



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera

TÍTULO

**“DESARROLLO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DE *Pinus* spp.,
PARA SU APLICACIÓN EN UN SECADOR HÍBRIDO SOLAR-
BIOMASA PARA EL SECADO DE MADERA”**

T É S I S

Para obtener el grado de
Doctor en Ciencias y Tecnología de la Madera

P R E S E N T A

M.C. MARIO MORALES MÁXIMO

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA QUIÑONES

CO-DIRECTOR EXTERNO

DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE

(ENES/UNAM MORELIA)

Morelia, Michoacán, Junio 2023.



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera

TÍTULO

**“DESARROLLO DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DE *Pinus* spp., PARA SU
APLICACIÓN EN UN SECADOR HÍBRIDO SOLAR-BIOMASA PARA EL
SECADO DE MADERA”**

T É S I S

Para obtener el grado de
Doctor en Ciencias y Tecnología de la Madera

P R E S E N T A

M.C. MARIO MORALES MÁXIMO

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA QUIÑONES

CO-DIRECTOR EXTERNO

DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE
(ENES/UNAM MORELIA)

SINODALES

Dr. David Raya González
Dr. José Cruz de León
Dr. Francisco Javier Castro Sánchez

Morelia, Michoacán, Junio 2023

AGRADECIMIENTOS

INSTITUCIONALES

El presente trabajo de investigación se realizó en el marco del proyecto del FSE SENER-CONACYT (CEMIE-Bio) 2014-246991 "Clúster de biocombustibles sólidos para la generación térmica y eléctrica". Se agradece el apoyo a la Comunidad Autónoma de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México; a cada uno de los artesanos encuestados por su disponibilidad de tiempo y espacio para poder cumplir con este trabajo de investigación. También se agradece a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán (UIIM) por el apoyo para realizar la estancia correspondiente de mi formación como doctorante y por haberme apoyado en el soporte técnico para el desarrollo de la experimentación para llevar a cabo este trabajo de investigación. Asimismo, a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme ser parte de sus estudiantes y por el apoyo incondicional tanto académico, de experimentación, y de asesoría para la culminación de este trabajo. A todos ellos muchas gracias por su apoyo otorgado para la culminación de esta tesis.

A MI DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones: Recuerdo que el primer día que entré a esta universidad, me llevé una gran impresión de usted, y sin conocerme, me brindó su apoyo y confianza para lograr este tercer objetivo en mi vida. Gracias por tenerme paciencia, confianza, brindarme su apoyo, creer en mí para la realización de esta investigación, en todo este tiempo que hemos trabajado juntos ha sido muy agradable, he aprendido muchas cosas que me han formado y ayudado a ser un mejor estudiante, considero que hemos pasado de una relación de alumno-asesor a de amigo a amigo y estoy seguro de que, en el futuro cercano de colega a colega, muchas gracias Profe por su acompañamiento, por sus enseñanzas, tanto académicas como personales, este logro también es de usted Profesor.

Dr. Carlos Alberto García Bustamante: Le agradezco mucho Prof. Por haber confiado en mí para llevar a cabo la continuidad de un proyecto que surgió en el año 2017 con el objetivo de mejorar las condiciones de trabajo de una comunidad rural, gracias por tenerme paciencia, confianza y sobre todo brindarme su amistad y ser parte de su equipo de trabajo en proyectos de transformación, desde lo local a lo global, y gracias por haberse fijado en mi comunidad Pichátaro para poder llevar a cabo sus proyectos de investigación. Gracias profe, por su apoyo, revisión y co-asesoría de este trabajo.

A MIS REVISORES DE MI EXAMEN PREDOCTORAL

Dra. Nancy Eloísa Rodríguez Olalde (FITECMA-UMSNH)
Dr. José Juan Alvarado Flores (FITECMA-UMSNH)
Dr. Artemio Carrillo Parra (ISIMA-UJED)

Gracias por compartir su experiencia y ser parte de mi formación académica durante mi proceso como estudiante.

A MIS LECTORES

Dr. David Raya González
Dr. José Cruz de León
Dr. Francisco Javier Castro Sánchez

Por sus excelentes observaciones y comentarios que hicieron que se fortaleciera esta investigación muchas gracias profesores.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

Gracias por seguir confiando en mi como estudiante y brindarme la oportunidad de seguir cursando mis estudios de doctorado, seguir formándome como profesionista y seguir cumpliendo mis metas. MUCHAS GRACIAS.....

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

Martha Máximo Melgoza y Mario Morales Sánchez, por su presencia, cariño, amor, y tenerme paciencia hasta este momento de mi vida, este logro es también de ustedes.

A MIS HERMANOS:

Neri. Por su paciencia, comprensión y apoyo.

Manuel y a Mariana, desde hace 16 años que llegaron a mi vida se han convertido más que unos hermanos, son la razón para seguir a delante en la vida.

A MIS ABUELOS:

Gloria Sánchez (Mamá Lola), gracias por tu amor más que una abuela (ya no alcanzate a ver a tu nieto en esta etapa, pero lo logré). David Morales Pascual (Papá Davi), donde quieran que se encuentren, este logro es también de ustedes.

A LAS UNIVERSIDADES:

DIA/UVAQ, Morelia. Agradezco a la Mtra. Claudia Denisse Amezcua Rodríguez, por su apoyo, paciencia, confianza y por permitirme ser parte en algún momento de su equipo de trabajo de la Escuela de Diseño de Interiores y Ambientación, por permitirme desarrollarme como profesionista. Muchas gracias por toda tu confianza Clau.

Asimismo, a todos mis amigos, compañeros de escuela y de trabajo que he conocido en el camino y me han motivado a ser una mejor persona y a buscar nuevos retos.

Mtra. Maricarmen Rodríguez (por su confianza en los retos de universidad), Niko, Adán, Martin Parra, Alexa de la Torre, Valeria Cruz Pulido y muchos, muchos más.

