entre diferentes alternativas tecnológicas, identificando ventajas y desventajas para la implementación en LEH Carpintería.

7.6.Hipótesis

Si se realiza una adecuada caracterización de residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera en la empresa LEH Carpintería, será posible diseñar e implementar un sistema tecnificado de transformación en donde existan prácticas de economía circular, se optimice el aprovechamiento de subproductos y se reduzca significativamente la huella ambiental de la empresa.

7.7.Desarrollo de la Propuesta

Diagnóstico: Descripción de la situación actual de residuos en LEH Carpintería.

Elaboración de la Propuesta: Definición de los componentes del sistema tecnificado, especificando tecnologías y procedimientos adecuados.

Evaluación de Impacto: Análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema propuesto.



7.8. Validación de la Propuesta

- Simulación de procesos mediante software de modelado.
- Estudio de viabilidad económica y ambiental.
- Presentación de resultados a directivos de LEH Carpintería para retroalimentación.



8. Resultados y discusión

8.1. Diagnóstico inicial sobre los tipos y cantidades de residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera

El objetivo de realizar un diagnóstico inicial sobre los residuos generados en los procesos de corte y pulido de madera responde a la necesidad de poder identificar de manera cuantitativa y cualitativa los subproductos derivados de la transformación primaria de la madera, con el fin de establecer estrategias de gestión sustentables y técnicamente viables. Este diagnóstico permite reconocer la magnitud del problema ambiental que está asociado a la generación de residuos como lo es la viruta, aserrín, retazos y polvo de lijado, así como su distribución por proceso.

La empresa LEH no cuenta con un sistema automatizado de pesaje o registro continuo de residuos, por lo cual, se implementó una metodología basada en la observación directa, registro fotográfico, muestreo volumétrico y estimación de densidades promedio, permitiendo así la obtención de datos representativos para el estudio. Esta aproximación, aunque es estimada, sigue criterios técnicos validados por estudios científicos y por metodologías aceptadas para la caracterización de residuos sólidos industriales.

Este diagnóstico ofrece un marco para la toma de decisiones en términos de reducción y aprovechamiento, además permite ser un insumo para el cumplimiento de normativas ambientales,



la mejora continua de procesos e integración de prácticas de economía circular en el contexto productivo de la empresa.

Caracterización de los Procesos

La empresa desarrolla principalmente actividades de transformación primaria de madera mediante los procesos de corte y pulido, estos son fundamentales para la elaboración de productos como lo son muebles, estructuras y elementos decorativos. Estos procesos se describen a continuación:

- **Corte:** Este proceso se realizan operaciones como lo son el tronzado, cepillado, escuadrado y aserrado, mediante las cuales se da una forma inicial a las piezas de madera. El tronzado permite dividir los tablones de madera en unas secciones más manejables, mientras que el escuadrado y el cepillado otorgan uniformidad y dimensiones específicas a las piezas. Durante esta etapa, se generan residuos principalmente las virutas y retazos. Las virutas provienen del arranque mecánico de capas de madera mediante el uso de cuchillas rotatorias, mientras que los retazos son fragmentos sobrantes que se utilizan en la pieza final. Estos residuos pueden variar según el tipo de madera, el tamaño de las piezas trabajadas, y el grado de automatización y precisión del equipo utilizado.
- **Pulido:** El proceso de pulido se realiza generalmente con herramientas abrasivas como lo son las lijadoras de banda, disco o roto-orbitales, tiene el objetivo de alisar



la superficie de la madera y prepararla para acabados o recubrimientos. Esta actividad produce residuos como el aserrín y el polvo de lijado, estos pueden afectar la calidad del aire en el ambiente de trabajo, por lo que se hace necesario tener sistemas adecuados de recolección y filtrado para minimizar riesgos laborales y ambientales.

Es importante señalar que la naturaleza y volumen de los residuos están directamente relacionados con el tipo de madera utilizada como pino, roble, cedro, entre otras, su contenido de humedad, las dimensiones del material y la eficiencia de la maquinaria. Una caracterización adecuada de estos procesos permite entender el material, para así establecer estrategias de prevención, reducción y aprovechamiento.

Clasificación de los Residuos

Con base en observaciones en plantan de producción y registros fotográficos, se identificaron los siguientes tipos de residuos:

- **Viruta de madera:** Son fragmentos delgados, curvados y alargados que se desprenden durante el proceso de cepillado o perfilado de las piezas madera. Se caracterizan por tener bajo peso, alto volumen y baja densidad, representando un desafío logístico para su manejo. Son residuos de origen lignocelulósico, estos pueden tener aplicaciones como materia prima para tableros aglomerados, compostaje o generación de energía por combustión o briquetado.



- **Aserrín fino:** Son partículas pequeñas generadas principalmente en el proceso de lijado y el aserrado. Su granulometría es menor que la de la viruta y puede presentar riesgos respiratorios para los operarios. Este tipo de residuo es ideal para la fabricación de pellets de biomasa, uso en camas para animales o en sustratos hortícolas.
- **Retazos:** Son piezas sólidas de madera que no fueron utilizadas por razones de corte, defectos o sobras del dimensionamiento, su volumen puede ser menor comparado con otros residuos y su peso es elevado debido a la densidad del tipo de madera utilizada, lo cual representa un potencial importante para ser reutilizados en piezas más pequeñas, artesanías o procesos de trituración para reaprovechamiento.

Esta clasificación es fundamental para diseñar estrategias de gestión diferenciada que permitan aprovechar al máximo el potencial de cada tipo de residuo según su naturaleza física y química.

Estimación de Cantidades

Se utilizó un enfoque mixto de observación directa y estimación indirecta mediante recipientes calibrados (baldes de 20 litros) para cuantificar los residuos generados en una jornada típica de trabajo. Cada tipo de residuo fue recolectado por separado, permitiendo calcular su volumen diario; posteriormente, con base en densidades promedio documentadas en los estudios técnicos, se estimó el peso correspondiente para cada fracción. Esta metodología fue replicada durante varios días para obtener un promedio representativo.



Tabla 5. Cantidad de residuos de madera

Tipo de residuo	Densidad estimada (Kg/m³)	Peso por 20L (Kg)
Viruta de madera	100	2
Aserrín Fino	180	3.6
Retazos	500	10

Fuente: Autores

Tabla 6. Proyección mensual de residuos de madera

Tipo de residuo	Volumen diario(L)	Peso diario (kg)	Proyección mensual (kg)*
Viruta de madera	100	10	220
Aserrín Fino	60	10.8	237.6
Retazos	40	20	440

Fuente: Autores

- Proyección mensual calculada sobre 22 días laborales.

Esta estimación, aunque aproximada, permite tener una base sólida para poder planificar soluciones de manejo, almacenamiento, transporte y aprovechamiento de los residuos madereros, además proporciona información clave a la hora de evaluar la eficiencia productiva y proponer acciones de mejora en la planta.



Documentación Fotográfica

Se realizó un registro fotográfico sistemático del proceso de recolección de residuos, se observó los lugares en donde se acoplan cada tipo de residuo. Este registro resulta esencial para fines de verificación interna, auditorías ambientales y capacitación del personal operario.

