UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA CARRERA

AGROINDUSTRIA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"Los tratamientos térmicos como estrategia para aprovechamiento de residuos generados en el proceso de producción de madera"

AUTOR(ES):

Jhonatan Geovanny Mejeant Akintiua

Roy Ronald Tapuy Grefa

DOCENTE - TUTOR:

Dr. Amaury Pérez Martínez

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
JUAN ELIAS GONZALEZ RIVERA

JUAN ELIAS GONZÁLEZ RIVERA (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 11 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Cumple. Muy buen trabajo felicitaciones.
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Cumple
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	Cumple
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	Cumple
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	Cumple

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	Cumple
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Cumple
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Cumple
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
MARIA DEL CARMEN CASTELO NAVEDA

MARÍA DEL CARMEN CASTELO NAVEDA (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 08 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

Ouriginal by Turnitin

Firmado electrónicamente por:
AMAURY PEREZ

Document Information

Analyzed document	TIC MEJEANT-TAPUY 5-8-2023 (1)-RV-APM-07082023.docx (D172646511)
Submitted	8/8/2023 12:37:00 AM
Submitted by	
Submitter email	agi2016039@uea.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	amperez.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

W	URL: http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/PD%20406_06_%20Forest%20Harvesting%20in%20E... Fetched: 8/8/2023 12:37:00 AM	2
W	URL: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012020000100003&nrm=iso Fetched: 8/8/2023 12:38:00 AM	1
SA	**ArtCient_BiomasaSólida_Apupalo_Arcos_Barroso.pdf** Document ArtCient_BiomasaSólida_Apupalo_Arcos_Barroso.pdf (D92752287)	1

Entire Document

Los tratamientos térmicos como estrategia para aprovechamiento de residuos generados en la industria maderera

Jhonatan Geovanny Mejeant Akintiua1 agi2017039@uea.edu.ec
Roy Ronald Tapuy Grefa1 agi2017133@uea.edu.ec
Amaury Pérez Martínez1 amperez@uea.edu.ec
Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Agroindustrial (1)

Resumen El consumo mundial de madera sigue en aumento, generando grandes cantidades de residuos lignocelulósicos con potencial para producir energía y productos químicos. En este sentido esta investigación tiene el objetivo de identificar los tratamientos térmicos para aprovechar estos residuos. La búsqueda y selección de artículos se realizó con la metodología PRISMA. Se examinaron diferentes procesos termoquímicos como son: combustión directa, cocombustión, gasificación, pirólisis y torrefacción aplicados a residuos lignocelulósicos. Se compararon aspectos como composición de la biomasa, condiciones de operación, y productos. La combustión directa aprovecha el alto poder calorífico de la lignina. La pirólisis y gasificación maximizan el rendimiento del bio-oil y el syngas, gracias al contenido de celulosa. La torrefacción mejora propiedades combustibles. El análisis de composición lignocelulósica permite seleccionar el tratamiento térmico idóneo según el tipo de residuo. En conclusión, existen alternativas viables para el aprovechamiento integral de estos residuos, mitigando impactos ambientales negativos y fomentando prácticas sostenibles en la industria maderera. Palabras Clave: residuos de madera, pirolisis, combustión, gasificación, torrefacción.

"Los tratamientos térmicos como estrategia para aprovechamiento de residuos generados en el proceso de producción de madera"

"Thermal treatments as a strategy for the use of waste generated in the wood production process"

Jhonatan Geovanny Mejeant Akintiua[1]
agi2017039@uea.edu.ec

Roy Ronald Tapuy Grefa[1]
agi2017133@uea.edu.ec

Amaury Pérez Martínez[1]
amperez@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Agroindustrial (1)

Resumen

El consumo mundial de madera sigue en aumento, generando grandes cantidades de residuos lignocelulósicos con potencial para producir energía y productos químicos. En este sentido la presente investigación tuvo como objetivo identificar los tratamientos térmicos para aprovechar estos residuos. La búsqueda y selección de artículos se realizó mediante la metodología PRISMA. Se examinaron diferentes procesos termoquímicos como: la combustión directa, co-combustión, gasificación, pirólisis y torrefacción aplicados a residuos lignocelulósicos. Se compararon aspectos como composición de la biomasa, condiciones de operación, y productos. La combustión directa aprovecha el alto poder calorífico de la lignina. La pirólisis y gasificación maximizan el rendimiento del *bio-oil* y el *syngas*, gracias al contenido de celulosa. La torrefacción mejora propiedades combustibles. El análisis de composición lignocelulósica permite seleccionar el tratamiento térmico idóneo según el tipo de residuo. En conclusión, existen alternativas viables para el aprovechamiento integral de estos residuos, mitigando impactos ambientales negativos y fomentando prácticas sostenibles en la industria maderera.

Palabras Clave*: residuos de madera, pirolisis, combustión, gasificación, torrefacción.*

Abstract

Global wood consumption continues to rise, generating large amounts of lignocellulosic waste with the potential to produce energy and chemicals. In this sense, the present investigation had the objective of identifying the thermal treatments to take advantage of these residues. The search and selection of articles was carried out using the PRISMA methodology. Different thermochemical processes were examined, such as: direct combustion, co-combustion,

gasification, pyrolysis and roasting applied to lignocellulosic waste. Aspects such as biomass composition, operating conditions, and products were compared. Direct combustion takes advantage of the high calorific value of lignin. Pyrolysis and gasification maximize the yield of bio-oil and syngas, thanks to the cellulose content. Roasting improves fuel properties. The lignocellulosic composition analysis allows selecting the ideal heat treatment according to the type of waste. In conclusion, there are viable alternatives for the comprehensive use of these residues, mitigating negative environmental impacts and promoting sustainable practices in the timber industry.

***Keywords**: Wood waste, pyrolysis, combustion, gasification, roasting*

1 INTRODUCCIÓN

El consumo mundial de madera industrial alcanzó su punto máximo en 2005 con 1.790 millones de metros cúbicos impulsado por la fuerte producción de la construcción en el mundo desarrollado (Sulaiman et al., 2017). La construcción de viviendas en los Estados Unidos fue el mayor mercado mundial de madera. Se pronostica que en los próximos años el consumo mundial de productos de madera industrial aumentará en un 45 % (Wenjun, 2007). Además, el Banco Mundial también prevé que la demanda mundial de madera se cuadruplicará para 2050, por lo tanto, se requiere una mayor comprensión de las formas de mejorar la eficiencia del proceso de producción de madera, reducir el desperdicio de madera y ayudar al sector maderero a abordar los crecientes desafíos ambientales (Frank Eshun et al., 2012).

La sociedad moderna en su rápida carrera por el desarrollo y la prosperidad se enfrenta a nuevos y más exigentes desafíos en todos los niveles. Debido a estos usos de la madera se genera grandes cantidades de material residual tanto por las prácticas artesanales de producción como por el bajo nivel de industrialización de estos componentes y piezas (Hill et al., 2015). Según López et al. (2021) en los aserraderos se produce entre 45 % y 65 % de desperdicios por tonelada de madera procesada. Por otro lado, Jiménez et al. (2016) destaca que los residuos de madera son sólidos de composición orgánica de origen industrial o artesanal con abundante material lignocelulósicos con un potencial para producir productos de valor agregado.

La madera obtiene la energía a través de la fotosíntesis, proceso en donde los árboles y las plantas convierten la luz solar, el agua y el dióxido de carbono en carbohidratos como la celulosa, hemicelulosa y lignina, estos componentes son los tres constituyentes principales en la madera (Lopez et al., 2019). Cuando la madera se somete a tratamientos térmicos a altas temperaturas en presencia de oxígeno los enlaces químicos dentro de las moléculas de la madera se rompen, liberando energía almacenada en forma de calor (Lopez et al., 2019). El poder calorífico (PC) de la madera puede variar según la humedad, densidad y especie, aunque en promedio la madera seca presenta un valor de 16 a 20 MJ/kg (Vega & Herrera, 2018). El principal factor para considerar en el PC es la humedad debido a que un árbol recién cortado presenta una gran cantidad de agua reduciendo de manera significativa PC.

Los residuos de la industria maderera constituyen una preocupación ambiental significativa

debido a su volumen y potencial impacto en el ecosistema. Estos residuos se pueden clasificar en tres categorías principales: residuos sólidos, residuos líquidos y residuos gaseosos (Velázquez Martí, 2006). Los residuos sólidos incluyen recortes de madera, aserrín, virutas y restos de procesamiento, que a menudo se generan durante la fabricación de muebles, construcción y carpintería. Por otro lado, los residuos líquidos provienen de actividades de tratamiento de la madera, como el uso de productos químicos para preservarla, y pueden contener contaminantes peligrosos. Finalmente, los residuos gaseosos surgen de la combustión y emisiones durante los procesos industriales, liberando sustancias nocivas a la atmósfera (López et al., 2021). La adecuada gestión y clasificación de estos residuos resulta esencial para mitigar su impacto negativo en el medio ambiente y promover prácticas sostenibles en la industria maderera.