Por ultimo y no menos importante, a una persona que conocí hace muchos años en la licenciatura y tuve la oportunidad de ser su alumno, y quien diría que hoy nuestros caminos se cruzarían para ser grandes amigos, muchas gracias a ti; Luis Bernardo López Sosa, por todo tu apoyo, ideas, proyectos que hemos realizado juntos y en otros que me has invitado a colaborar. Tu trayectoria es un ejemplo de motivación para mí, y un maestro y un asesor más en este proyecto. Muchas gracias, amigo por todo tu apoyo en estos 7 años, este logro en parte es tuyo.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	V

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1.INTRODUCCIÓN	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.4. HIPÓTESIS.....	5

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESARROLLO SOSTENIBLE	6
2.2. CAMBIO CLIMÁTICO CAUSAS Y PROBLEMÁTICAS	10
2.3. LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE	12
2.4. LA BIOMASA.....	13
2.4.1. BIOMASA MADERABLE	18
2.4.2. CONSIDERACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA BIOMASA	20
2.5. BIOENERGÍA.....	20
2.5.1. LA BIOENERGÍA Y SU IMPORTANCIA.....	23
2.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOENERGÍA.....	25
2.6. USO ACTUAL DE LA ENERGÍA EN MÉXICO Y APLICACIONES DE LA BIOENERGÍA.....	26
2.6.1. LA BIOENERGÍA A NIVEL MUNDIAL.....	28
2.6.2. LA BIOENERGÍA NACIONAL	29
2.6.3. LA BIOENERGÍA A NIVEL LOCAL.....	30
2.7. ECOTECNOLOGÍAS	31
2.8. LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	33
2.8.1 BRIQUETAS	34
2.8.2 PELLETS	36
2.8.3. IMPORTANCIA DE LAS EVALUACIONES ECONÓMICAS DEL USO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	37
2.9. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	38
2.9.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	39

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

3.1. APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA EN EL SECADO DE MADERA	43
--	----

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. EL DIAGRAMA METODOLOGÍCO	46
4.2. EL CASO DE ESTUDIO	49
4.3. DIAGNÓSTICO DE NECESIDADES DE LOS RECURSOS MADERABLES	50
4.4. CUANTIFICACIÓN DEL RESIDUO MADERABLE Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO	50
4.5. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE MADERA Y GASTO ECONÓMICO	52
4.6. TRABAJO DE LABORATORIO	52
4.6.1. EL CONTENIDO DE HUMEDAD	53
4.6.2. GRANULOMETRÍA	53
4.6.3. DENSIDAD APARENTE	54
4.6.4. PODER CALORÍFICO	55
4.6.5. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS DEL RESIDUO MADERABLE	56
4.6.6. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIALES VOLÁTILES	56
4.6.7. CARBONO FIJO	57
4.7. ANÁLISIS QUÍMICO DEL RESIDUO MADERABLE DE <i>PINUS SPP.</i>	57
4.8. MICROANÁLISIS DE CENIZAS	58
4.9. ANÁLISIS ELEMENTAL	59
4.10. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	59
4.11. ANÁLISIS MULTICRITERIO	60
4.12. ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS	60
4.13. EVALUACIÓN DEL SECADOR HÍBRIDO SOLAR-BIOMASA	61
4.14. EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO CON ENERGÍA SOLAR	63
4.13.1. EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO CON BRIQUETAS	64

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. EL BOSQUE DE LA COMUNIDAD Y SU POTENCIAL BIOENERGÉTICO	69
5.2. CONSUMO DE MADERA Y GASTO ECONÓMICO REPRESENTATIVO	71
5.3. CONTENIDO DE HUMEDAD	72
5.4. GRANULOMETRÍA	73
5.5. DENSIDAD APARENTE	74
5.7. PODER CALORÍFICO	74
5.8. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS	75
5.9. CONTENIDO DE MATERIALES VOLÁTILES	76
5.10. CARBONO FIJO	77

5.11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE RESIDUO MADERABLE	78
5.12. MICROANÁLISIS DE CENIZAS	79
5.13. ANÁLISIS ELEMENTAL	81
5.14. ANÁLISIS MULTICRITERIO	83
5.15. ANÁLISIS TERMOGAVIMÉTRICO (TGA)	86
5.16. FABRICACIÓN DE LAS BRIQUETAS	87
5.17. CINÉTICA DE SECADO SOLAR.....	88
5.18. SIMULACIÓN TÉRMICA.....	89
5.19. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DENTRO DEL SECADOR	91
5.20. SECADO DE LA MADERA CON BRIQUETAS	93
5.21. SECADO DE MADERA HÍBRIDO (SOLAR Y BRIQUETAS).....	94
5.22. COMPARATIVO DE LOS TRES TIPOS DE SECADO	96
5.23. DISCUSIÓN DE LOS TIPOS DE SECADO	97
5.24. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y APLICACIÓN DE BRIQUETAS PARA EL SECADO DE MADERA	98

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.....	100
RECOMENDACIONES	104

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA	106
--------------------	-----

ANEXOS

ANEXOS	121
ANEXO 1.	121
ANEXO 2.	122
ANEXO 3.	124
ANEXO 4.	127

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Figura 2.1. El Diagrama del Desarrollo Sostenible (López et al., 2018).....	6
Figura 2.2. Acceso a la electricidad: proporción de la población con acceso en América Latina y el Caribe, (1990-2016) (En porcentajes).	9
Figura 2.3. Tipos de fuentes renovables de energía	13
Figura 2.4. Tipos de biomasa (https://www.cytcd.org/sites/default/files/presentacion_biometrans-web.pdf).....	17
Figura 2. 5. Diseño de una planta CCHP.....	19
Figura 2.6. Rutas para la obtención de energía a partir de residuos forestales. Elaboración propia (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018)	23
Figura 2.7. Ciclo de la biomasa	24
Figura 2.8. Producción de energía (SENER, 2021).....	27
Figura 2.9. Movimiento cronológico del concepto de Ecotecnología (Mejía Ávila, 2017)	31
Figura 2.10. Proceso de TTE	32
Figura 2.11. Tipos de biocombustibles sólidos (pellets y briquetas)	34
Figura 2.12. Corte transversal de las briquetas. Lote A: se observa mejor compactación del material y un acabado uniforme; Lote B: Se observan espacios vacíos en el interior, menor compactación y apariencia no uniforme.	35
Figura 2.13. Pellets de madera	36
Figura 2.14. Desarrollo en número de reportes publicados de responsabilidad corporativa que mencionan un ACV por año, del 2000 al 2015 (Hauschild, 2017)	39