Ilustración 6. Recipiente medición residuos madera



Fuente: Autores



Ilustración 7. Área de producción LEH Carpintería



Fuente: Autores

La mayor proporción en volumen corresponde a la viruta de madera, con una generación diaria estimada de 100 L, lo cual se relaciona directamente con la frecuencia de uso de la cepilladora.



Ilustración 8. Viruta de madera



Fuente: Autores

Los retazos, si bien no representan el mayor volumen, sí acumulan un peso significativo (20 kg diarios), lo que refleja oportunidades de reaprovechamiento o rediseño de procesos para reducir su generación.



Ilustración 9. Retazos de madera



Fuente: Autores

El aserrín fino y el polvo de lijado, aunque livianos, tienen implicaciones importantes en la salud ocupacional y el ambiente de trabajo, por lo que se recomienda fortalecer los sistemas de extracción de partículas.

Ilustración 10. Aserrín de madera



Fuente: Autores

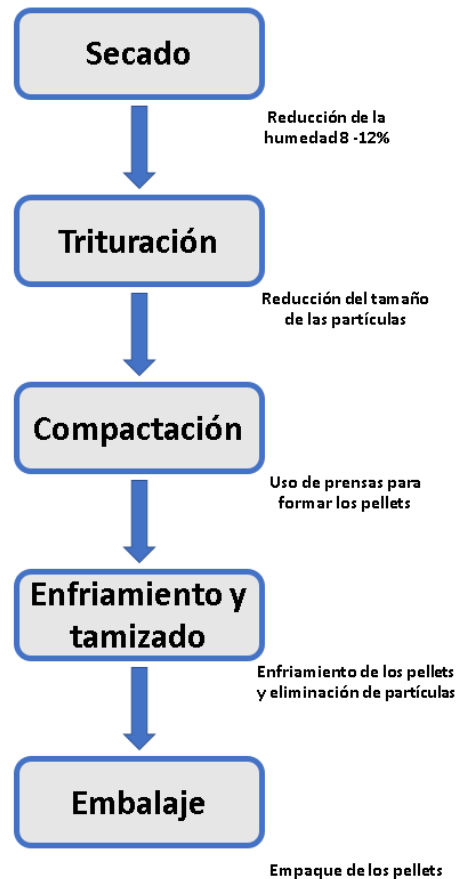
Este análisis permite establecer prioridades de intervención, definir acciones correctivas en los puntos críticos de generación y considerar soluciones de aprovechamiento según el tipo y volumen de residuo.

8.2. Alternativas tecnificadas existentes para el aprovechamiento de residuos de madera aplicables al contexto de la empresa.

8.2.1. Peletizado de Madera

El peletizado consiste en compactar residuos de madera (como aserrín y virutas) en pequeños cilindros llamados pellets, que se utilizan como biocombustible sólido. (Díaz Artigas, Díaz Concepción, Rodríguez Piñero, Álvarez, & Tamayo Mendoza, 2020)

Ilustración 11. Diagrama de proceso de peletizado



Fuente: Autores

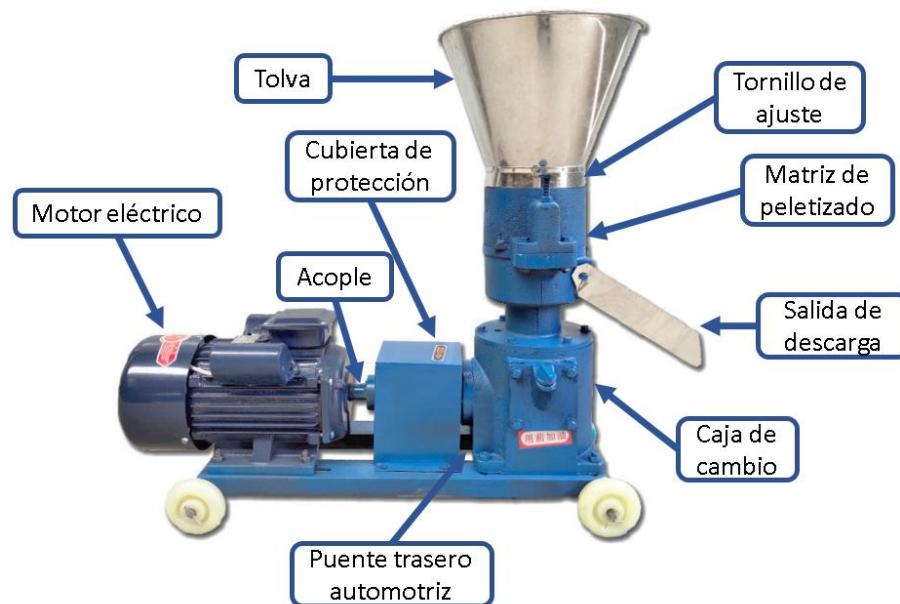
Ventajas:

- Alta densidad energética.
- Bajo contenido de humedad.
- Menor emisión de contaminantes en comparación con combustibles fósiles.
- Fuente de energía renovable.

Limitaciones:

- Requiere maquinaria especializada.
- Los costos de operación pueden ser elevados.

Ilustración 12. Máquina peletizadora



Fuente: Autores



Características técnicas

- **Actuadores:** Motores eléctricos monofásicos
- **Sensores:** Velocidad angular
- **Tipo de control:** PID
- **Nivel de automatización:** Bajo, tiene una interacción de sistema con supervisión de operador

La máquina peletizadora representa una solución tecnológica de alto valor agregado para el aprovechamiento eficiente de residuos madereros. Este equipo, conocido comúnmente como prensa de matriz anular, transforma residuos triturados de madera en pellets cilíndricos mediante un proceso de compactación mecánica a alta presión.

Una peletizadora industrial cuenta con una matriz anular cuyo diámetro está entre 420mm y 800 mm, acoplada a rodillos compresores que aplican presiones superiores a los 300 bar para forzar el paso de la biomasa a través de los orificios de la matriz. Los diámetros de pellet resultantes varían comúnmente entre 6 mm y 10 mm, dependiendo del uso final. El motor principal puede alcanzar potencias de 90 a 250 kW, con capacidad de producción entre 1 y 8 toneladas por hora, dependiendo de las características del material y el nivel de automatización del sistema.

La integración de sensores de presión, temperatura y humedad, junto con sistemas de control lógico programable (PLC), permite una operación precisa, segura y continua, lo que se alinea con los principios de eficiencia y automatización que caracterizan a la mecatrónica moderna.



Eficiencia en la gestión de residuos industriales

Desde una perspectiva de sostenibilidad industrial, la peletizadora cumple un rol esencial al convertir subproductos antes considerados pasivos ambientales en un recurso energético con valor de mercado. Esto permite cerrar el ciclo de vida de los residuos dentro de una planta de transformación de madera o carpintería, reduciendo significativamente la carga destinada a vertederos o incineración.