El uso de residuos madereros mediante procesos tecnológicos presenta un gran número de estudios que aprovechan este coproducto. Por ejemplo en el trabajo De Araujo et al. (2016), propone la producción de briquetas, a partir de la mezcla de residuos sólidos urbanos y residuos madereros de *Eucalyptus grandis* maquinados. Mientras Fiorelli et al. (2014), produce tableros de partículas aglomerados utilizando residuos de la industria maderera de *Pinus* spp. diseñado con resina de urea-formaldehído y resina de poliuretano a base de aceite de ricino. Los procesos térmicos más empleados en los residuos madereros son calderas de combustión, sistemas de cogeneración (combinación de calor y electricidad), la pirolisis y la gasificación. Según Rivela et al. (2006), la combustión directa de astillas de madera puede usarse en los motores de combustión para generar energía. La pirolisis es el tratamiento termoquímico en donde la biomasa se descompone por calentamiento a temperatura de 300-650 °C en ausencia de agentes oxidantes (López et al., 2021). Autores como Suárez Hernández et al. (2017) proponen usar residuos de madera para el proceso de gasificación, esta etapa consiste en someter los coproductos a temperaturas en un rango de 800-1000 °C para obtener *syngas* constituido por H_2 y CO.

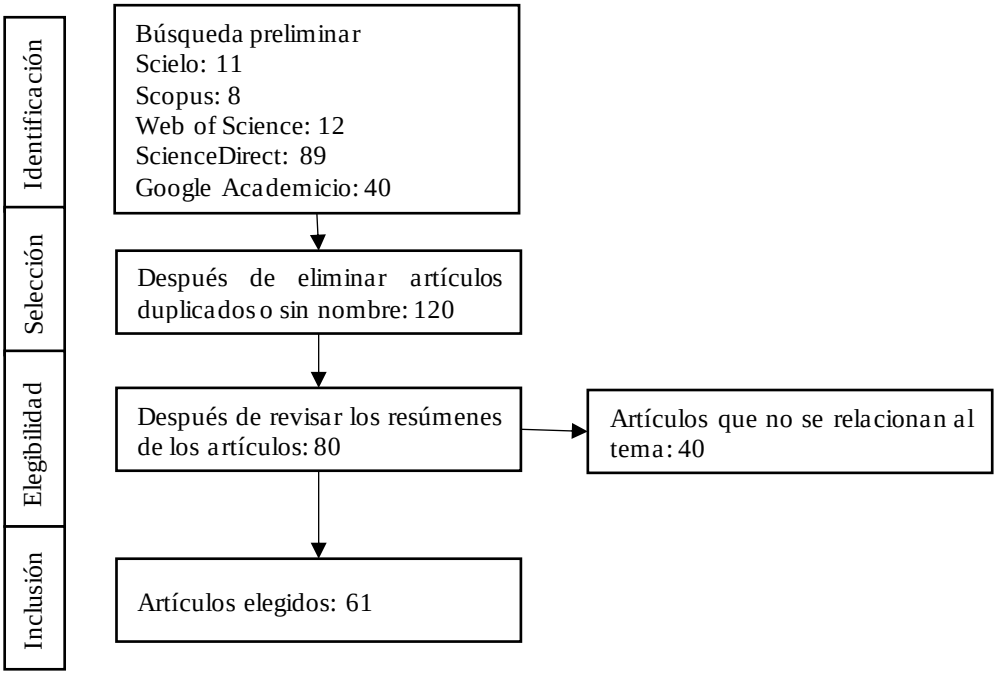
En Ecuador el Ministerio del Ambiente a través de la Dirección Nacional Forestal (DNF) es la institución encargada de regular el manejo y aprovechamiento de los bosques naturales y plantaciones forestales del país. El DNF cuenta con el Sistema de Administración Forestal (SAF). En el presente no existe información actualizada respecto a los recursos forestales (productos madereros) la única información disponible data de una década de antigüedad. Según Arias et al. (2011), en el año 2010 se registró la aprobación de 3 704 338,70 m^3 de madera proveniente de plantaciones forestales, bosques nativos, sistemas agroforestales y regeneración natural, siendo, las provincias con más recursos madereros Los Ríos, Cotopaxi y Pichincha. Respecto a Amazonía ecuatoriana, el Pigüe (*Piptocoma discolor*) es el árbol maderero más usado, por lo tanto, constituye una fuente importante de ingresos que sirve para complementar las ganancias de los hogares rurales durante los períodos de necesidad económica (Cárdenas, 2016). Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue identificar procesos tecnológicos térmicos para aprovechar los residuos madereros mediante una revisión literaria.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con los objetivos del presente artículo los procedimientos de investigación incluyen una búsqueda de literatura, un análisis y una discusión. La búsqueda bibliográfica se lleva a cabo en dos fases. La primera es la consulta en las bases de datos científicas empleando palabras clave específicas. La segunda consiste en seleccionar los artículos relevantes y descartar los que no lo son, según los criterios establecidos. Estas dos etapas se realizan y se completan con la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) empleada en el artículo de Urrútia and Bonfill (2010). El enfoque PRISMA indica cuatro pasos para identificar y extraer los datos: identificación, selección, elegibilidad e inclusión.

2.1 Recuperación de la información

La primera etapa de la metodología *PRISMA* (Page et al., 2021) inicia con la identificación (figura 1), para lo cual se debe realizar una búsqueda por base de datos como *SciELO* (https://scielo.org/), *Scopus* (https://www.scopus.com/), *Web of Science* (https://www.webofscience.com/), ScienceDirect (https://www.sciencedirect.com/) y como metabuscador se utilizó *Google* Académico (https://scholar.google.es/schhp?hl), La búsqueda se realizó utilizando la siguiente ecuación lógica ("residuos de madera" y "tratamientos térmicos en la madera") en español, mientras en ingles se usó ("biomass", "wood combustion", "wood energy applications" and "waste wood"). La búsqueda bibliográfica inicial se realizó a principios de mayo de 2023. En la búsqueda se obtuvo un número considerable de artículos y, al aplicar los filtros en el enfoque PRISMA (Figura 1), se procesaron 160 documentos.



.

Figura 1. Metodología *PRISMA* empleada.

Fuente: Adaptado de Page et al. (2021).

En la etapa de selección eliminaron los documentos sin nombre de autor y los artículos/libros, se tomaron como criterios de inclusión la selección de articulo que estén relacionan con la temática del presente trabajo y como criterio de exclusión se rechazaron artículos que no pertenezcan a la fecha de publicación entre el año 2000 y 2022. En este paso se eliminaron 40 artículos, resultando en una base de datos de 120 artículos/libros.

La tercera fase del flujo PRISMA es verificar la elegibilidad de los documentos. Aunque esta es la fase del flujo que consume más tiempo, el éxito de la investigación está directamente influenciado por este paso. En esta fase, los 80 artículos fueron analizados mediante lectura de títulos y resúmenes para evaluar si correspondían al propósito de este artículo. Primero se eliminaron los duplicados, seguidos de todos los trabajos que no correspondían al propósito de este estudio. El número final de artículos incluidos en el estudio fue de 61. La última etapa de la metodología PRISMA consiste en comprender de manera integral el campo de investigación y proporcionar conocimientos más profundos y discusiones.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comportamiento de los artículos seleccionados

Los 61 artículos seleccionados para conformar el portafolio bibliográfico de este estudio fueron mapeados y analizados en detalle. En la etapa inicial de la investigación se analizó la evolución anual de los artículos publicados. El propósito de este análisis es identificar la tendencia de evolución del interés de los investigadores por temas relacionados con el uso de residuos de madera. El gráfico de la Figura 2 se construyó con el software Microsoft Excel, considerando todos los artículos desde 2000 hasta 2023. El gráfico indica en el eje x los años de publicación y en el eje y el número de artículos publicados cada año.

Los datos de la Figura 2 muestran que el número de artículos que abordan el tema de los "residuos de madera" varía cada año, pero se puede observar una tendencia general creciente. La evolución anual del número de artículos revela que el número de artículos publicados cada año desde 2000 hasta 2009 estuvo por debajo de los 4 artículos por año. A partir del 2010 el interés por este tema comenzó a aumentar y la tendencia continúa aumentando. La tendencia creciente del número de artículos se explica por el creciente interés dado a la protección del medio ambiente en los últimos años y en este contexto, se espera que la tendencia siga creciendo.

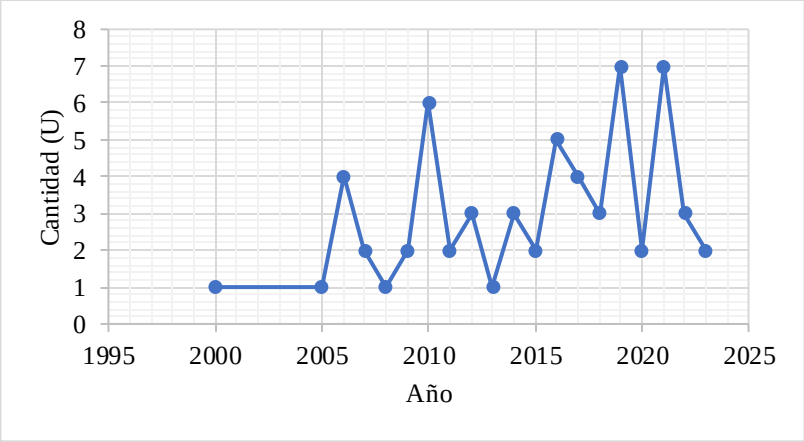


Figura 2. Evolución de los artículos seleccionados.