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Figura 4.1. Marco metodológico	48
Figura 4.2. Comunidad objetivo San Francisco Pichátaro y su ubicación geográfica	49
Figura 4.3. El recurso forestal de la comunidad de Pichátaro	50
Figura 4.4. a) Distribución de los talleres para determinar los tipos de madera utilizada y el aserrín generado San Fco. Pichátaro 19° 34" N y 101° 40" O. b) Energía emitida en cada una de las ubicaciones del taller	51
Figura 4.5. Cuantificación de la materia para su posterior análisis	51
Figura 4.6. a) Muestras a analizar, b) Tamizado, c) Colocación de las muestras en la estufa de secado hasta peso constante, d) Peso de un gramo de la muestra y colarlo en la caja de Petri	53
Figura 4.7. Tamiz vibrante. Para este caso se detalló una serie de tamices de malla metálica de especificaciones y tamaños normalizados como los que se muestra en la Tabla 4.1	54
Figura 4.8. Determinación del peso de la muestra de residuo maderable	55
Figura 4.9. Calorímetro	55
Figura 4.10. a) Mufla, b) Colocación de las muestras en los crisoles, c) Calcinación de las muestras en la mufla, d) Obtención de las muestras con las cenizas.....	56
Figura 4.11. a) Colocación del crisol con la muestra en la mufla, b) Crisol con la muestra fuera de la mufla, c) Colocación del crisol en el desecador, d) Obtención de los materiales volátiles.....	57
Figura 4.12. (a) Mezcla de todos los materiales (b) Colocación de la mezcla en la máquina briqueteadora, (c) Obtención y secado de las briquetas	61
Figura 4.13. Arreglo experimental completo.....	63
Figura 4.14. Arreglo experimental del secador con la cámara termográfica.....	63

Figura 4.15. Muestreo de la madera a secar	64
Figura 4.16. Obtención del peso de las muestras y probetas.....	65
Figura 4.17. Báscula digital para obtener la prueba de secado.....	66
Figura 4.18. Apilado de madera e instalación de probetas (A,B,C,D)	66
Figura 4.19. Apilado de la madera (duela)	66
Figura 4.20. a) Instalación del ventilador, b) Instalación de la batería solar para el panel y el inversor, c) madera apilada, d) vista frontal de la madera apilada.	67
Figura 4.21. Briquetas utilizadas para la tanda de secado.....	68
Figura 4.22. Quemado de las briquetas en el boyler	68

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 5.1. Área arbolada en el año 1985 comprendiendo un 37% (3,488 ha) de área arbolada (6,031 ha) de área no arbolada.....	69
Figura 5.2. Área total forestal de la comunidad con superficie arbolada y no arbolada	70
Figura 5.3. Residuo más generado en la comunidad	70
Figura 5.4. Duelas utilizadas por 50 artesanos a la semana y el costo que representa esa utilización	72
Figura 5.5. Humedad de inicial de las muestras de aserrín (MA) y las muestras de viruta (MV)	73
Figura 5.6. Contenido de humedad final	73
Figura 5.7. Porcentaje del potencial de aprovechamiento para briquetas a) Material de aserrín, b) Material de viruta	74
Figura 5.8. Determinación del contenido de cenizas.....	76
Figura 5.9. Material volátil para aserrín y viruta (%).....	77
Figura 5.10. Formulación de indicadores con diferentes parámetros.....	87
Figura 5.11. Curvas TGA-DTG de <i>Pinus</i> spp. en atmósfera de argón y aire.....	87
Figura 5.12. a) Dimensiones de las briquetas producidas, b) vista isométrica de las briquetas producidas, c) 300 briquetas producidas	88
Figura 5.13. Secuela de secado solar.....	89
Figura 5.14. Velocidad del flujo de agua dentro del serpentín.....	90
Figura 5.15. a) Vista del fluido en forma lineal, b) Vista del fluido en dos curvaturas del tubo	90
Figura 5.16. a) Vista frontal del serpentín, b) Vista a detalle de la transferencia de temperatura en el tubo	91
Figura 5.17. Comportamiento térmico de la cámara de secado utilizando briquetas (prueba 1)	92
Figura 5.18 Comportamiento térmico de la cámara de secado utilizando briquetas (prueba 2)	92
Figura 5.19. Secado de la madera con briquetas	93
Figura 5.20. Secado de la madera con briquetas	94
Figura 5.21. Cinética de secado de madera híbrido (solar y briquetas).....	95
Figura 5.22. Comparación del secado de madera con los tres tipos (solar, briquetas e híbrido)	96

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1. Fuentes de origen de la biomasa con destino energético.....	15
Tabla 2.2. Mezcla para la realización de briquetas.....	30
Tabla 2.3. Valores obtenidos de las briquetas realizadas en San Juan Nuevo	30
Tabla 2.4. Biocombustibles sólidos derivados de la biomasa forestal	34

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 4.1. Número de malla establecido para la prueba.....	54
Tabla 4.2. Equipos utilizados para las pruebas de secado.....	61
Tabla 4.3. Pesos registrados de las muestras para el seguimiento del secado.....	65

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 5.1. Poder calorífico de las muestras de aserrín	75
Tabla 5.2. Poder calorífico de las muestras de viruta.....	75
Tabla 5.3. Carbono fijo de las muestras de <i>Pinus</i> spp. (%).....	77
Tabla 5. 4. Composición química de los principales componentes estructurales de la madera de <i>Pinus</i> spp. (%)	78
Tabla 5.5. Resultados del microanálisis de las cenizas de las muestras de biomasa (ppm) ND=no detectado.....	79
Tabla 5.6. Resultado del análisis elemental de las muestras de biomasa (%).....	82
Tabla 5.7. Parámetros e indicadores utilizados en el análisis multicriterio.....	783
Tabla 5.8. Valores de los indicadores.....	79
Tabla 5.9. Evaluación de los indicadores	82
Tabla 5.10. Valores normalizados para el análisis	82