En términos de eficiencia operativa, estas máquinas alcanzan rendimientos de compactación superiores al 90%, especialmente cuando se alimentan con biomasa y una humedad controlada entre 8% y 12%. El uso de esta tecnología disminuye el volumen de almacenamiento en un 70%, además reduce emisiones de polvo y ayuda a mejorar las condiciones de seguridad en planta.

La implementación de sistemas peletizadores se integra a esquemas de producción limpia y economía circular, contribuyendo a certificaciones ambientales como ISO 14001 o a modelos de producción sostenible exigidos por mercados internacionales.

Tecnologías utilizadas en el peletizado

El peletizado de madera es un proceso clave dentro de la bioeconomía circular y la producción de energías renovables, ya que permite transformar residuos lignocelulósicos en biocombustibles sólidos de alta densidad energética. Este proceso ha cobrado relevancia en contextos industriales y ambientales debido a su capacidad para reducir el volumen de residuos,



mejorar su manejabilidad, y contribuir a la mitigación del cambio climático mediante la sustitución de combustibles fósiles.

La eficiencia del proceso de peletizado depende en gran medida de la tecnología empleada en cada una de sus etapas, que incluyen el secado, trituración, compactación, enfriamiento y empaque. Cada una de estas tecnologías presenta características técnicas específicas que influyen en la calidad final del pellet, el consumo energético del sistema, la productividad de la planta y su sostenibilidad operativa.

El presente cuadro comparativo describe las principales tecnologías utilizadas en el proceso de peletizado de madera, detallando para cada máquina sus funciones, capacidades, requerimientos técnicos y ventajas operativas.

Esta información resulta especialmente útil para tomadores de decisiones, ingenieros de procesos, investigadores y administradores públicos interesados en implementar o evaluar sistemas de aprovechamiento tecnificado de residuos madereros con criterios de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica.

Tabla 7. Tecnologías del peletizado

Tipo	Función	Capacidad	Consumo energético	Ventajas técnicas
Secador Rotativo	Secado de biomasa reduciendo la humedad al 8–12%	1–5 toneladas por hora	Varía según fuente térmica; alto consumo térmico	Alta eficiencia térmica, control automatizado de humedad



Molino de Martillos	Reducción del tamaño de partícula	Hasta 5 toneladas por hora	50–250 kW	Versatilidad, adaptabilidad al tipo de biomasa
Peletizadora de Matriz Anular	Compactación en pellets cilíndricos	1–8 toneladas por hora	90–250 kW	Alta presión, buena durabilidad del pellet, operación continua
Enfriador Contracorriente	Reducción de temperatura y humedad del pellet	1–10 toneladas por hora	3–7.5 kW	Mejora resistencia mecánica del pellet, evita condensación
Embaladora Automática	Empaque de pellets para distribución	6–10 bolsas por minuto	3–10 kW	Automatización del proceso logístico, reducción de pérdidas

Fuente: Autores

8.2.2. Briquetado de Madera

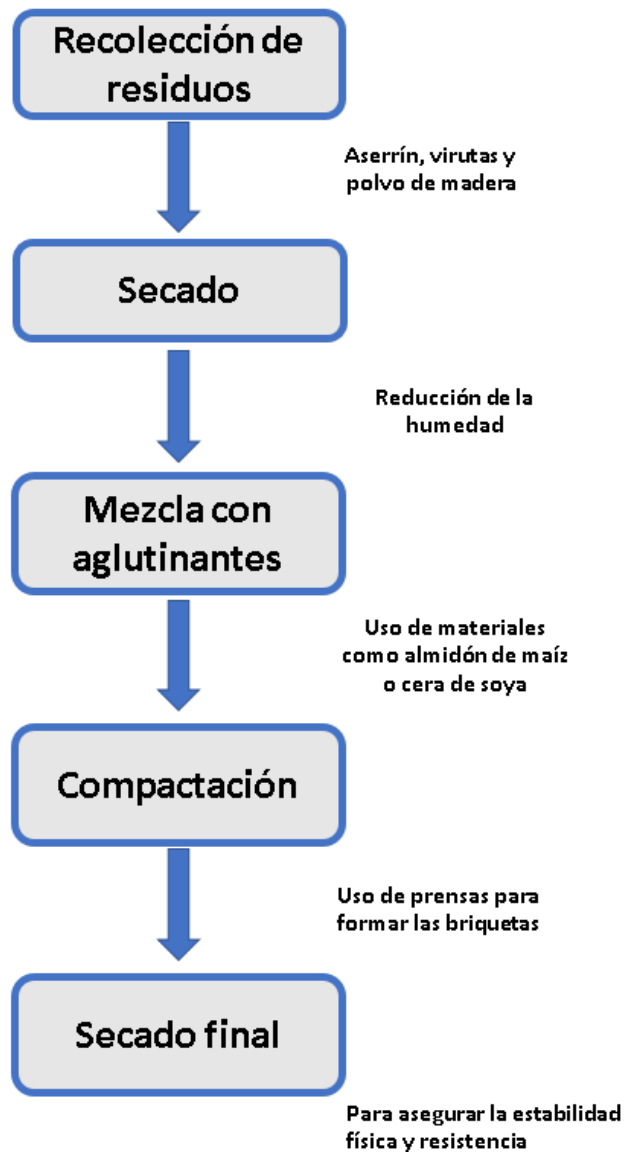
El briquetado transforma residuos de madera en bloques compactos (briquetas) que se utilizan como combustible sólido.

Proceso técnico:

- **Recolección de residuos:** Serrín, virutas y polvo de madera.
- **Secado:** Reducción de la humedad a niveles adecuados.
- **Mezcla con aglutinantes:** Uso de materiales como almidón de maíz o cera de soya.
- **Compactación:** Uso de prensas para formar las briquetas.

- **Secado final:** Para asegurar la estabilidad física y resistencia al manejo. (Urbina Cozar, Casa Marquez, & Gil Mendoza, 2023)

Ilustración 13. Diagrama de proceso briquetado



Fuente: Autores

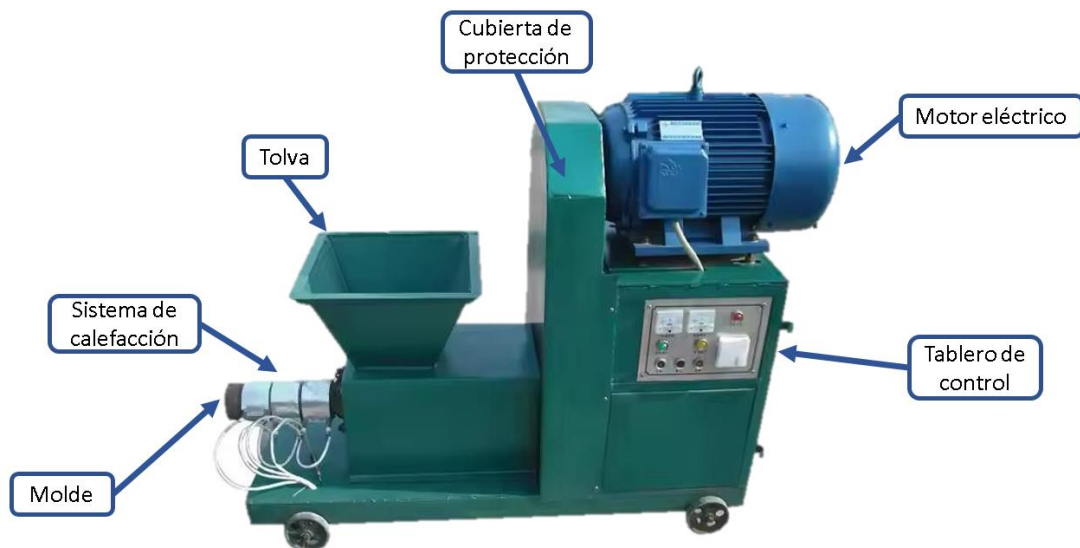
Ventajas:

- Alta durabilidad y almacenamiento sencillo.
- Reducción de residuos en vertederos.
- Uso en hornos industriales y sistemas de calefacción.