Fuente: Elaborado por los autores.

El interés por el tema de los residuos de madera aumentó sustancialmente en los últimos años, especialmente debido a la situación actual caracterizada por una mayor conciencia sobre el impacto de la actividad humana en el medio ambiente. Los investigadores centraron su atención en estos temas y publicaron su trabajo en varias revistas (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos térmicos empleados en la biomasa.

Especie vegetal	Tipo de residuo	Composición química (%)			Tratamiento térmico	Producto	Temp. °C	País	Referencia
		L.	H	C					
Pinus ayacahuite	Aserrín y corteza	17,00	26,00	35,00	Combustión directa	Calor (radiación)	505	Cuba	(Díaz Artigas et al., 2020).
Cylicodiscus gabunensis	Aserrín de madera	16,00	24,00	39,00	Combustión directa	Calor (radiación)	580	Dinamarca	(Ndonda Makemba et al., 2019)
Paja, rastrojos, cáscaras y diversos residuos madereros	Diversos tipos de biomasa	-	-	-	Combustión directa	Calor y contaminantes como NOx, SO_2, partículas, etc.	1300	USA	(Overend, 2015).
Cedro *Cedrus libani*	Residuos/astillas	25,00	32,00	39,00	Co-combustión	Energía eléctrica	700	Japón	(Muthuraman et al., 2010)
Abeto *Abies concolor*	cortezas	27,00	22,00	43,00	Co-combustión	Energía eléctrica o calorífica	800-900	Reino Unido	(Miller et al., 2006)
Astillas de madera, corteza, turba, cáscaras de frutos secos, entre otros.	Diversos tipos de biomasa	-	-	-	Co-combustión	Generación de energía eléctrica o calor en plantas termoeléctricas	900	Suecia	(Leckner, 2007)
Prunus avium	Residuos de cuesco	25,00	20,00	40,00	Pirolisis	Carbonizado, gases incondensables y un líquido condensado (bio-oil).	500-700	Colombia	(Arteaga V. et al., 2012)
Ficus Ficus	Residuos	40,30	12,60	47,00	pirolisis	Bio-oil	500	USA	(Obi-Reddy et al., 2010)

Prunus avium	Cáscara, racimo de y fibra	10,00	25,00	45,00	Pirolisis	Humo líquido	500	Indonesia	(Haji, 2013)
Coffea	Borra de café residuos de tallos y corteza.	15,00	24,00	35,00	Pirolisis	Coque, bio-oil y gas	450-600	Perú	(Klug, 2012)
Tectona grandis	Residuos de procesamiento	30,00	17,00	34,00	Pirolisis	Bio-oil, biocarbón, gases condensables y no condensables.	250 y 500	Indonesia	(Haryanto et al., 2021)
Ficus religioso	Residuos	20,00	20,00	42,00	Pirolisis	Bio-oil	500	USA	(Rao et al., 2022)
Pinus sylvestris L	Residuo	26,00	30,00	44,00	Torrefacción.	Astillas de madera torrefactadas	200-300	Dinamarca	(Shang et al., 2014)
Haya *Fagus sylvatica* L	Residuo	24,68	13.33	54,00	Torrefacción.	Madera torrefactada	240 y 260	Francia	(Couhert et al., 2009)
Cupressus	Residuo maderero	25,00	20,00	40,00	Torrefacción.	Biomasa torrefactada, fracciones líquida y gaseosa principalmente CO_2 y CO.	225-275	Colombia	(Jaramillo et al., 2022)
Pinus durangensis	Residuos	13,00	27,06	40,00	Gasificación	*Syngas* para producir electricidad	700-1100	México	(Balderrama-Castañeda et al., 2016)
Pinus arizonica	Residuos	22,00	23,00	42,00	Gasificación	*Syngas*	800-900	Noruega	(Timsina et al., 2023)
Pinus durangensis	Residuos	13,00	22,00	45,00	Gasificación	Gas combustible y carbón activado de alta calidad	850	China	(Zhang et al., 2021)
Pinus arizonica	Residuos de madera	21,00	23,00	44,00	Gasificación	*Syngas*, compuesto principalmente CO, CO_2, H_2 y CH_4.	850	China	(Xie et al., 2023)

Fuente: Elaborado por los autores.

Temp: Temperatura; L: Lignina; H: Hemicelulosa; C: Celulosa.

3.2 Combustión directa de residuos madereros

Existe un creciente interés de las industrias por la implementación de calderas basadas en biomasa debido a la creciente demanda de energía y las preocupaciones ambientales asociadas es así que los residuos de madera y, en particular, los productos de madera al final de su vida útil o la madera de demolición, provenientes del mueble, la construcción o la industria, por ejemplo, parecen ser una materia prima muy prometedora para las unidades de combustión (Rivela et al., 2006). El proceso de combustión directa (CD) de residuos madereros (serrín-virutas) consta de las etapas que se muestra en la Figura 3. La CD según Aguado-Zárraga (2000), inicia con el secado del residuo para un proceso eficiente, seguidamente se produce una transformación endotérmica a 200 ºC cuando la biomasa alcance 275 ºC se produce un proceso exotérmico que se caracteriza por una llama (flama) largo. La última etapa es la combustión lenta durante esta etapa no se presenta una llama.

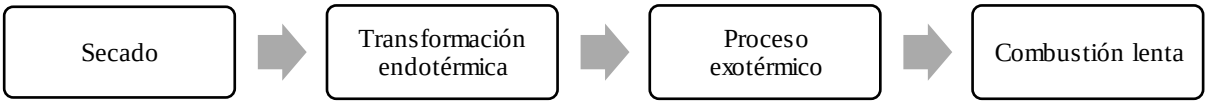


Figura 3. Etapas de combustión directa de residuos madereros**.**

Fuente: Adaptado de (Aguado-Zárraga, 2000).

Las briquetas a partir de aserrín, corteza de pino (*Pinus ayacahuite*) y aglutinante elaborado en una briquetadora a 76,5 kg/cm^2 presenta un poder calorífico (PC) de 4 200 kcal/kg, mientras, las briquetas de aserrín de *Cylicodiscus gabunensis* de forma cilíndricas de 40 mm de diámetro elaborada en una prensa hidráulica 60 kN presenta un PC 12 428.3 kcal/kg. El gran PC de *C. gabunensis* podría atribuirse a su alta densidad, lo que es una indicación de material altamente combustible y una influencia positiva en el PC (Díaz Artigas et al., 2020). La combustión de biomasa proporciona alrededor del 11% del suministro total mundial de energía primaria. Se utiliza principalmente para calefacción doméstica, calefacción urbana (Overend, 2015).

Según Díaz Artigas et al. (2020), la combustión y co-combustión requieren de > 14 %, <25 % y < 38 % de lignina, hemicelulosa y celulosa respectivamente. Esto debido a que tanto la lignina como los extractivos lipofílicos contienen menos oxígeno que los polisacáridos presentes en la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018). Los residuos de lignina de los autores de (Díaz Artigas et al., 2020) y (Ndonda Makemba et al., 2019) cumplen con los requisitos ideales mencionados, mientras la biomasa de Overend (2015), se desconoce el porcentaje de lignocelulosa debido a que el residuo de este autor está constituido por diversas biomasas.

Según Tatàno et al. (2009) durante la combustión y la recuperación de energía como una posible opción de gestión de los residuos industriales de madera se deben considerar y comparar aspectos normativos como la identificación de no peligros y peligros de los residuos madereros. Esta comparación se puede realizar mediante la normativa de “03 01” residuos del procesamiento de la madera y producción de tableros y muebles. En cambio según la Directive

2000/76/EC of the European Parliament and of the Council (2008), menciona que es importante identificar los residuos de madera que pueden contener compuestos orgánicos halogenados o metales pesados.

3.3 Co-combustión

La co-combustión es una técnica termoquímica en donde la biomasa se quema al aire libre o en presencia de exceso de aire, es decir, la co-combustión inicialmente es el mismo proceso que la combustión directa. La diferencia radica en la co-combustión en esta se emplea el calor para producir otro tipo de energía. Generalmente, este tratamiento térmico se realiza dentro de un horno, una turbina de vapor o una caldera a un rango de temperatura de 800 a 1000 °C (Lam et al., 2019). Las aplicaciones de la co-combustión son el calentamiento de agua o para producir electricidad. Mediante esta última aplicación se utilizan los gases de este proceso, que deben ser sometido a una etapa de ciclón, posteriormente este vapor se usa para impulsar turbinas y generar energía electricidad (Lopez et al., 2019).

En comparación González-García and Bacenetti (2019), exponen un tratamiento térmico de co-combustión en donde describe una planta combinada de calor y electricidad (PCE) basada en un Ciclo de *Rankine* Orgánico (CRO) y con una eficiencia energética del 20% en el ORC y 85% en la caldera a partir de residuos de madereros. La PCE está constituido principalmente por dos secciones diferenciadas (Figura 4). El primero se caracteriza por una caldera de biomasa (potencia térmica de 6.047 MW) alimentada con biomasa de astillas (residuos forestales de chopos) mientras que el segundo tramo está constituido mayoritariamente por una turbina CRO de 1 MW de potencia eléctrica. El principio del CRO se basa en un turbogenerador que funciona como una turbina de vapor convencional para transformar la energía térmica en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica. En lugar de generar vapor a partir del agua, el sistema CRO vaporiza los componentes del residuo maderero, caracterizado por una masa molecular superior a la del agua, lo que conduce a una rotación más lenta de las menores presiones y nula erosión de las partes metálicas.