RESUMEN

El presente trabajo es una investigación experimental y de campo sobre una forma metodológica de aprovechar el residuo maderable forestal de *Pinus* spp., que se genera en la comunidad de San Francisco Pichátaro en el estado de Michoacán, México. La investigación se llevó a cabo en tres etapas: la primera fue la evaluación y diagnóstico del recurso forestal y del residuo maderable que se generara en la comunidad, así como la caracterización física del residuo identificado. La segunda etapa se realizó el análisis proximal y el análisis químico del residuo de *Pinus* spp. En la tercera etapa se realizó la evaluación del secado de madera en tres fases (secado solar, secado con briquetas y secado híbrido). Los resultados más relevantes obtenidos en esta investigación muestran que la comunidad genera aproximadamente 2268 kg de aserrín y 5418 kg de viruta por semana, y el potencial energético estimado por año tanto para el aserrín de 1,94 PJ, la viruta de 4,65 PJ. Según el tamaño de partícula observado, el residuo de madera se puede utilizar para generar briquetas. Otros resultados promedio en aserrín y (virutas) son los siguientes: humedad inicial 15,3% (16,8%), densidad aparente 169,23 kg/m³ (49,25 kg/m³), ceniza 0,43% (0,42%), materia volátil 84,9% (83,60 %), carbón fijo 14,65% (15,96%), hemicelulosas 12,89% (10,68%), celulosa 52,68% (52,82%), lignina 26,73% (25,98%), extractivos 7,69% (10,51%), además del poder calorífico 17,6 MJ/kg (17,9 MJ/kg). Los principales elementos químicos en la ceniza fueron Al, K, Fe, Ca, P, Na y Mg. En cuanto a la reducción del consumo de leña por aprovechamiento de residuos con fines energéticos, se mitigarían unas 350 Tn/año, lo que produciría una reducción de emisiones a nivel comunitario de más de 76 Tn CO₂/año. En lo que respecta al secado de madera de las tres fases, el secado híbrido resulta el mejor secado en la madera ya que este análisis establecido la humedad final de la madera en 14.43% de humedad en un tiempo de 21 días. Por último, esta propuesta representa una alternativa energética sostenible en términos ambientales, económicos y sociales, para la misma comunidad.

Palabras clave: Recurso forestal, Biomasa, Briqueta, Potencial energético, Secado de madera.

ABSTRACT

The present work is an experimental and field investigation on a methodological way of using the timber forest residue of *Pinus* spp., which is generated in the community of San Francisco Pichátaro in the state of Michoacán, Mexico. The research was carried out in three stages: the evaluation and diagnosis of the forest resource and the timber residue generated in the community and the physical characterization of the residue identified. The second stage carried out the proximal and chemical analysis of the residue of *Pinus* spp. In the third stage, the drying of the wood was evaluated in three phases (solar drying, drying with briquettes and hybrid drying). The most relevant results obtained in this investigation show that the community generates approximately 2,268 kg of sawdust and 5,418 kg of shavings per week, and the estimated energy potential per year for both sawdust of 1.94 PJ and shavings of 4.65 P.J. Depending on the observed particle size, the wood residue can generate briquettes. Other average results in sawdust and (chips) are the following: initial humidity 15.3% (16.8%), bulk density 169.23 kg/m³ (49.25 kg/m³), ash 0.43% (0.42%), volatile matter 84.9% (83.60%), fixed carbon 14.65% (15.96%), hemicelluloses 12.89% (10.68%), cellulose 52.68% (52.82%), lignin 26.73% (25.98%), extractives 7.69% (10.51%), in addition to calorific value 17.6 MJ/kg (17.9 MJ/kg). The main chemical elements in the ash were Al, K, Fe, Ca, P, Na and Mg. Regarding the reduction in the consumption of firewood due to the use of waste for energy purposes, some 350 Tn/year would be reduced, which would mean a reduction in emissions at the community level of more than 76 Tn CO₂/year. Regarding the drying of the wood in the three phases, the hybrid drying results in the best drying of the wood since this analysis established the final humidity of the wood at 14.43% humidity in 21 days. Finally, this proposal represents a sustainable energy alternative for the same community in environmental, economic and social terms.

Keywords: Forest resource, Biomass, Briquette, Energy potential, Wood drying.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1.Introducción

Las energías de fuentes alternativas como la bioenergía y la solar, actualmente resultan ser de las fuentes de energía más investigadas y utilizadas a nivel mundial, ya que ambas constituyen una innovación técnica muy importante para frenar el proceso de deforestación que amenaza la sostenibilidad y la biodiversidad en el planeta (Vera et al., 2019).

En respuesta a dicha problemática global, se busca generar un suministro energético proveniente de fuentes renovables (Energy Information Administration (EIA), 2022). A grandes rasgos, se pueden considerar como fuentes de energía renovable a la solar (fototérmica), eólica, bioenergía, geotérmica, hidráulica y maremotriz. Actualmente dichas fuentes representan el 13.7% del consumo primario, 19.3% del consumo de energía final y 23.1% de la electricidad generada a escala global (Carrington & Stephenson, 2018)

Es por ello por lo que las fuentes de energía renovable con mayor potencial a nivel nacional son la energía solar y la bioenergía. Estudios indican que la sostenibilidad y conveniencia de la bioenergía es clave en la matriz energética actual, y su desarrollo y empleo aumentará en las próximas décadas (Reid et al., 2020). La bioenergía es un tipo de energía renovable que proviene de la biomasa, esta tiene como ventaja su flexibilidad para la producción de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En México la bioenergía representa el 4.7% de la energía primaria (363.61 PJ), principalmente por el aprovechamiento de leña y bagazo de caña de azúcar (SENER, 2019). Según estimaciones el potencial elevado de la bioenergía, se encuentra situado entre 2.228 y 3.459 PJ anuales, lo que podría satisfacer cerca de la mitad del consumo energético primario de nuestro país (Núñez-Retana et al., 2019).

La biomasa podría ocupar un lugar importante con la finalidad de mitigar los impactos ambientales generados de las actividades humanas y productivas, que implican el desarrollo de buenas prácticas ambientales, en donde, la implementación o aplicación de tecnologías limpias son fundamentales para garantizar la sustentabilidad del medio ambiente (Ferrandez-Villena et al., 2019).