Limitaciones:

- Alta inversión inicial en maquinaria.
- El proceso de secado puede consumir energía adicional.

Ilustración 14. Máquina Briqueteadora



Fuente: Autores

Características técnicas

- **Actuadores:** Válvulas hidráulicas y servomotores
- **Sensores:** Presión hidráulica y final de carrera



- **Tipo de control:** PLC
- **Nivel de automatización:** Medio, tiene un control automático de presión y temperatura.

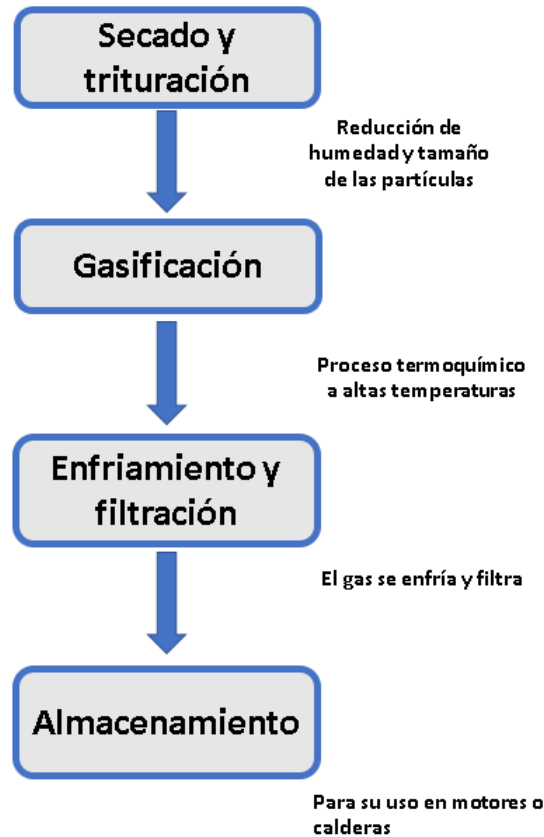
8.2.3. Gasificación de Residuos de Madera

La gasificación convierte residuos de madera en gas de síntesis (syngas), compuesto principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), que puede utilizarse para generación de energía eléctrica o térmica. (Palacio Espinoza, Aguiar Castrillon, Morales Paternina, Peña Arango, & Arboleda Londoño, 2023)

Proceso técnico:

- **Secado y trituración:** Reducción de humedad y tamaño de las partículas.
- **Gasificación:** Proceso termoquímico a altas temperaturas en un entorno controlado de oxígeno.
- **Enfriamiento y filtración:** El gas se enfría y filtra para eliminar impurezas.
- **Almacenamiento del syngas:** Para su uso en motores o calderas.

Ilustración 15. Diagrama de proceso gasificación



Fuente: Autores

Ventajas:

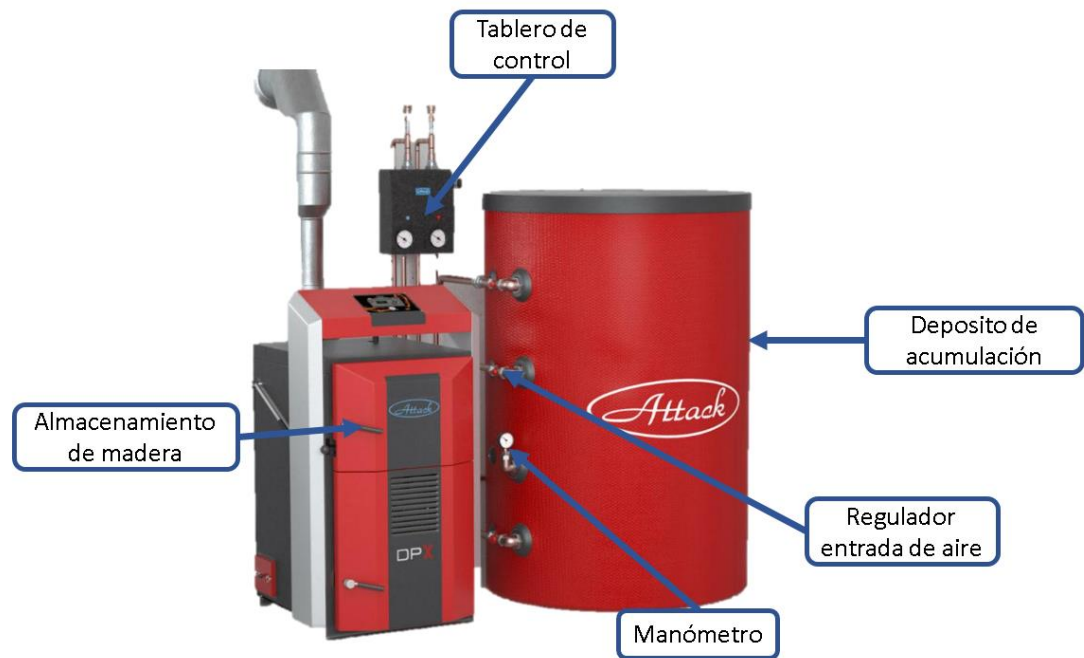
- Aprovechamiento eficiente de residuos.
- Producción de electricidad y calor en procesos industriales.
- Reducción de emisiones al reemplazar combustibles fósiles.

Limitaciones:

- Complejidad operativa y necesidad de control continuo.

- Generación de subproductos contaminantes si el proceso no está optimizado.

Ilustración 16. Gasificadora de madera



Fuente: Autores

Características técnicas

- **Actuadores:** Válvulas proporcionales y controladores de mezcla
- **Sensores:** Temperatura, presión, flujo de gas, composición.
- **Tipo de control:** Lógica difusa
- **Nivel de automatización:** Alto, control multivariable



8.3. Evaluación de la viabilidad técnica y ambiental de las alternativas seleccionadas para su posible implementación.

La valorización de residuos lignocelulósicos provenientes de la industria maderera y agrícola constituye una estrategia clave para reducir impactos ambientales, promover economías circulares y diversificar las fuentes de energía renovable. En este contexto, tecnologías como el peletizado, el briquetado y la gasificación ofrecen soluciones, que se adaptan a diversas condiciones técnicas, económicas y ambientales. La presente evaluación analiza la viabilidad técnica y ambiental de estas alternativas, con base en los estudios científicos recientes.