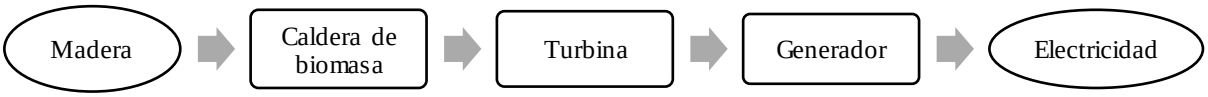


Figura 4. Proceso tecnológico de producción de co-combustión de electricidad.

Fuente: Adaptado de (González-García & Bacenetti, 2019).

Según Morales et al. (2019), la producción de electricidad por co-combustión es el camino de transformación que tiene los impactos más bajos en el medio ambiente. Sin embargo, es importante notar que el calor necesario para secar la biomasa proviene de la recuperación de los gases de combustión. Se informa que la tasa de conversión de la biomasa forestal en electricidad por el ciclo de Rankine es de alrededor del 39% al 44%; por lo tanto, la combustión de cada tonelada de biomasa forestal genera alrededor de 4,4 kWh de energía eléctrica (Antwi-Boasiako & Acheampong, 2016).

A partir de los requerimientos lignocelulósicos expuestos por Díaz Artigas et al. (2020), todos los autores que usan la co-combustión en la tabla 1 cumple la cantidad optima de lignina. Respecto a la comparación de emisiones contaminantes, los estudios coinciden en que la co-combustión de carbón y biomasa puede reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO2) debido al menor contenido de carbono en la biomasa (Leckner, 2007; Miller et al., 2006). La adición de biomasa también reduce las emisiones de óxidos de azufre (SOx) proporcionalmente a su menor contenido de azufre (Miller et al., 2006). Sin embargo, el efecto en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) depende del tipo de biomasa y las condiciones operativas, y puede aumentar o disminuir (Leckner, 2007). Miller et al. (2006) se enfocan en emisiones de metales traza, las cuales pueden incrementarse por la adición de ciertos residuos según su composición.

Entorno a la libación temprana de volátiles no siempre reduce la temperatura de ignición de la mezcla, ya que depende de otros factores como disponibilidad de oxígeno (Muthuraman et al., 2010). La reactividad de la biomasa es mayor inicialmente, mientras que la combustión del carbón procede en un rango amplio de temperaturas (Leckner, 2007; Muthuraman et al., 2010). La adición de biomasa puede mejorar la combustión de componentes menos reactivos del carbón (Leckner, 2007; Muthuraman et al., 2010).

Respecto a las tecnologías de la co-combustión de la tabla 1, (Leckner, 2007) cubre configuraciones de co-combustión en calderas de lecho fluidizado. Los lechos fluidizados parecen ser más flexibles en tamaño y tipo de combustible (Leckner, 2007). Miller et al. (2006) usan un reactor de combustión en suspensión para simular lecho fluidizado. Los demás estudios usan técnicas analíticas como análisis termogravimétrico (Muthuraman et al., 2010).

Analizando la formación de cenizas y depósitos de la co-combustión de la tabla 1, la biomasa tiende a contener mayores niveles de metales alcalinos, lo que puede incrementar la formación de depósitos y corrosión durante la co-combustión (Leckner, 2007; Miller et al., 2006). Por ello, se recomienda limitar el porcentaje de biomasa para evitar problemas operativos por deposición de cenizas (Leckner, 2007). Miller et al. (2006) encontraron que la adición de ciertos residuos afecta las emisiones de algunos metales como Cd, Cr y Mn, influyendo en la deposición.

3.4 Gasificación

La gasificación de biomasa es la conversión de biomasa sólida en una mezcla gaseosa llamada *syngas* que consiste principalmente en hidrógeno (H), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), hidrocarburos ligeros como etano y propano. El alquitrán, hidrocarburos condensables de peso molecular superior también puede estar presente en el gas producto. Los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante utilizan material de lecho catalítico o inerte en un estado fluidizado que mejora la distribución del calor y la biomasa dentro del gasificador (Schneider et al., 2021). Los lechos fluidizados se caracterizan por la menor caída de presión y bajo gradiente de temperatura en el interior del lecho. Los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante funcionan entre 700 °C y 1100 °C (Balderrama-Castañeda et al., 2016).

Los pasos principales durante un proceso de gasificación son el secado, la desvolatilización, la oxidación y la reducción, que ocurren de forma bastante simultánea. El secado, la desvolatilización y la gasificación del carbón son de naturaleza endotérmica, mientras que la oxidación del carbón y el craqueo del alquitrán son de naturaleza exotérmica. Cuando la temperatura de la biomasa seca aumenta alrededor de 300–400 °C, se produce la desvolatilización y la biomasa seca se convierte en carbón (fracción sólida de carbono), así como en alquitrán y volátiles (Raj et al., 2023).

El trabajo expuesto por Timsina et al. (2023), describe un reactor de lecho fluidizado burbujeante a escala piloto que opera a presión atmosférica debido a mejores resultados a 101,325 kPa y a una temperatura de 800 °C y 900 °C, tiene un diámetro de 0,1 m, una altura de 1 m y un espesor de pared de 4 mm en donde utiliza residuos madereros convertidos en gránulos de madera (residuos de *Pinus arizonica*). La superficie interior del reactor está recubierta con material refractario, mientras que la superficie exterior está aislada con fibra de vidrio gruesa. La instalación se ve facilitada por tres calentadores eléctricos de 3 kW, uno para calentar el agente gasificante y los otros dos para calentar el reactor. La configuración del equipo de gasificación consta de un reactor, un silo de almacenamiento de biomasa, tornillos de alimentación de biomasa y un embudo de material de lecho. Los residuos de madera mostraron resultados buenos a una temperatura de 850 °C con una conversión de carbono de alrededor del 60 %. En cambio, para el CO, CO_2 y los contenidos fueron 13,92%, 12,4%, 16,1% y 56,3% respectivamente.

La gasificación requiere un alto porcentaje de celulosa debido a que el corazón de este proceso tiene lugar a temperaturas de 325 a 375 °C, donde la celulosa principalmente se descompone en gases condensables, no condensables, bioaceite y las partículas de biomasa se descomponen en biocarbón (Li et al., 2019). Aunque la descomposición de lignina con lleva temperaturas superiores 800 C, ya que este componente tiende a producir menos gas y más alquitrán que los demás componentes de la biomasa lignocelulósica (Castro Garcia et al., 2022). Los autores Balderrama-Castañeda et al. (2016) y Zhang et al. (2021), cumple con los requisitos ideales en la celulosa de la tabla 1 respecto a la composición química de Li et al. (2019). El resto de los autores que usan la gasificación en la tabla 1 solo cumple con el requisito ideal de celulosa.

Respecto al tipo de gasificador, Timsina et al. (2023) y Zhang et al. (2021) utilizaron un gasificador de lecho fluidizado, mientras que Xie et al. (2023) emplearon uno de lecho fijo. El gasificador de lecho fluidizado parece tener ciertas ventajas en términos de transferencia de calor y manejo de algunas biomasas. Sin embargo, se requiere más investigación para comparar la eficiencia de ambos tipos. En cuanto a condiciones operativas, los estudios de Timsina et al. (2023), Xie et al. (2023) y Zhang et al. (2021) involucraron la optimización de parámetros como temperatura, relación biomasa/oxígeno y adición de vapor. Las condiciones óptimas varían según el tipo de biomasa y configuración del gasificador. Balderrama-Castañeda et al. (2011) se enfocaron más en el análisis económico del proceso.

Respecto al uso de catalizadores, Xie et al. (2023) modificaron el transportador de oxígeno con NiO, logrando mejorar el rendimiento. El uso estratégico de catalizadores parece ser una vía prometedora para making the process more efficient. En cuanto a integración de procesos, Zhang et al. (2021) presentan un sistema novedoso que integra la gasificación con la activación de carbón en un solo reactor, logrando la co-producción de gas y carbón activado. Este enfoque demuestra la flexibilidad de la gasificación para obtener diferentes productos de valor agregado.

El principal producto obtenido de la gasificación es el *syngas*, por lo tanto, se deben tener consideraciones para obtener este gas de calidad se sugiere que la gasificación de biomasa de madera con vapor de agua u oxígeno porque mejora el rendimiento y aumenta la proporción de hidrógeno en el *syngas* noción que validada por Raj et al. (2023). Mientras Timsina et al. (2023), menciona que el contenido de CO puede alcanzar hasta un 40-45 mol% con oxígeno como agente gasificante y el H_2 el contenido puede alcanzar hasta un 60% en moles con vapor como agente gasificante.