Datos reportados en la literatura científica muestran resultados donde el principio de captar radiación solar a través de un panel solar, puede ser aplicado para el secado de diferentes productos agrícolas (Vera et al., 2019). Desde hace varias décadas se ha venido investigando el uso de la energía solar para el secado de la madera (Pirasteh et al., 2014). Muchos de ellos buscan, que, mediante un colector plano, esta energía que llega a ese colector se genere en energía por convección, la energía de radiación se convierta en energía térmica (Simo-Tagne et al., 2020). Esta energía puede llegar alcanzar temperaturas que oscilan los 60°C en zonas tropicales. Los diseños de las cámaras para el secado solar de madera varían según las diferentes latitudes, en las cuales se deseen implementar estos tipos de dispositivos (López-Sosa et al., 2019). En comparación con el secado al aire libre, se ha demostrado que el secado solar reduce el tiempo de secado entre dos y cinco veces y permite obtener contenidos de humedad final por debajo de la humedad de equilibrio del lugar. Respecto al secado artificial convencional, las instalaciones son mucho más baratas y los costos de secado se reducen considerablemente, principalmente en zonas tropicales con una radiación solar adecuada para secar madera. Este tipo de estufas presentan una alternativa económica y técnica para las pequeñas industrias que transforman la madera en productos finales, principalmente mobiliario (Meza Lopez et al., 2018). En lo que corresponde al secado de madera con la ayuda de biocombustibles sólidos, resulta ser un antecedente poco utilizado para estos dispositivos alternos por la escasez de información, producción, manejo y caracterización de materiales para la producción de biocombustibles, y aprovecharlos para el secado de madera de manera no convencional, su aprovechamiento y uso se implementa para el sector residencial en las diferentes actividades domésticas (Morales-Máximo et al., 2020).

El secado de la madera, además de ser una actividad fundamental en la industria de la madera, tiene también una gran importancia en todo el tipo de mobiliario, ya que derivado de la madera la calidad del mueble y el tiempo de vida útil del mismo dependerá mucho del tipo de secado y acondicionamiento de la humedad del mismo (Simo-Tagne et al., 2018).

Por ello, la presente investigación está dirigida a determinar la factibilidad de aprovechar los residuos maderables (aserrín y viruta) de pino, con la finalidad de producir biocombustible sólido (sin el uso de aditivos o componentes tóxicos), que se genere en la misma Comunidad de San Francisco Pichátaro, en el estado de Michoacán, México. Esto sería una fuente de energía alternativa viable y sostenible ambientalmente, y su implementación y evaluación en un dispositivo de uso final como lo es un secador híbrido, como posible alternativa de secado con la utilización de los propios recursos energéticos que se presentan en dicha comunidad y el posible beneficio ambiental y económico que se puede generar con esta investigación.

1.2. Justificación

La situación ambiental y socio-económica actual ha orientado a los distintos sectores de la sociedad a la búsqueda de fuentes renovables de energía costo-efectivas, eficientes y sustentables como es el caso de la energía solar y la bioenergía (Healy & Barry, 2017). En México el secado de madera procesa poco volumen, por métodos artificiales o estufas convencionales, debido principalmente a los altos costos de inversión, lo cual limita que muchos empresarios del sector maderero, desde el pequeño, mediano y grande productor industrial puedan acondicionar su madera a una humedad final estable (Solís et al., 2003).

La Meseta Purépecha del estado de Michoacán, es una zona con un alto índice de aprovechamiento forestal y maderable sobre todo en especie del género *Pinus*, para diferentes actividades de la vida cotidiana de la población (Correa-Méndez et al., 2018). Tal es el caso de la Comunidad de San Francisco Pichátaro, cuya actividad economía principal está basada en la industria maderera con la fabricación de muebles para diferentes usos, por lo que cuenta con diferentes carpinterías. Desafortunadamente el valor agregado económico no es muy bien remunerado para los diferentes productos derivados de la madera. Ya que el uso de este recurso con un contenido de humedad alto no es apropiado para la elaboración de muebles que posteriormente sufren defectos físicos y que para su comercialización resulta ser malo; este problema se presenta en la etapa de fabricación del mueble y durante la

vida en servicio del producto (Morales-Máximo et al., 2018). Los secadores solares para madera son una alternativa económica a los hornos convencionales eléctricos, especialmente para operaciones pequeñas, como lo es la pequeña industria artesanal. Es por ello que la presente investigación tiene como conveniencia el estudio del rubro de la madera con un proceso de secado eficiente para que haya una industrialización, incrementando su atractivo comercial para los pequeños productores artesanales de la comunidad y así ir constituyendo en una opción de actividad económica sostenible, bajo un manejo adecuado de los bosques.

Con el fin de contribuir a mejorar este problema, el presente trabajo está basado en la evaluación energética de un dispositivo de secador híbrido para madera considerado materiales que propicien aislamiento térmico para que la cámara de secado sea lo más eficiente posible, además incorporando un colector solar con superficie absorbadora de bajo costo, así como la colocación de un radiador térmico alimentado con biocombustibles sólidos. Esta tecnología se sugiere para su construcción e implementación en comunidades donde la principal actividad económica sea el aprovechamiento de madera para la fabricación de muebles, con la finalidad de que sea una ecotecnia fácil de replicar, económica, de bajo impacto ambiental y lo más eficiente posible, que además genere valor agregado en la cadena de aprovechamiento del recurso maderable.

Adicionalmente, se pretende evaluar la capacidad energética del secador con la operación en la combustión de residuos de biomasa forestal, de tal manera que este sistema híbrido puede funcionar durante el día o la noche, aprovechando fuentes renovables de energía, como lo es también la biomasa, que se desprende del residuo maderable que se genera en los mismos talleres de la comunidad muestra, diariamente se producen grandes cantidades de residuos de aserrín y viruta por día, que actualmente no tiene ningún uso o fin comercial; la viruta y el aserrín por no tener un valor agregado muchas veces genera problemas de almacenamiento (Reyes et al., 2016). El aprovechamiento de estos residuos potencializará el uso de los biocombustibles sólidos densificados, al mismo tiempo que pueden ser utilizados en tareas de secado, que a su vez impulsarían el mercado local al elevar la calidad

del mueble, porque se establecería un contenido de humedad de acuerdo a normas estandarizadas. Esta investigación integra aspectos multidisciplinarios que van desde la oferta de residuos maderables hasta su aplicación en dispositivos de uso final; buscando satisfacer las necesidades del usuario final.