Peletizado de Madera

Desde una perspectiva técnica, el peletizado es un proceso de transformación de residuos de madera seca y triturada en pequeños cilindros densos, mediante prensas con una matriz anular o plana bajo condiciones de presión y temperatura controladas. Esta tecnología presenta un alto nivel de automatización y puede alcanzar rendimientos superiores al 90%, con pellets de alta densidad energética (Koido, Konno, & Sato, 2025). La implementación de estas tecnologías presenta un valor agregado, ya que estas máquinas tienen gran eficiencia a la hora de transformar los residuos de la empresa.



Además, su implementación es viable en plantas de diferentes escalas, siendo especialmente efectiva cuando se optimiza el proceso de secado y la logística de suministro (Sadaghiani, Mafakheri, & Chen, 2023). Se puede evidenciar que estas tecnologías de peletizado pueden adaptarse tanto a plantas pequeñas, orientadas al autoconsumo, como a instalaciones industriales de gran capacidad. Sin embargo, el rendimiento técnico y económico del proceso depende del secado eficiente de la biomasa, ya que el exceso de humedad afecta negativamente la densificación, la calidad del pellet y el consumo energético del sistema.

La logística de suministro que incluye el acopio, transporte y alimentación continua del residuo juega un papel clave a la hora de asegurar la sostenibilidad del proceso. Una mala planificación logística puede generar cuellos de botella, aumentando los costos, generando así una afectación en la continuidad operativa. La optimización de estos factores es lo que permite aprovechar el potencial del sistema de peletizado.

Desde el enfoque ambiental, los pellets permiten una combustión eficiente con bajas emisiones de CO₂, lo cual representa una alternativa a los combustibles fósiles. El uso de pellets en sistemas de calefacción y cogeneración en comunidades remotas ha demostrado ser más sostenible y con menores impactos ambientales (Sadaghiani, Mafakheri, & Chen, 2023).

La tecnología de peletizado contribuye a reducir la presión sobre los límites planetarios relacionados con el cambio climático y la alteración de los ciclos biogeoquímicos, en especial el del carbono, ya que al transformar residuos lignocelulósicos en biocombustibles sólidos de alta densidad energética, se evita el uso de combustibles fósiles como el carbón o el gas propano,



disminuyendo las emisiones netas de CO₂ en procesos térmicos, además, se promueve una gestión eficiente de residuos, evitando su disposición en vertederos o la quema abierta, ayudando a contener la contaminación atmosférica y los residuos químicos en el entorno.

Briquetado de Madera

El briquetado es una tecnología de compresión que genera bloques de biomasa de mayor tamaño que los pellets. Su principal ventaja técnica es la tolerancia a biomasa con mayor contenido de humedad y menor grado de trituración, lo cual reduce el costo del pretratamiento (Sahoo, Alanya Rosenbaum, Bergman, Abbas, & Bilek, 2021). Además, puede emplearse en sistemas portátiles de generación de calor y electricidad, lo que amplía su aplicación en contextos rurales o descentralizados.

Se resalta una característica técnica clave del briquetado de madera, especialmente en comparación con el peletizado. En efecto, muchas briquetadoras particularmente las de tipo hidráulico o de tornillo están diseñadas para poder operar con residuos de biomasa que no han pasado por procesos intensivos de secado o trituración fina. Esta tolerancia a mayores niveles de humedad (hasta 15%) y a partículas más gruesas permite disminuir los costos energéticos y logísticos asociados al pretratamiento, lo cual representa una ventaja significativa en entornos rurales o con recursos limitados.

La viabilidad desde un punto de vista económico, permite que la implementación sea amplia en plantas en lugares rurales, donde las condiciones de infraestructura no permiten procesos



de acondicionamiento de alta tecnología, además, esta flexibilidad mejora el aprovechamiento de una mayor variedad de residuos lignocelulósicos, aumentando el espectro de materias primas disponibles para la producción de biocombustibles sólidos.

Desde una perspectiva ambiental, las briquetas contribuyen a reducir las emisiones de material particulado y metano comparadas con la quema abierta de residuos (Sgarbossa, Boschiero, Pierobon, Cavalli, & Zanetti, 2020). Esto las convierte en una opción viable para proyectos locales de energía renovable con bajo impacto.

El briquetado, como una tecnología de baja complejidad, permite reducir la deforestación y la quema directa de residuos agrícolas y forestales, prácticas que contribuyen al deterioro de la calidad del aire y la pérdida de biodiversidad. Al emplear residuos con menor grado de procesamiento, se reducen los requerimientos energéticos del pretratamiento (como el secado o triturado intensivo), lo cual disminuye también la huella energética del sistema, ayudando a contener los límites planetarios relacionados con la contaminación atmosférica, el uso insostenible de la tierra y el cambio climático. Su implementación en comunidades rurales promueve justicia ambiental y equidad energética, apoyando una transición justa.

Gasificación de Residuos de Madera

La gasificación transforma residuos madereros en un gas combustible mediante un proceso termoquímico avanzado, operando a temperaturas superiores a 800 °C. Desde el punto de vista técnico, esta tecnología requiere un sistema integrado de alimentación, reactor, limpieza de gases



y módulos de generación eléctrica. Es particularmente eficiente cuando se integra en sistemas de cogeneración, maximizando la recuperación energética (IEA Bioenergy, 2025).

Se caracteriza correctamente la complejidad tecnológica de la gasificación, en donde se destaca sus requisitos de sistema y su alto potencial de eficiencia energética.; la mención de un sistema integrado con múltiples subsistemas que son la alimentación automática, reactor térmico, filtros de limpieza de syngas y unidades de conversión energética, demuestra que es una estructura que demanda un control preciso, monitoreo en tiempo real y una alta coordinación de variables físicas, esto implica la necesidad de tener sensores robustos, sistemas de control digital (PLC o SCADA) y un esquema de automatización avanzada.

Ambientalmente, la gasificación reduce significativamente las emisiones contaminantes y la generación de residuos sólidos. Es una alternativa viable para la producción de energía y hasta de hidrógeno con emisiones netas negativas, siempre que se implemente con un adecuado tratamiento de subproductos (IEA Bioenergy, 2025).

Se resalta uno de los mayores atributos ambientales de la gasificación que es la capacidad para convertir residuos lignocelulósicos en energía útil minimizando la huella ecológica. A diferencia de la combustión directa o de los procesos de vertido o incineración, la gasificación opera con una oxidación parcial a altas temperaturas, lo que reduce drásticamente las emisiones de partículas finas, dióxidos de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado.