3.5 Pirolisis

La madera que está sujeta a una rápida descomposición térmica en ausencia de oxígeno se conoce como pirólisis. Este proceso produce líquidos de bioaceite, gases y carbón. La madera primero se tritura y luego se envía a un reactor de alta temperatura con una temperatura de alrededor de 932 °F (500 °C). A esta temperatura, la madera se convierte en vapor. Después de esta transformación, se enfría, se condensa y se recoge en forma líquida de bioaceite, gases y carbón (Cantos-Macías et al., 2018). El término pirólisis rápida proviene del hecho de que el tiempo entre el calentamiento y el enfriamiento se reduce sustancialmente, lo que da como resultado una mayor cantidad del producto líquido de bioaceite deseado (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018).

En el trabajo expuesto por Zhong et al. (2010), menciona que una planta de pirolisis flash inicia con la clasificación (<3 mm) de los trozos pequeñas de madera (residuos madereros de diversos tipos) luego se suministra 37 kWh de potencia para 1800 kg/h de fabricación de briquetas. La siguiente etapa es la pirólisis en donde se convierte las partículas de biomasa en gases, partículas de carbón sólido y vapor pirolítico condensable al calentar la biomasa en un reactor en ausencia de oxígeno. El vapor se extingue para formar aceite pirolítico. En esta etapa se suministra una potencia de 57,1 kWh para permitir que se lleve a cabo la combustión. Además, las condiciones del proceso incluyen un tiempo de residencia muy corto < 2 s y altas velocidades de calentamiento de 450 a 600 C. El paso inicial de la pirólisis flash ocurre en el reactor, que no tiene oxígeno (la menor cantidad posible) y una temperatura alta de alrededor de 500 C, para producir vapores pirolíticos, que contienen iones de carbono, hidrocarburos y productos orgánicos.

En el proceso tecnológico de la pirolisis de la lignina es más difícil de deshidratar que la celulosa o la hemicelulosa. Además, la lignina produce más carbón residual que la pirólisis de la celulosa (Mohan et al., 2006). Por lo tanto, si se requiere un rendimiento mayor de bioaceite se necesita una menor cantidad de lignina. Según Mohan et al. (2006) la madera o residuo para

un ideal tratamiento térmico de pirolisis (TTP) debe poseer aproximadamente un <10 %, >28 % y > 38 % de lignina, hemicelulosa y celulosa respectivamente. Analizando los TTP (tabla 1) de (Arteaga V. et al., 2012), (Rao et al., 2022), (Obi-Reddy et al., 2010) y (Haji, 2013) estos poseen el porcentaje óptimo de celulosa, por lo tanto, se obtiene una mayor cantidad de bioaciete respecto a los autores con menor cantidad de celulosa de (Klug, 2012) y (Haryanto et al., 2021) (Haryanto et al., 2021). Tan solo Haji (2013) cumple con el porcentaje óptimo de lignina pero se debe tener en cuenta que la biomasa en todos los autores se obtiene como un residuo. Otro aspecto para destacar en la pirolisis es la temperatura en Klug (2012) y Haryanto et al. (2021) es menor de 250 °C y 300 °C respectivamente, estas cantidades están relacionados con una menor cantidad de celulosa. Mientras, en los demás autores la temperatura media es de 500 °C.

La mayoría de los artículos describen la pirólisis como un proceso con una atmósfera inerte en ausencia de oxígeno. Sin embargo, se permite el oxígeno limitado siempre que no facilite la gasificación a un nivel sustancial noción que es afirmada por Haryanto et al. (2021). El porcentaje de productos obtenidos a partir de residuos madereros es de 75% de líquido, 12% de sólido y 13% de gas (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018). Además, la pirolisis se puede dividir en dos tipos:

3.5.1 Pirolisis convencional

La pirólisis lenta convencional se ha aplicado durante miles de años y se ha principalmente para la producción de carbón vegetal. En la pirólisis lenta de la madera, la biomasa se calienta a ~500 °C. El tiempo de residencia del vapor varía de 5 min a 30 min. Los vapores no se escapan tan rápidamente como lo hacen en la pirólisis rápida. Por lo tanto, los componentes en la fase de vapor continúan reaccionando entre sí, a medida que se forman el carbón sólido y cualquier líquido (Faxas Esaclona et al., 2010). La velocidad de calentamiento en la pirólisis convencional suele ser mucho más lenta que la utilizada en la pirólisis rápida.

3.5.2 Pirolisis rápida

La pirólisis rápida es un proceso de alta temperatura en el que la biomasa se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno. La biomasa se descompone para generar vapores, aerosoles y algo de carbón vegetal. Después del enfriamiento y la condensación de los vapores y aerosoles, se forma un líquido móvil de color marrón oscuro que tiene un poder calorífico que es aproximadamente la mitad de la gasolina convencional (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018). Los procesos de pirólisis rápida producen del 60 al 75 % en peso de bioaceite líquido, del 15 al 25 % en peso de carbón sólido y del 10 al 20 % en peso de gases no condensables, según la materia prima utilizada. No se generan residuos, porque el bioaceite y el carbón sólido se pueden utilizar como combustible y el gas se puede reciclar de nuevo en el proceso (Haryanto et al., 2021).

3.6 Torrefacción

La biomasa torrefactada es una nueva fuente de combustible "verde" resultante de un

tratamiento térmico (Figura 5) aplicada a la materia prima en condiciones entre los procesos de secado y carbonización, es decir, la torrefacción es un proceso de pirólisis suave que se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre los 225 y los 300 °C, en el que se descompone la hemicelulosa, la fracción más reactiva de la madera (Prins et al., 2006). Las reacciones de deshidratación y descarboxilación provocan una pérdida de masa de la madera, mientras que se conserva en gran medida el poder calorífico inferior de la madera. Los principales cambios provocados por la torrefacción son el aumento del carbono fijo, el poder calorífico, molturabilidad, reducción de la humedad contenido, higroscopicidad y heterogeneidad. Además, la torrefacción mejora la logística de transporte de biomasa debido a que el material torrefactado es más fácil al manejo y presenta mayor cantidad de energía por volumen, en comparación con la materia prima. Por lo tanto, los costos de transporte de la biomasa tratada disminuyen, lo que impacta directamente en la viabilidad del proceso (Felfli et al., 2005).

Autores como Shang et al. (2014), exponen el diseño del proceso de torrefacción a partir den astillas de madera de pino (*Pinus sylvestris* L.), antes de iniciar el proceso se debe secar las astillas hasta una humedad de 10 %. La torrefacción la realiza en un termogravimétrico a una temperatura de 250 C por 2 horas, mientras Couhert et al. (2009), torrefactó residuos de haya en un reactor de leche fijo a 240 °C y 260 °C por 2.5 horas. Durante el proceso, se libera agua y una parte de los volátiles, lo que provoca una disminución de la masa y un aumento de la densidad de energía al mismo tiempo. Ambos autores mencionan concuerdan que la torrefacción es una tecnología que permite principalmente eliminar la humedad y los componentes volátiles orgánicos de bajo peso de la biomasa, produciendo un producto sólido hidrofóbico con una mayor densidad de energía. Siendo utilizado como un pretratamiento para la gasificación y co-combustión.

Según Prins et al. (2006), la torrefacción se requiere bajos niveles de hemicelulosa entre > 24 % porque el objetivo de este proceso es eliminar este componente para concentrar la lignina y celulosa para aumentar el poder calorífico, además, menciona como ideal > 14 % de lignina y > 40 % de celulosa. Entre los autores que cumple esta estas especificaciones están Couhert et al. (2009) y Jaramillo et al. (2022) con *Fagus sylvatica* L y *Cyppres* respectivamente (tabla 1). El motivo porque se requiere un nivel bajo de hemicelulosas es debido que esta comienzan a descomponerse a los 200-250 ◦C, mientras que la celulosa y la lignina comienzan a degradarse a los 270-300 ◦C (Shang et al., 2014).

Analizando la tabla 1 respecto a los artículos que emplea la torrefacción autores como Shang et al. (2014) y Couhert et al. (2009) coinciden en que la torrefacción mejora la calidad del combustible sólido, haciéndolo más hidrofóbico, reduce el contenido de oxígeno y aumenta el contenido de carbono e hidrógeno en la madera. además, Couhert et al. (2009) encuentra que la torrefacción aumenta los rendimientos de H_2 y CO durante la gasificación. En cambio Jaramillo et al. (2022), menciona que incrementar la temperatura de torrefacción aumenta la densidad energética pero reduce el rendimiento másico y energético. Identificación ideal lignocelulósicos en los tratamientos térmicos.