1.3. Objetivo general

Caracterizar un secador solar como dispositivo de uso final para secar madera, con la utilización de energía térmica derivada del proceso de producción de biocombustibles sólidos a partir de residuos maderables (*Pinus* spp.), considerando parámetros energéticos, económicos y socio-ambientales, antes, durante y después de su implementación en la Comunidad Indígena de San Francisco Pichátaro, Michoacán.

1.3.1. Objetivos específicos

1. Cuantificar los residuos maderables de la comunidad de *Pinus* spp.
2. Conocer las características físicas de la biomasa residual.
3. Conocer las propiedades químicas de los residuos maderables.
4. Producir briquetas para su aprovechamiento en el secador de madera.
5. Estimar los parámetros térmicos y cinética de secado, de la madera (duela) con secado solar, secado con briquetas y secado híbrido (combinado)
6. Evaluar la eficiencia energética del secador, con los parámetros óptimos.

1.4. Hipótesis

Al caracterizar y procesar los residuos maderables (*Pinus* spp.) en biocombustibles sólidos densificados y al utilizar la energía solar presente en la comunidad, se aprovecharán estas dos fuentes de energía renovable como un proceso para el funcionamiento de un secador solar híbrido como dispositivo de uso final, para realizar un proceso de secado de madera en menor tiempo al convencional, al mismo tiempo que se disminuye los consumos energéticos y se aprovecha un residuo biomásico generado por la misma comunidad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Desarrollo Sostenible

Desde el año 1976 distintas fuentes han definido el término de desarrollo sostenible, por ejemplo, se puede encontrar en el informe “The World Council of Churches” la manifestación más temprana del concepto; por otro lado, The World Conservation Strategy de 1980, ha sido considerado como el primer documento en dar una definición del término. También se encuentra el Informe de Brundtland (1987), por su lado, afirma que el término desarrollo sostenible es “científicamente inconstruible; culturalmente desorientador; y políticamente, engañoso”. Si bien el desarrollo sostenible prevalece como un concepto desconcertante, posee capacidad de acción que se manifiesta en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con sus metas a conseguir al año 2030, además de cumplir con tres componentes esenciales, el social, el económico y el ambiental como se muestra en la Figura 2.1 de López et al. (2018). La literatura disponible deja en claro que los países en desarrollo no deben adoptar el modelo de crecimiento de los países desarrollados, dado su evidente fracaso en términos de desarrollo sostenible. Muestra de ello es el principio 39 de la Declaración de Río, que cita *“No hay solidaridad entre generaciones si no la hay dentro de la misma generación”*. Es por eso que, a la hora de tratar el desarrollo sostenible con respecto a los países en desarrollo, autores como el economista Sergio Buarque lo define como “un proceso cualitativo y cuantitativo de cambio social que compatibiliza, en el espacio y en el tiempo, el crecimiento económico, la conservación ambiental y la equidad social” (Fandiño et al., 2017).



Figura 2.1. El Diagrama del Desarrollo Sostenible (López et al., 2018).

En respuesta a la petición de la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) de “confeccionar una agenda fuerte de desarrollo post-2015, que se construirá sobre las bases de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), y que completará el trabajo inacabado y responderá a los nuevos desafíos”, su Secretario General en diciembre de 2014 presentó un informe titulado “El Camino hacia la Dignidad para 2030”, en el que propuso una agenda universal de desarrollo sostenible basada en derechos de las personas y el planeta, enumerando los objetivos y los medios necesarios para alcanzarlos, como financiación, tecnología y mejora de capacidades. Casi de forma paralela, desde enero de 2013 se formó el Grupo de Trabajo Abierto (GTA) sobre Desarrollo Sostenible, quien para junio de 2014 elaboró un “borrador cero” con 17 objetivos y 169 metas, pero sin contemplar los indicadores; un mes más tarde, dicha propuesta fue asumida por la Asamblea General como punto de partida para las negociaciones. Gracias al respaldo de los países en desarrollo (G7), y otros Estados miembros, se frenaron las pretensiones de algunos países avanzados de simplificar y reducir la ambiciosa propuesta en negociaciones posteriores. En esa etapa, sí se hizo énfasis en el seguimiento y evaluación de los progresos a nivel global, nacional y regional. Finalmente, en septiembre de 2015 la Asamblea General cerró el proceso al adoptar la Resolución Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Sanahuja & Vázquez, 2017).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la 70° Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) el 25 de septiembre de 2015, con el respaldo de 150 Jefes de Estado y de Gobierno y de los 193 miembros de la ONU, son, en gran parte, una recogida de anteriores acuerdos internacionales en los que se buscaba acabar con el hambre, reducir la pobreza, alcanzar la educación básica universal o destinar el 0.7% al desarrollo de los países más pobres, como lo sostenía los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). La viabilidad de los indicadores aprobados muestra que, junto a problemas muy serios, se encuentra buena parte de las 169 metas como idealistas y visionarias, dando lugar a que diferentes instituciones científicas han criticado que numerosos objetivos son pura

retórica. Diversos estudios que se han realizado en torno a los ODS permiten identificar algunos elementos críticos en su aplicación, tales como los compromisos precisos que se requieren por parte de los Gobiernos, el conocimiento científico que se generaría con dicha aplicación, la falta de datos e indicadores en muchos países, y la delimitación de responsabilidades económicas, políticas y técnicas concisas (Gomez Gil, 2016).