La gasificación es una solución avanzada que ayuda a reducir los límites planetarios del cambio climático y la carga de aerosoles atmosféricos, al generar energía limpia a partir de residuos



y producir menores emisiones de CO₂, SO₂ y material particulado que la combustión tradicional; cuando se acopla a sistemas de captura y almacenamiento de carbono (BECCS), puede incluso lograr emisiones negativas, ayudando a revertir el calentamiento global, esto contribuye a reducir la carga química introducida en la atmósfera y suelos, dado que minimiza la generación de residuos sólidos mediante una oxidación parcial y controlada.

El análisis comparativo de los mecanismos y arquitecturas físicas en los sistemas de peletizado, briqueteado y gasificación es fundamental para comprender la interacción entre los componentes mecánicos, eléctricos y de control que intervienen en la transformación de los residuos de madera en productos o energía aprovechable.

Tabla 8. Comparación de mecanismos y estructura

Elemento / subsistema	Peletizado	Briqueteado	Gasificación
Estructura mecánica	Bastidor con matriz y rodillos que compactan la biomasa mediante fricción y presión controlada.	Estructura reforzada con pistón o tornillo que aplica presión axial sobre la biomasa.	Reactor metálico o cerámico con zonas de secado, pirólisis y reducción, diseñado para soportar altas temperaturas.
Accionamiento	Motor eléctrico trifásico con variador de frecuencia (VFD) que ajusta la velocidad de los rodillos.	Motor eléctrico o sistema hidráulico, con control de presión y caudal.	Ventiladores y válvulas motorizadas controladas electrónicamente; en sistemas avanzados, motor de combustión acoplado a generador.
Transmisión de potencia	Correas y engranajes sincronizados para	Sistema hidráulico o mecánico con	No aplica transmisión directa; flujo controlado por



	distribuir torque uniforme.	excéntricas o bielas de alta resistencia.	válvulas y sopladores eléctricos.
Sensores principales	Temperatura, corriente eléctrica, humedad del material, velocidad angular.	Presión hidráulica, temperatura del pistón, posición de carrera, humedad.	Temperatura, presión, flujo de gas, composición (CO, H ₂ , CH ₄) mediante analizadores.
Actuadores	Motores eléctricos y resistencias térmicas.	Válvulas hidráulicas, servomotores, cilindros eléctricos.	Válvulas proporcionales, sopladores y controladores de mezcla aire-combustible.

Fuente: Autores

El análisis comparativo de los sistemas de control, sensado y automatización en los procesos de peletizado, briqueteado y gasificación permite comprender el grado de tecnificación y eficiencia operativa que puede alcanzarse en cada una de estas tecnologías. Desde la perspectiva de la ingeniería mecatrónica, estos sistemas constituyen la base para el funcionamiento inteligente y seguro de las máquinas, al integrar el hardware, el software y la comunicación entre los sensores, los actuadores y los controladores (Muñoz & Ospino, 2019)

Tabla 9. Comparación de sistema de sensado, control y automatización

Aspecto mecatrónico	Peletizado	Briqueteado	Gasificación
Tipo de control	Control PID en lazo cerrado para velocidad, temperatura y alimentación.	Control PID + PLC para presión y tiempo de ciclo.	Control MPC (predictivo) o lógica difusa para regular múltiples variables térmicas y de flujo.



Arquitectura de control	Sistema central con PLC compacto , interfaz HMI y variador de frecuencia.	PLC modular con sensores analógicos y salidas digitales; control de potencia hidráulica.	Sistema distribuido con control SCADA, sensores IoT y controladores industriales.
Software de supervisión	HMI local con alarmas de sobrecarga y temperatura.	HMI + registro de datos de presión y ciclos.	Plataforma SCADA con registro en tiempo real y control remoto.
Sensores y retroalimentación	Sensores de corriente, temperatura y humedad conectados a entradas analógicas.	Sensores de presión y carrera de pistón; retroalimentación mediante encoder.	Sensores térmicos, de flujo y gas; realimentación a controladores PID o MPC.
Nivel de integración mecatrónica	Medio: interacción entre mecánica y control eléctrico.	Medio-alto: integración electrohidráulica con control electrónico.	Alto: integración de electrónica de potencia, control térmico y supervisión digital.

Fuente: Autores

La evaluación comparativa del desempeño permite analizar de manera integral la eficiencia funcional y tecnológica de los sistemas de peletizado, briqueteado y gasificación, teniendo en cuenta la interacción entre sus componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control. Este análisis busca identificar qué tecnología ofrece un mejor equilibrio entre rendimiento energético, estabilidad operativa, grado de automatización y facilidad de mantenimiento, estos factores son determinantes para la implementación de un sistema tecnificado para la empresa LEH Carpintería.



El desempeño de estas máquinas no se limita únicamente a la capacidad productiva, sino también a la sinergia entre la mecánica de los mecanismos, la precisión de los sensores y la efectividad de los sistemas de control (Verdes Kairuz & Gonzalez Santos, 2015)

Tabla 10. Desempeño de maquinas

Criterio	Peletizado	Briqueteado	Gasificación
Nivel de automatización	Medio; requiere supervisión del operador.	Medio-alto; control automático de presión y temperatura.	Alto; control multivariable supervisado por sistemas SCADA.
Precisión del proceso	Alta en velocidad y temperatura; sensible a la humedad del material.	Media; depende del control hidráulico y condiciones del material.	Alta; depende de estabilidad térmica y composición del gas.
Eficiencia energética global	80–90 %, con bajo consumo eléctrico.	70–85 %, variable según presión hidráulica.	60–75 %, pero con posibilidad de cogeneración eléctrica y térmica (Lesme Jaén et al., 2022).
Interacción hombre-máquina (HMI)	Básica; control manual asistido por variador.	Semiavanzada; interfaz de PLC con alarmas visuales.	Completa; interfaz SCADA con monitoreo remoto y registro histórico.
Capacidad de integración futura	Alta; puede automatizarse con sensores de humedad y carga.	Media; se puede integrar un sistema de control proporcional.	Muy alta; integración con sistemas energéticos o microredes.

Fuente: Autores



9. Conclusiones

- El manejo adecuado de residuos madereros representa una oportunidad estratégica para LEH Carpintería, no solo desde la perspectiva ambiental, sino también desde la rentabilidad empresarial. La implementación de tecnologías de transformación, como el peletizado, permite cerrar el ciclo de producción bajo principios de economía circular, reduciendo la dependencia de materia prima virgen y generando una disminución de los costos operativos asociados a la disposición final de residuos.
- El diagnóstico de los residuos generados en la empresa LEH Carpintería permitió evidenciar que la viruta y el aserrín representan un alto porcentaje dentro del total de desechos producidos durante los procesos de corte y pulido. Esta observación nos da a entender la importancia de establecer una adecuada caracterización de residuos sólidos que permitan identificar con precisión su origen, volumen y composición. Esta información técnica es fundamental para proponer soluciones eficientes que se ajusten a las características físicas y químicas del material.
- El sistema tecnificado propuesto constituye una solución integral que articula conocimientos de la ingeniería mecatrónica e industrial, donde se aporta herramientas de tecnológicas y monitoreo de variables críticas como: temperatura, humedad y presión, mientras ofrece metodologías para la optimización de procesos, gestión de la cadena de suministro de residuos y evaluación costo-beneficio del sistema; esta propuesta tecnológica permite que la transformación de residuos sea viable y eficiente.