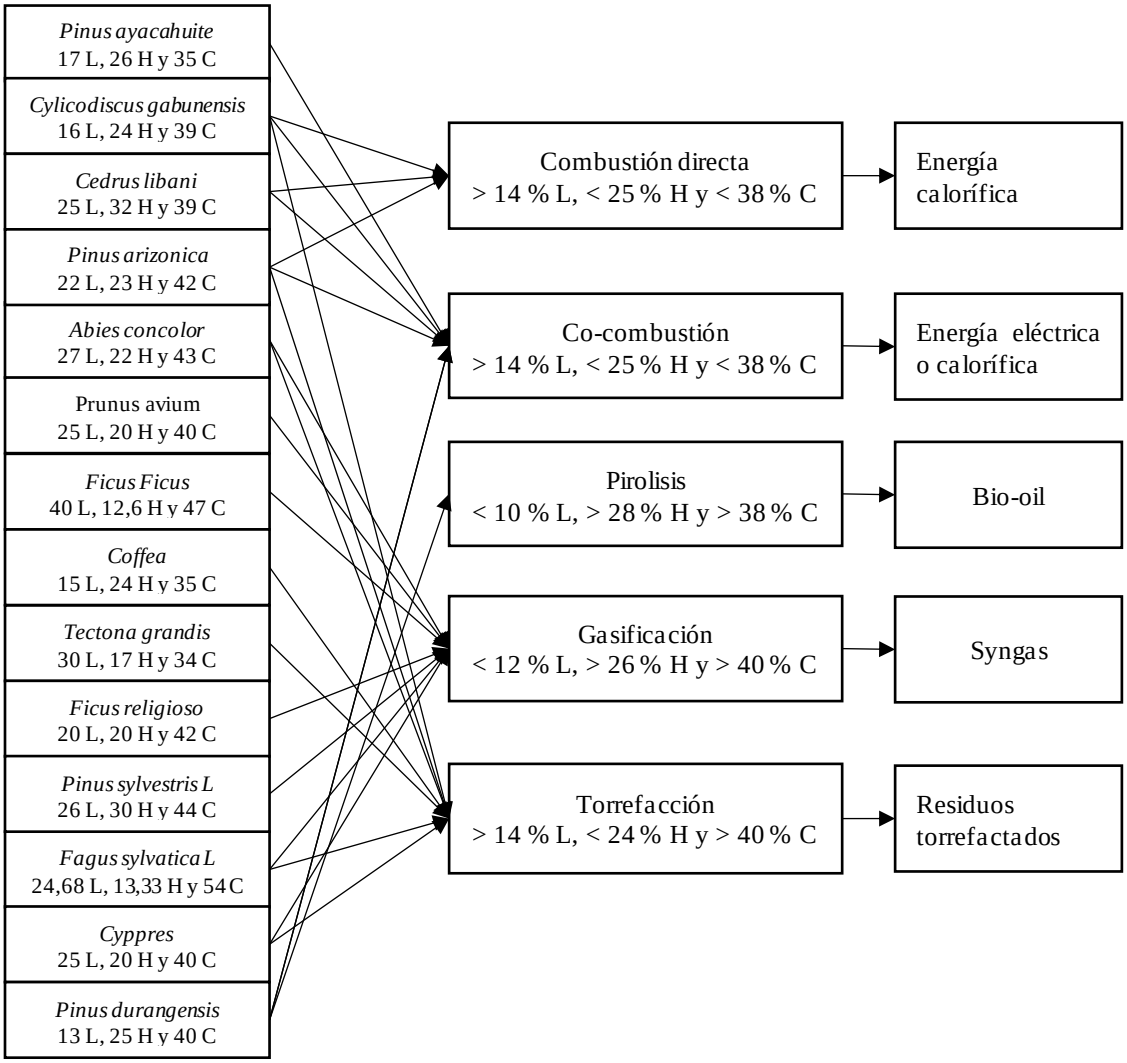


Figura 5. Selección del residuo maderero para un ideal tratamiento térmico.

Fuente: Elaborado por los autores.

Durante el análisis e identificación del tratamiento térmico respecto a los diversos autores estudiados se determinó que los residuos madereros de los artículos en ocasiones no cumplían con los requerimientos ideales, por lo tanto, a partir de los residuos lignocelulósicos se establecerá e identificará que los residuos de la tabla 1 estén vinculados al tratamiento térmico ideal (Figura 5). En la combustión directa y co-combustión la lignina debe ser > 14 % debido a que proporciona mayor poder calorífico y ayuda a la ignición y la hemicelulosa debe ser <25 % para evitar altos niveles aumentan NO_x y celulosa debe presentar < 38 % porque alto contenido energético, produce niveles altos pueden causar problemas. Los residuos óptimos para estos tratamientos térmicos son; *Pinus ayacahuite, Cylicodiscus gabunensis, Pinus arizonica y Pinus durangensis.* Ademas se selecionan el Pinus ayacahuite y Cedrus libani en estos tratamientos.

En la pirolisis el objetivo es obtener bio-oil para lo cual se requiere < 10 % L, > 28 % H y > 38 % C. una elevada cantidad de celulosa se debe porque produce alto rendimiento de vapores y bio-oil deseable. El único residuo identifico para la pirolisis es el *Pinus durangensis*. Mientras, en la gasificación se debe obtener syngas para lo cual se necesita < 12 % L, > 26 % H y > 40 % C < 12 % L, > 26 % H y > 40 % C, ningún residuo cumple con estos requisitos por lo cual se toma como criterio final aquellos residuos un > 40 % celulosa (Figura 5). La alta cantidad de celulosa en la gasificación es para maximizar la obtención del gas de síntesis. Por último, en la torrefacción se requiere principalmente < 24 % de hemicelulosa ya que este proceso es empleado como un pretratamiento para la pirolisis y gasificación, por lo tanto, el criterio para seleccionar el tratamiento térmico se estableció a los residuos con < 24 % de hemicelulosa.

4 CONCLUSIONES

El artículo demuestra el creciente interés de los investigadores sobre el uso de los tratamientos térmicos para aprovechar los residuos de la industria maderera. Esto se refleja en que existen alternativas viables mediante procesos como combustión, gasificación y pirólisis para valorizar estos residuos y obtener productos de valor energético, químico o material.

La celulosa es favorable para la pirólisis y la gasificación por su alto rendimiento de productos. La lignina es deseable para la combustión y la co-combustión por su alto contenido energético. La torrefacción puede emplearse como pretratamiento para eliminar hemicelulosa, hacer la biomasa más hidrofóbica y mejorar procesos posteriores como gasificación.

El estudio de la composición lignocelulósica de distintos tipos de residuos madereros permite establecer correlaciones entre su contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa con los tratamientos térmicos más adecuados. Así, se puede elaborar una ruta para seleccionar el proceso adecuado según las características del residuo, maximizando el rendimiento de productos deseados. Esto constituye un aporte relevante para orientar el aprovechamiento integral y sostenible de los residuos de la industria maderera.

REFERENCIAS

Aguado-Zárraga, R. (2000). Combustión y pirolisis de residuos de madera en spouted bed conico. *[Tesis presentada en opcion al grado de Doctor en la Universidad del Pias Vasco]*, 350. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/29183/PhD_R_Aguado.pdf?sequence=1

Alvis-Gordo, J. F., Cabas-Giraldo, L. D., & Valencia-Ramos, D. P. (2017). Propiedades físico-mecánicas de la madera de uraco (*ocotea brevipetiolata van der werff*), municipio de Sibundoy, Putumayo. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *15*, 66-75. https://doi.org/10.18684/BSAA(15)66-75

Antwi-Boasiako, C., & Acheampong, B. B. (2016). Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. *Biomass and Bioenergy*, *85*, 144-152. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.006

Arias, E., Robles, M., Villegas, T., & Tene, W. (2011). Aprovechamiento de recursos forestales

en el Ecuador. *Establecimiento de un Sistema Nacional de Estadísticas Forestales y Comercialización de la Madera por la OIMT (Organización Internacional de las Maderas Tropicales)* 28. http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/PD%20406_06_%20Forest%20Harvesting%20in%20Ecuador%202010%20offenses%20and%20forfeiture.pdf

Arteaga V., J. C., Arenas C., E., López R., D. A., Sánchez L., C. M., & Zapata B., Z. (2012). Obtención de biocombustibles producto de la pirolisis rápida de residuos de palma africana (Elaeis guineensis Jacq.). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *10*, 144-151. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612012000200017&nrm=iso

Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques*, *24*. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877

Balderrama-Castañeda, S., Lujan, C., Lewis, D., Ortega-Gutiérrez, J., Jong, B., & Najera, T. (2016). Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Madera y Bosques*, *17*, 67. https://doi.org/10.21829/myb.2011.1721149

Cantos-Macías, M. A., Quesada-González, O., Ross-Mesa, A., Brito-Soubanell, A. L., & Casanova-Gómez, A. (2018). Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos. *Revista Cubana de Química*, *30*, 400-422. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000300003&nrm=iso

Cárdenas, M. J. (2016). Pelletización del Aserrín de Pigüe (*Pollalesta discolor*) para Fines Energéticos en la Provincia de Pastaza. *[Tesis presentada en opcion a Ingeniera Agroindustrial en la Universidad Estatal Amazónicar]*, 77. https://repositorio.uea.edu.ec/bitstream/123456789/658/1/T.AGROIN.B.UEA.0037

Castillo-Tumaille, G. I., & Espinoza-Espinoza, W. N. (2017). Análisis de aceptación del papel a base de pinzote de banano como alternativa de reemplazo al papel tradicional, en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, *V*(18), 59-70. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215052403005

Castro Garcia, A., Cheng, S., & Cross, J. S. (2022). Lignin Gasification: Current and Future Viability. *Energies*, *15*(23).