El objetivo 7 de los ODS referente a garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos, se deriva de un amplio abanico de necesidades que pobremente se han cubierto; por ejemplo, para prevenir la mayoría de las Enfermedades de Transmisión Alimentaria (ETA), la energía juega un papel crucial en la preparación, refrigeración y cocción de alimentos. Se requieren sistemas caloríficos limpios que lleven a los alimentos a su plena cocción, y tecnologías refrigerantes para ralentizar el crecimiento bacteriano (Messina & Contreras Lisperguer, 2019). Adicional, se reclaman mayores cuotas de energía renovable, mejoras de eficiencia en el uso de energía, y la transferencia de la tecnología necesaria a los Países Menos Adelantados (PMA) (Sanahuja & Vázquez, 2017). El acceso a servicios eléctricos a nivel urbano en América Latina y el Caribe, muestra un déficit de alrededor de un 0.5%. A nivel rural se evidencia un déficit de 5.6% en 2016 (Figura 2.2) (Jouravlev & Matus, 2020). OJO: no se si sea formato, pero Figura 2.2..... aparece en siguiente página, tal vez hacer más chica la figura...

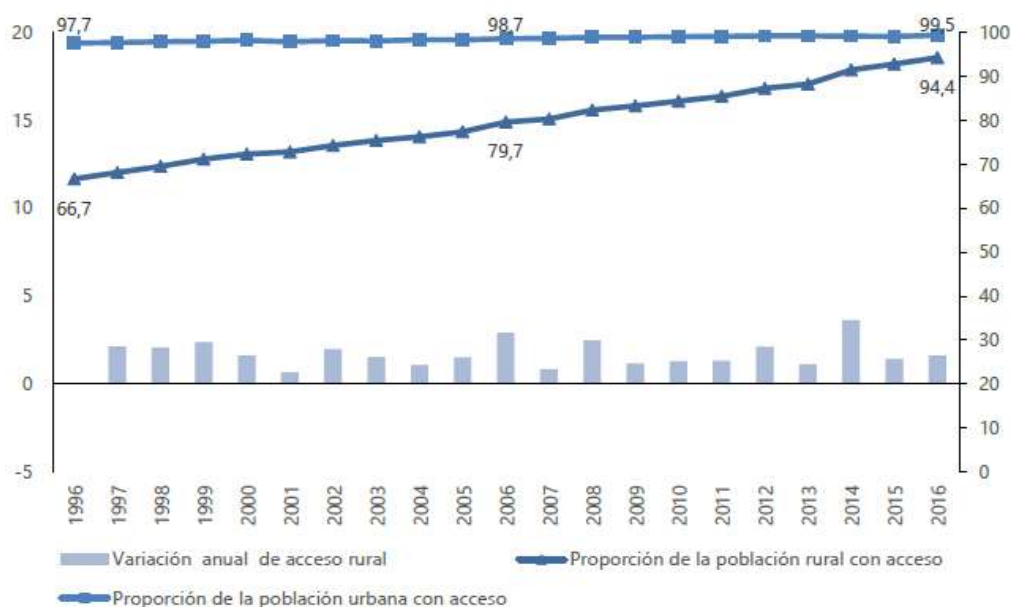


Figura 2.2. Acceso a la electricidad: proporción de la población con acceso en América Latina y el Caribe, (1990-2016) (En porcentajes).

En el mismo contexto de desarrollo sostenible, es prioritario hablar de la educación ambiental; organismos y conferencias internacionales han exhortado a los educadores a formar ciudadanos y ciudadanas con los conocimientos y competencias necesarias para tener una visión clara de la problemática actual a la que se enfrentan, en todas sus formas, con el objetivo de que sean capaces de analizar, reflexionar, concienciar, y tomar decisiones fundamentadas. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), es necesario para la educación ambiental, incorporar en los procesos pedagógicos temas fundamentales del desarrollo sostenible como el cambio climático, la reducción del riesgo de desastres, la pobreza, la biodiversidad y el consumo sostenible (Sierra et al., 2016).

Tocante a la desigualdad como menciona Cordera Campos (2017) critica el sistema económico moderno, argumentando que la desigualdad se vive y se reproduce en las raíces de dicho sistema, en el que el capitalismo es un mecanismo contradictorio e inestable que, si continua, puede ser implacablemente autodestructivo y llevar al mundo a una circunstancia límite. Para que México asuma y cumpla los ODS firmados, podría extender las cubiertas de salud y educación, reducir el número de pobres mediante una estrategia de inversión productiva pública, activar el

mercado interno, reducir la tasa de desempleo que afecta a jóvenes y adultos jóvenes que, ante la imposibilidad de entrar al mercado laboral, optan por la informalidad, la emigración o, en el peor de los casos, la informalidad criminal organizada.

En cuanto al balance de crecimiento económico y medio ambiente, las opiniones se han triangulado; están los que apoyan el decrecimiento, los del crecimiento verde y los agnósticos. Los primeros pronostican un límite de la capacidad del planeta para soportar las actividades humanas; proclaman “vivir con menos”, es decir, crecer teniendo en cuenta la naturaleza, luego de ajustar la economía a una escala que contemple el impacto ambiental. Los segundos se basan en la curva ambiental de Kuznets, según la cual la relación entre emisiones y producción tienen la forma de una U invertida, por lo que a partir de cierto ingreso per cápita se reducen las emisiones debido a un cambio en los consumidores que ya sea porque son más ricos o porque son más conscientes reclaman políticas ambientales a los gobiernos. Por último, los agnósticos, no es que estén en contra del crecimiento económico, sino en contra del crecimiento económico que no considere su sostenibilidad ambiental y social. Un ejemplo que usan para ilustrar que el crecimiento no es el fin, es la India, donde su PIB ha aumentado pero sus estándares de desarrollo humano como la esperanza de vida, salud, educación, etcétera, siguen siendo bajos (Conte Grand & D’Elia, 2017).

2.2. Cambio climático causas y problemáticas

El cambio climático es la modificación de los patrones del clima, el cual es un problema ambientalmente grave debido a la afectación en la biodiversidad. Los impactos en los sistemas naturales y humanos serán cada vez más severos a medida que aumente su magnitud. Esto es a causa de la sobre explotación de recursos, así como mal aprovechamiento de estos, por ende es necesario aprovechar todos los recursos energéticos de manera óptima, en el caso de la biomasa resulta ser una fuente orgánica capaz de ofrecer el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de combustibles fósiles, así como el

consumo de gas LP para calefacción y cocción, de esta manera disminuir el agravamiento del cambio climático (Arneth et al., 2020).