- Se concluyó desde un enfoque ambiental, las tecnologías evaluadas contribuyen de manera significativa a la mitigación del cambio climático, ya que permiten evitar prácticas altamente contaminantes como la quema a cielo abierto o el depósito en rellenos sanitarios. Al transformar residuos lignocelulósicos en biocombustibles (pellets o briquetas) o en gas de síntesis (syngas), se disminuyen así las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorando la calidad del aire y se reducen los riesgos para la salud de los trabajadores y la comunidad.
- La comparación evidencia que la aplicación de principios mecatrónicos en los sistemas de peletizado, briquetado y gasificación optimiza el rendimiento y la automatización de los procesos, permitiendo un aprovechamiento más eficiente y sostenible de los residuos de la madera en la empresa.
- El peletizado fue identificado como la alternativa más adecuada para el contexto técnico y económico de LEH Carpintería, debido a su alta eficiencia en la compactación de residuos como aserrín y virutas; se identificó que el pretratamiento es menor en comparación con otras tecnologías, convirtiendo este sistema en el más apropiado para la generación de ingresos por la comercialización de pellets como fuente de energía renovable para hogares e industrias.
- El aprovechamiento tecnificado de residuos madereros no debe entenderse como un gasto, sino como una inversión estratégica, que incrementa la capacidad de adaptación empresarial frente a crisis ambientales, fortalece la imagen corporativa ante consumidores y autoridades, contribuyendo activamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria
de Colombia

**LA U VERDE
DE COLOMBIA**

Personería Jurídica No. 2599
del 13 de marzo de 1986,
Ministerio de Educación Nacional

Sostenible, especialmente los ODS 7 energía asequible y no contaminante, ODS 9 industria, innovación e infraestructura, ODS 12 producción y consumo responsable y ODS 13 acción por el clima.



10. Recomendaciones

- Adoptar el sistema de peletizado como primera fase de transformación tecnificada, donde se priorice la adquisición de maquinaria automatizada, para poder garantizar la eficiencia energética y seguridad operativa.
- Implementar un plan de capacitación técnica para el personal en el manejo de equipos automatizados, incluyendo mantenimiento básico y protocolos de operación segura.
- Establecer un sistema de monitoreo y medición continua de residuos generados para fortalecer la trazabilidad de datos y facilitar así la toma de decisiones que pueda ser basada en indicadores de eficiencia y sostenibilidad.



11. Referencias

- Amaya Cubillos, C. (2015). Disposición de residuos industriales maderables: Una estrategia empresarial ambiental para convertir costos en inversiones. Bogota D.C, Colombia. Obtenido de <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/f7e95a07-afe2-4ef3-a41a-0faf1cc5ddb/content>
- Chakrabarti, S., & Shinde, S. (2024). A Three-Phase Analysis of Synergistic Effects During Copyrolysis of Algae and Wood for Biochar Yield Using Machine Learning. India. Obtenido de <https://arxiv.org/pdf/2405.11821>
- Congreso de la Republica de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Obtenido de <https://www.constitucioncolombia.com/titulo-2/capitulo-3/articulo-79>
- Congreso de la Republica de Colombia. (1993, 22 de diciembre). *Ley 99 de 1993*. Función Pública. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Congreso de la Republica de Colombia. (1994, 2 de agosto). *Ley 157 de 1994*. Funcion publica. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=66189>
- Congreso de la Republica de Colombia. (2003). *Ley 842 de 2003*. Secretaria del senado. Obtenido de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0842_2003.html
- Diaz Artigas, I. J., Diaz Concepcion, A., Rodriguez Piñero, A., Álvarez, A. A., & Tamayo Mendoza, J. E. (2020). Briquetas energeticas con aserrín y corteza de pino. La Haban, Cuba. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012020000100003
- Escobar Córdoba, J. (2018). *Análisis del aprovechamiento de los residuos de madera en la industria maderera*. Repositorio Institucional UDEA. Obtenido de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/12528/1/EscobarJhoan_2018_BiomasaCicloVidaAglomerados.pdf



Fedemaderas. (Marzo de 2024). *Boletín estadístico forestal Colombia*. Obtenido de <https://fedemaderas.org.co/boletin-estadistico-forestal-marzo-de-2024/>

Fedemaderas. (2024). *Proyecto para convertir residuos de la industria maderera en biocombustibles*. Obtenido de <https://fedemaderas.org.co/proyecto-para-convertir-residuos-de-la-industria-maderera-en-biocombustibles/>

Florez Correa, K. L., Gonzalez Acero, M. L., & Murcia Paez, S. A. (2016). Aprovechamiento de los Residuos de la Madera Generados en el Sector de la Construcción en la Ciudad de Bogotá por Medio del Reciclaje. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/items/f3ce3521-1935-406f-8dd7-e0f1256b6e0c>

Gobernación de Cundinamarca. (7 de Octubre de 2024). Cierre del relleno sanitario de Mondoñedo no afectará la salud pública de los municipios de Cundinamarca: gobernador Jorge Rey. Obtenido de https://www.cundinamarca.gov.co/noticias/cierre-del-relleno-sanitario-de-mondonedo-no-afectara-la-salud-publica-de-los-municipios-de-cundinamarca-gobernador-jorge-rey/!ut/p/z1/jZFNT8MwDIZ_yw47pskGm4BbBdME2gdIg5VckNu6WVAaV267CX49Bk5IMOaT_fqxrVfWVmfRth7B52

Gobernacion de Cundinamarca. (s.f.). *Gobernacion de Cundinamarca*. Obtenido de <https://www.cundinamarca.gov.co/municipios/Chia>

Gonzalez Beltran, Y. A., Mejia Martinez, D. P., & Mendez Ariza, Y. M. (2018). Aprovechamiento de los residuos de madera. Bogota, Colombia. Obtenido de <https://repository.ugc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7817d800-ba3f-49b2-a2ef-ea0a77a76709/content>

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). Obtenido de https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste A Global Review of Solid Waste Management*. Washington : Urban Development Series Knowledge Papers.