Couhert, C., Salvador, S., & Commandré, J. M. (2009). Impact of torrefaction on syngas production from wood. *Fuel*, *88*(11), 2286-2290. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.003

De Araujo, V., Vasconcelos, J., Barbosa, J., Morales, E., & Gutierrez, C. (2016). Problems and Possible Solutions to the Wood Waste from the Wooden Housing Production in Brazil. *International Convention of Society of Wood Science and Technology*, *1*. https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwjIk8v8ns3_AhUAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.academia.edu%2F42984086%2FProblems_and_Possible_Solutions_to_the_Wood_Waste_from_the_Wooden_Housing_Production_in_Brazil&psig=AOvVaw1fzAtzJHq4xKwC7TrpzTd3&ust=1687192210486544&opi=89978449

Dias, A., Carvalho, A., Silva, M. E., Lima-Brito, J., & Gaspar, M. J. (2020). Physical, chemical and mechanical wood properties of Pinus nigra growing in Portugal. *Annals of Forest Science*, *77*(3), 72. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00984-8

Díaz Artigas, I. J., Díaz Concepción, A., Rodríguez Piñero, A. J., Alfonso Álvarez, A., & Tamayo Mendoza, J. E. (2020). Briquetas energeticas con aserrín y corteza de pino. *Ingeniería Energética*, *41*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012020000100003&nrm=iso

Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council. The European Parliament and of the Council. 2008 [cited 2023/; [Online] Available: http://data.europa.eu/eli/dir/2000/76/oj.

Faxas Esaclona, R., Suárez Rodríguez, J. A., & Beatón, P. A. (2010). Pirólisis autotérmica en lecho fluidizado de aserrín de algarrobo. *Tecnología Química*, *XXX*(2), 95-101. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543770011

Felfli, F. F., Luengo, C. A., Suárez, J. A., & Beatón, P. A. (2005). Wood briquette torrefaction. *Energy for Sustainable Development*, *9*(3), 19-22. https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60519-0

Fiorelli, J., Ramos, R., Sayama, J., Garzon Barrero, N. M., & Pallone, E. (2014). Particleboards with waste wood from reforestation. *Acta Scientiarum Technology*, *36*, 251-256. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i2.18757

Frank Eshun, J., Potting, J., & Leemans, R. (2012). Wood waste minimization in the timber sector of Ghana: a systems approach to reduce environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, *26*, 67-78. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.025

González-García, S., & Bacenetti, J. (2019). Exploring the production of bio-energy from wood biomass. Italian case study. *Science of The Total Environment*, *647*, 158-168. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.295

Haji, A. G. (2013). Komponen Kimia Asap Cair Hasil Pirolisis Limbah Padat Kelapa Sawit [palm oil solid waste; pyrolysis; liquid smoke; chemical compound]. *2013*, *9*(3), 8. https://doi.org/10.23955/rkl.v9i3.779

Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., & Yoo, J. (2021). Valorization of Indonesian Wood Wastes through Pyrolysis: A Review. *Energies*, *14*, 1407-1421.

Hill, C., Norton, A., & Kutnar, A., 12 - Environmental impacts of wood composites and legislative obligations, Woodhead Publishing, 2015. p. 311-333.https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00012-3

Jaramillo, F. E., Alvarado, P. N., & Mazo, R. A. (2022). Torrefacción de biomasa en un reactor de tornillo a escala de banco: efecto de la temperatura y del tipo de biomasa. *TecnoLógicas*, *25*(54), e2269. https://doi.org/10.22430/22565337.2269

Jiménez, P. V., Medina, J. C., Pan, E. M., Ruiz, A. P., & Umlandt, M. (2016). Uso de residuos de carpintería de las especies Prosopis alba y Pinussp. en la elaboración de paneles aglomerados. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, *24*(1), 26-35. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48163556007

Kırbaş, İ., & Çifci, A. (2022). An effective and fast solution for classification of wood species: A deep transfer learning approach. *Ecological Informatics*, *69*, 101633. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101633

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista De Química*, *26(2)*, 37-40. https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547

Lam, M. K., Loy, A. C. M., Yusup, S., & Lee, K. T., Chapter 9 - Biohydrogen Production From Algae, Elsevier, 2019. p. 219-245.https://doi.org/1016/B978-0-444-64203-

5.00009-5

Leckner, B. (2007). Co-combustion a summary of technology. *Thermal science*, *11 (4)*, 5-40. https://doi.org/10.22987/TSCI0704005L

Li, C., Yue, X., Yang, J., Yang, Y., Gu, H., & Peng, W. (2019). Catalytic Fast Pyrolysis of Forestry Wood Waste for Bio-Energy Recovery Using Nano-Catalysts. *Energies*, *12*(20).

Lopez, L., Vega, L., Rendón, C., & Tobón, S., Aprovechamiento de residuos madereros: cuantificación, caracterización y valorización, 1ª edición., Medellín, Colombia, 2019. p. 344. https://www.uniremington.edu.co/wp-content/uploads/libros-de-investigacion/aprovechamiento-de-residuos-madereros.pdf

López, L. T., Vega Rodríguez, L. Y., Rendón Colorado, C. D., & Tobón Rojas, S. (2021). Caracterización de los residuos de la industria maderera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones. *Ingeniería y Desarrollo*, *38*, 104-124. https://doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1.

Miller, B., Dugwell, D., & Kandiyoti, R. (2006). The Fate of Trace Elements during the Co-Combustion of Wood-Bark with Waste. *Energy & Fuels*, *20*(2), 520-531. https://doi.org/10.1021/ef058013r

Mohan, D., Pittman, C. U., Jr., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, *20*(3), 848-889. https://doi.org/10.1021/ef0502397

Morales, M., Collet, P., Lardon, L., Hélias, A., Steyer, J.-P., & Bernard, O., Chapter 20 - Life-cycle assessment of microalgal-based biofuel, Elsevier, 2019. p. 507-550.https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64192-2.00020-2

Muthuraman, M., Namioka, T., & Yoshikawa, K. (2010). A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste. *Bioresource Technology*, *101*(7), 2477-2482. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.060

Ndonda Makemba, R., Tosso, F., Moupela, C., Daïnou, K., & Doucet, J.-L. (2019). Cylicodiscus gabunensis Harms : une espèce prisée dans le commerce international (synthèse bibliographique). *Biotechnologie Agronomie*, *Vol 23*, *num (3)*, 188-202. https://doi.org/10.25518/1780-4507.18006

Obi-Reddy, C., Uma-Maheswari, D., Prasad-Reddy, J., Guduri, B., & Varada-Rajulu, A. (2010). Properties of Ligno-cellulose Ficus Religiosa Leaf Fibers. *International Journal of Polymers and Technologies*, *2(1)*, 29-36. https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/4639/Reddy_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Overend, R. (2015). Direct combustion of biomass. *Direct Combustion of Biomass*, *1*, 2-9. https://www.eolss.net/sample-chapters/C08/E3-08-01-04.pdf

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., & Tetzlaff, J. M. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Pandey, S. (2022). Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal. *SN Applied Sciences*, *4*(6), 168. https://doi.org/10.1007/s42452-022-05061-5

Prins, M. J., Ptasinski, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *77*(1), 35-40.

https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.01.001

Raj, R., Tirkey, J. V., & Jena, P. (2023). Gasification of Briquette, Mahua wood, and Coconut shell and application to CI engines: Comparative performance and optimisation analysis. *Industrial Crops and Products*, *199*, 116758. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116758

Rangel, L., Moreno, P., Trejo, S., & Valero, S. (2017). Propiedades de tableros aglomerados de partículas fabricados con madera de Eucalyptus urophylla. *Maderas. Ciencia y tecnología*, *19*, 373-386. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2017000300012&nrm=iso

Rao, Y. K. S. S., Dhanalakshmi, C. S., Vairavel, D. K., Surakasi, R., Kaliappan, S., Patil, P. P., Socrates, S., & Lalvani, J. I. J. (2022). Investigation on Forestry Wood Wastes: Pyrolysis and Thermal Characteristics of Ficus religiosa for Energy Recovery System. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2022*, 3314606. https://doi.org/10.1155/2022/3314606

Rivela, B., Moreira, M. T., Muñoz, I., Rieradevall, J., & Feijoo, G. (2006). Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture. *Science of The Total Environment*, *357*(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.04.017

Schneider, C., Zeller, M., Böhm, D., & Kolb, T. (2021). Influence of pressure on the gasification kinetics of two high-temperature beech wood chars with CO2, H2O and its mixture. *Fuel*, *299*, 2-11. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120523

Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Bach, L. S., Stelte, W., & Henriksen, U. B. (2014). Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *108*, 109-116. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.05.010

Suárez Hernández, L., Pérez Bayer, J. F., & Barrera Zapata, R. (2017). Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos. *Revista ION*, *30*(1), 57-71. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=342052520005

Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A. S., Mohd-Shahwahid, H. O., & Chin, L. (2017). Wood fuel consumption, institutional quality, and forest degradation in sub-Saharan Africa: Evidence from a dynamic panel framework. *Ecological Indicators*, *74*, 414-419. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.045

Tatàno, F., Barbadoro, L., Mangani, G., Pretelli, S., Tombari, L., & Mangani, F. (2009). Furniture wood wastes: Experimental property characterisation and burning tests. *Waste Management*, *29*(10), 2656-2665. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.012