- IEA Bioenergy. (2025). Biomass Gasification for Hydrogen Production. Obtenido de https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/03/IEA-Bioenergy_T33_Bio-H2_Final_v2.pdf
- INCONTEC. (2000). *NTC 4595*.
- INCONTEC. (2004). *NTC 5401*.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001 de 2015*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001 de 2018*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001 de 2018*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 12100 de 2010*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/51528.html>
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 13849-2 de 2012*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/53640.html>
- Koido, K., Konno, D., & Sato, M. (2025). Life Cycle CO₂ Emissions and Techno-Economic Analysis of Wood Pellet Production and CHP with Different Plant Scales and Sawdust Drying Processes. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/140>
- Lesme Jaen, R., Martinez Gonzalez, A., Silva Lora, E. E., & Rodriguez Ortiz, L. A. (2022). Cogeneración a partir de la gasificación de residuos de la industria forestal con el uso de motores de combustión interna. Itajuba, Brasil.
- Ley 252 de 2008*. (2008, 31 de julio). Función Pública. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=31746>
- Libra, J., S Ro, K., Kammann, C., & Funke, A. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/48856368_Hydrothermal_carbonization_of_bio



mass_residuals_A_comparative_review_of_the_chemistry_processes_and_applications_of_wet_and_dry_pyrolysis

Lopez Chalarca, L. T., Vega Rodriguez, L. Y., Rendon Colorado, C. D., & Tobón Rojas, S. (2019). Aprovechamiento de residuos madereros. Colombia. Obtenido de <https://www.uniremington.edu.co/wp-content/uploads/libros-de-investigacion/aprovechamiento-de-residuos-madereros.pdf>

Martinez Pulido, G. (2019). Planta de pelletizado de serrin. Argentina. Obtenido de <https://ria.utn.edu.ar/server/api/core/bitstreams/cb00f07a-aa75-4277-b39d-9392071397fc/content>

Mejia Brizuela, N., Orozco Guillen, E., & Galaan Hernandez, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 27-41. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/323959087_Aprovechamiento_de_los_residuos_agroindustriales_y_su_contribucion_al_desarrollo_sostenible_de_Mexico

Mejia Vega, E. D., & Perez Lozano, B. C. (2018). Diseño y construcción de una máquina peletizadora. Ocaña, Colombia.

MinAmbiente. (2020). Informe nacional sobre la gestión de residuos sólidos en Colombia. Colombia. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co>

Minambiente. (17 de Mayo de 2022). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015, 26 de mayo). *Decreto 1076 de 2015*. Función Pública. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018, 26 de julio). *Resolucion 1407 de 2018*. Funcion publica. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-1407-de-2018.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005, 30 de diciembre). *Decreto 4741 de 2005*. Función Pública.



- Muñoz, Y., & Ospino, A. (2019). Implementación de un control de frecuencia en un sistema de gasificación de biomasa. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 66-77. Obtenido de <https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/11489>
- Palacio Espinoza, C. C., Aguiar Castrillon, J. S., Morales Paternina, S. D., Peña Arango, K. A., & Arboleda Londoño, J. M. (2023). ESTUDIO CONCEPTUAL DE LA GASIFICACION POR PLASMA PARA LA PRODUCCION DE SYNGAS. Colombia. Obtenido de <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/8bb4abcc-7fd3-4b3b-8ca2-78bdeebc86bb/content>
- Pazzaglia, A., & Castellani, B. (2023). A Decision Tool for the Valorization of Wood Waste. *Tecnologías Ambientales y Climáticas*, págs. 824-835. Obtenido de <https://sciendo.com/article/10.2478/rtuect-2023-0060>
- Peñaranda Gonzalez, L. V., Montenegro Gomez, S. P., & Giraldo Abad, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 141–150. Obtenido de <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2040>
- Perez, J., Lenis, Y., Rojas, S., & Leon, C. (2012). Generación distribuida mediante gasificación de biomasa: un análisis técnico – económico e implicaciones por reducción de emisiones de CO2. Antioquia, Colombia. Obtenido de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/12476>
- Porras Reyes, A. P. (2018). RESIDUOS SOLIDOS EN EL MUNICIPIO DE CHIA VS CRECIMIENTO POBLACIONAL UN INDICADOR AMBIENTAL PARA EJECUTAR PLANES DE ACCION ENMARCADOS EN LA POLITICA PUBLICA.
- Ramirez Estrada, R., & Hernandez Sanchez, A. (2024). Sensores y tipos sensores. *Tepexi*, 50-52. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/article/view/11779/10803>
- Reciman. (2024). Obtenido de Gestión de residuos: Silvicultura: <https://www.reciman.es/gestion-de-residuos-silvicultura/>
- Reyes Echeverria, A. K., Bautista Rojas, L. E., & Quintero Cardenas, L. C. (2016). Análisis de tecnologías para la transformación de material aglomerado de madera con fines de



- reciclaje. *Revista Bistua*. Obtenido de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/bistua/article/view/625>
- Rios, L., & Martinez, C. (2022). Aprovechamiento energético de residuos de madera: una propuesta para el sector maderero colombiano. 102-115. Bogota D.C, Colombia: *Revista Colombiana de Ingeniería*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rci/article/view/90211>
- Sadaghiani, S., Mafakheri, F., & Chen, Z. (2023). Life Cycle Assessment of Bioenergy Production Using Wood Pellets: A Case Study of Remote Communities in Canada. *Energies*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/15/5697>
- Sahoo, K., Alanya Rosenbaum, S., Bergman, R., Abbas, D., & Bilek, E. (2021). Environmental and Economic Assessment of Portable Systems: Production of Wood-Briquettes and Torrefied-Briquettes to Generate Heat and Electricity. *Fuels*, 345-366. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2673-3994/2/3/20>
- Sanchez Abril, E. (2023). Aplicaciones industriales de los variadores de frecuencia. Sevilla, España.
- Sanchez Quintero, J. V. (2019). Implementación de la economía circular en el sector industrial colombiano. Chia, Cundinamarca, Colombia. Obtenido de [https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/36082/Sanchez%20Juana%20\(2019-1\)%20Economia%20Circular%20VF.pdf?sequence=1](https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/36082/Sanchez%20Juana%20(2019-1)%20Economia%20Circular%20VF.pdf?sequence=1)
- Sgarbossa, A., Boschiero, M., Pierobon, F., Cavalli, R., & Zanetti, M. (2020). Comparative Life Cycle Assessment of Bioenergy Production from Different Wood Pellet Supply Chains. *Forests*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/11/1127>
- Sierolam. (2021). *Grupo Siero*. Obtenido de <https://www.sierolam.com/wp-content/uploads/2021/03/economia-circular.jpg>
- Smith, H., & Godwin, A. (2016). Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 770-783. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116000836>
- Uniagraria. (2023). Obtenido de https://www.uniagraria.edu.co/wp-content/uploads/2023/12/AcuerdoNo1061_ActualizaPEIANexo.pdf



- UNTHA. (s.f.). Triturar residuos de madera de la producción. Obtenido de <https://www.untha.com/es/aplicaciones/restos-madera>
- Urbina Cozar, J. M., Casa Marquez, A. A., & Gil Mendoza, D. D. (2023). Elaboración de briquetas a partir de residuos de madera del IDIT (Instituto de Diseño e Investigación y Tecnología). Mexico. Obtenido de <https://repositorio.iberopuebla.mx/handle/20.500.11777/5929>
- Verdes Kairuz, R. I., & Gonzalez Santos, A. I. (2015). Controladores MPC y PID con autoajuste para un proceso de regulación de velocidad. *Revista de ingeniería electronica, automatica y de comunicaciones* , 80-93.
- WEG. (2024). Guia de especificacion de motores electricos. Obtenido de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- Zambrano, L., Moreno, P., Muñoz, F., Durán, J., Garay, D., & Valero, S. (2013). Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de madera de Pinus patula. Mexico. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712013000300006&script=sci_arttext