Timsina, R., Thapa, R. K., Moldestad, B. M. E., Jaiswal, R., Bhattarai, A., Jecmenica, M., & Eikeland, M. S. (2023). Experimental evaluation of wood and grass pellets in a bubbling fluidized bed gasifier. *Energy Reports*, *9*, 4049-4058. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.041

Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis [10.1016/j.medcli.2010.01.015]. *Medicina Clínica*, *135*(11), 507-511. https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015

Vásquez, M., Vásquez-Ibarra, L., Musule, R., & Iriarte, A. (2022). Carbon footprint of wooden and plastic pallets: A quantification with different software tools. *Maderas. Ciencia y tecnología*, *24*. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-

221X2022000100445&nrm=iso

Vega, L., & Herrera, A. (2018). Evaluación del potencial energético de la madera residual urbana mediante gasificación. *Informador Técnico*, *82*(1), 26-40. https://doi.org/10.23850/22565035.888

Velázquez Martí, B. (2006). Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas*, *15*(1), 77-86. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54017105009

Wenjun, Z. (2007). Overview and forecast on forestry productions worldwide. *Environ Monit Assess*, *125*(1-3), 301-312. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9523-z

Xie, J., Zhu, K., Zhang, Z., Chen, X., Lin, Y., Hu, J., Xiong, Y., Zhang, Y., Huang, Z., & Huang, H. (2023). Chemical Looping Gasification of Wood Waste Using NiO-Modified Hematite as an Oxygen Carrier. *Energies*, *16*(4).

You, R., Zhu, N., Deng, X., Wang, J., & Liu, F. (2021). Variation in wood physical properties and effects of climate for different geographic sources of Chinese fir in subtropical area of China. *Scientific Reports*, *11*(1), 4664. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83500-w

Zhang, Y., Ma, H., Chen, D., & Zhou, J. (2021). Technical and Benefit Evaluation of Fruit-Wood Waste Gasification Heating Coproduction of an Activated Carbon System. *ACS Omega*, *6*(1), 633-641. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05150

Zhong, Z. W., Song, B., & Zaki, M. B. M. (2010). Life-cycle assessment of flash pyrolysis of wood waste. *Journal of Cleaner Production*, *18*(12), 1177-1183. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.017

ANEXOS 1. Marco teórico

Propiedades físicas de la madera

La madera se clasifica en especies de madera dura y blanda. Las maderas blandas incluyen pino, abeto, abeto, alerce y otras. Las maderas duras incluyen abedul, roble, haya, carpe, arce, fresno, álamo, tilo, sauce, especies frutales y otras. Las principales propiedades físicas de la madera incluyen: color, brillo, textura, macroestructura, olor, humedad, contracción, tensiones internas, hinchazón, agrietamiento, deformación, densidad, conductividad acústica - electro - térmica. El color, el brillo, la textura y la macroestructura determinan el aspecto de la madera. La madera de diferentes razas tiene un color diferente, desde blanco - álamo temblón, abeto hasta negro - ébano. Los taninos, la resina y los pigmentos, que se encuentran en las cavidades de las células, dan más colorido a la madera (You et al., 2021). Las principales características de la madera son:

Brillo de la madera: es la capacidad de reflejar el haz de luz de manera intencionada. Depende de la densidad de la madera, el tamaño y la ubicación de los rayos medulares, que reflejan los rayos de luz de manera puntiaguda, creando así el brillo en el aspecto radial. La madera de haya, arce, roble, olmo tienen el brillo más característico. El álamo temblón, el álamo y el tilo tienen una superficie mate debido a unos radios medulares muy estrechos y paredes celulares delgadas. La superficie brillante de la madera se mejora y conserva durante largos períodos de tiempo mediante la creación de revestimientos protectores y decorativos transparentes (Dias et al., 2020).

Textura: es un patrón peculiar formado por los rayos medulares, fibras y capas anuales de madera en diferentes contextos. La saturación de la textura está determinada por las características anatómicas de la estructura de las razas arbóreas y la dirección de la sección, y por el color de la madera temprana y tardía, el ondulado y la disposición de las fibras mezcladas (Alvis-Gordo et al., 2017).

La conductividad eléctrica de la madera se caracteriza por su resistencia al paso de la corriente eléctrica. Depende de la especie de madera, la temperatura, la humedad y la veta de la madera. La conductividad eléctrica de la madera seca es insignificante, lo que permite utilizarla como material aislante: enchufes e interruptores de toma de corriente. Con un aumento de la humedad del 0 al 30%, la resistencia eléctrica de la madera se reduce en millones de veces. La resistencia eléctrica de la madera a lo largo de la fibra es varias veces menor que a través de la fibra (You et al., 2021).

Conductividad térmica: es la capacidad del material para almacenar calor. La madera tiene baja conductividad térmica, ya que tiene muchos huecos llenos de aire. Por lo tanto, la conductividad térmica de la madera depende de su humedad: a menor humedad, menor conductividad térmica (Alvis-Gordo et al., 2017).

Densidad y gravedad específica: La densidad es el peso o la masa de una unidad de volumen de madera, y la gravedad específica es la relación entre la densidad de la madera y la del agua.

En el sistema métrico de medida, la densidad y la gravedad específica son numéricamente idénticas; por ejemplo, la densidad media de la madera de abeto de Douglas es de 0,45 gramos por cc, y su gravedad específica de 0,45, porque 1 cc de agua pesa 1 gramo. (Expresado como peso por unidad de volumen, 1 gramo por cc es aproximadamente 62,4 libras por pie cúbico). La determinación de la densidad de la madera es más difícil que la de otros materiales porque la madera es higroscópica, tanto su peso como su volumen están muy influenciados por el contenido de humedad (Dias et al., 2020).

Tipos de residuos madereros

La industria de la madera genera grandes cantidades de residuos durante las etapas de aserrado, cepillado, perforado y otros procesos de manufactura. Según Pandey (2022), estos residuos se pueden clasificar en:

Residuos gruesos: incluyen recortes, costaneros, ramas, corteza, entre otros. Representan entre el 60-70% de los residuos madereros. Tienen alto poder calorífico por lo que se pueden usar para generar energía térmica y eléctrica.

Residuos finos: son partículas y polvo generados durante el lijado y cepillado de la madera. Constituyen alrededor del 25-30% de los residuos. Se pueden emplear para fabricar tableros de partículas y obtener compuestos químicos mediante pirolisis.

Lodos: provienen del tratamiento de efluentes líquidos. Poseen alto contenido de lignina y se pueden usar para mejorar suelos o producir adhesivos naturales. Por último, las cortezas: son residuos fibrosos con aplicaciones para combustible, pañales absorbentes y cultivos de hongos comestibles.

Clasificación de la madera

la clasificación de la madera depende del tipo de árbol origen, sus propiedades físico-mecánicas, contenido de humedad, durabilidad, color y el uso al que se destine. Esto permite seleccionar la madera ideal para cada necesidad. Según Kırbaş and Çifci (2022),la madera se puede clasificar de la siguiente manera:

Por su origen: se distingue entre maderas duras y maderas blandas. Las maderas duras provienen de árboles de hoja caduca como el roble, cerezo, haya, etc. Son más densas y resistentes. Las maderas blandas proceden de coníferas como pino, abeto, cedro y son menos densas y más fáciles de trabajar.

Por su uso: la madera de sierra se utiliza en bruto para tablas, vigas, pilares. La madera para chapa se emplea en contrachapados y laminados. La madera para pasta celulósica es la destinada a producir papel y derivados.

Por su procesamiento: la madera maciza es la que se obtiene directamente del árbol, sin procesar. La madera laminada está compuesta por capas encoladas. Los tableros de madera están fabricados con virutas y fibras prensadas. La madera reconstituida se hace con residuos unidos mediante adhesivos.

Por su contenido de humedad: puede ser madera verde con más del 30% de humedad, madera seca al aire con 15-20% de humedad o madera secada en horno con menos del 15%. La madera también se clasifica, por su durabilidad: hay maderas muy durables por sus extractivos como el cedro rojo, otras medianamente durables y poco durables. Por último, por su color: existen maderas claras como el abeto, intermedias como el pino y oscuras como el ébano.

Tecnología para aprovechar los residuos madereros

Además de los tratamientos térmicos descritos la residuos también se pueden aprovechar mediante la producción de tableros de partículas y aglomerados, durante la elaboración de estos productos los residuos de madera, especialmente el aserrín y virutas, se aglutinan y unen mediante resinas y adhesivos para fabricar tableros de partículas y aglomerados utilizados en la construcción y fabricación de muebles (Rangel et al., 2017).

Otro método de aprovechamiento es la producción de pellets de madera, Los pellets de madera son pequeños cilindros comprimidos fabricados a partir de aserrín y otros residuos de madera. Se utilizan como combustible en estufas, calderas y sistemas de calefacción, brindando una opción más limpia y renovable que los combustibles tradicionales (Vásquez et al., 2022). Por último, los residuos madereros también se pueden emplear en la fabricación de papel y pulpa de celulosa, donde se separa la fibra de la madera para su posterior uso en la producción de diferentes tipos de papel y productos relacionados (Castillo-Tumaille & Espinoza-Espinoza, 2017).