Durante las últimas décadas o siglos, las modificaciones de los ecosistemas para extracción de recursos energéticos, con el intensivo uso de la tierra, cambio de uso de suelo, extracción de agua, deforestación y extracción de madera y extracción de organismos marinos ha dominado la pérdida de la biodiversidad y el deterioro de los ecosistemas, debido a impactos causados por el hombre debido a su ausencia de políticas y no tener cambios de consumo (Patiño Martínez, 2014).

Se prevé que la expansión agrícola acelere aún más la extinción de especies, mientras que la producción pesquera mundial (captura y acuicultura) aumente en un 18% entre 2016 y 2030. Además de la presión de la explotación directa, los impactos perjudiciales de múltiples fuentes de contaminación también son perjudiciales para la biodiversidad. El continuo crecimiento de la población humana y el aumento del consumo per cápita plantean serias preocupaciones sobre la aceleración de la sobreexplotación y contaminación de los ecosistemas. Impactos observados del cambio climático y el aumento de la temperatura, concentraciones de CO₂ en la biodiversidad, calidad del hábitat, interacciones bióticas, y la fisiología del organismo plantean preocupaciones sobre la aceleración la pérdida general de diversidad funcional y servicios de los ecosistemas. La gravedad de los impactos futuros aumentará con la magnitud del cambio climático, potencialmente por las grandes emisiones de gases de efecto invernadero, estas preocupaciones sustentan la importancia del objetivo del acuerdo de París (IPCC, 2014), para limitar el cambio climático global a menos de 2°C por encima de las temperaturas preindustriales y continuar los esfuerzos para limitarlo a 1.5°C. Se requiere urgentemente evidencia para informar la gestión adecuada de los ecosistemas naturales en respuesta al cambio climático, tanto para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para la mitigación del cambio climático (Pearce-Higgins et al., 2022)

2.3. Las fuentes de energía renovable

El uso y aprovechamiento de fuentes renovables de energía en los últimos años ha generado una tendencia que a su vez busca mejorar las prácticas de gestión de residuos y generación de energía (Ferrandez-Villena et al., 2019).

Actualmente la matriz energética global depende de los combustibles fósiles. Existen acciones y compromisos de diversos países para promover la transición energética hacia las fuentes renovables (Shuma & Madyira, 2017).

La transición energética, explora las características técnicas y económicas que puedan acelerar esta misma hacia el 2050, utilizando nuevos conjuntos de datos para energías renovables (Gielen et al., 2019).

El análisis indica que la eficiencia energética y las tecnologías de energía renovable son los elementos centrales de esa transición, y sus sinergias también son importantes. La economía favorable, los recursos ubicuos, la tecnología escalable y los importantes beneficios socioeconómicos apuntalan tal transición (Modi et al., 2020).

La energía renovable puede abastecer dos tercios de la demanda total de energía global y contribuir al grueso de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que se necesita entre ahora y 2050 para limitar el promedio global el aumento de la temperatura de la superficie por debajo de 2 °C (Gielen et al., 2019). Sin duda alguna las energías renovables son un recurso asequible, la cual se produce energía limpia, es decir no emite enormes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI), se obtiene de fuentes naturales estas son más abundantes y capaces de regenerarse a una mayor velocidad (Figura 2.3). Existen diferentes tipos de energías renovables como son la solar, eólica, biomasa, entre otras.



Figura 2.3. Tipos de fuentes renovables de energía
(<https://economipedia.com/definiciones/energia-renovable.html>)

El acceso a energía es una necesidad, varios estudios han investigado la percepción y el nivel de conciencia de las energías renovables entre varios grupos de personas en todo el mundo. Hay mucha más conciencia sobre el cambio climático que en el pasado y, en los últimos años, se ha invertido un alto nivel en el avance de las tecnologías de energía renovable (Harjanne & Korhonen, 2019). Las Naciones Unidas (ONU) han llegado a hacer de la lucha contra el cambio climático una de sus principales prioridades y han invertido mucho en ello. Esto es evidente en el acuerdo de París de la ONU de 2015, donde los países miembros de la ONU acordaron reducir las emisiones de carbono para disminuir el aumento de la temperatura global (Hansen et al., 2019).

2.4. La biomasa

La biomasa es materia orgánica no fosilizada, originada en un proceso biológico espontáneo o provocado; tiene múltiples usos, ya que es la base de la alimentación

del hombre, y se utiliza como materia prima de la industria farmacéutica, papelera, cosmética, maderera, textil, o ciertos elementos de la construcción. Es una fuente de energía renovable con capacidad de transformarse en combustibles llamados biocombustibles. En este punto, se debe recalcar que estos dos últimos no son lo mismo, puesto que los biocombustibles son productos finales listos para comercializarse en el mercado energético, generados en la transformación microbiológica, física o química de la biomasa. Lógicamente, la aplicación directa de estos biocombustibles es la combustión, lo que cambia es el objetivo de dicha combustión, a partir de la cual se obtiene calor y, posteriormente este puede ser transformado en energía eléctrica o mecánica principalmente (Nska et al., 2020).

Las fuentes de biomasa incluyen desechos de madera, cultivos energéticos, cultivos agrícolas y sus desechos, plantas acuáticas, desechos municipales y animales y se consideran fuentes potenciales para combustibles y materias primas químicas. Además de la producción de bioetanol y biodiesel (biocombustibles de primera generación), la biomasa también es de interés para la producción de bioaceites a través de la pirólisis de biomasa lignocelulósica. Cualquier biomasa se compone de carbono elemental (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O). El principal componente es el carbono que proviene de CO_2 atmosférico que las plantas obtienen durante la fotosíntesis, convirtiéndose en parte de la materia vegetal. Generalmente, el contenido de carbono del combustible se estima mediante la composición de lignina, celulosa y hemicelulosa. Durante la combustión, el hidrógeno se convierte en H_2O , contribuyendo significativamente al poder calorífico general. Por otro lado, la presencia de nitrógeno es importante para la degradación en procesos bioquímicos como la digestión o la fermentación. En el caso del azufre, la alta tasa de crecimiento de los cultivos herbáceos, significan que, en la biomasa vegetal, la concentración de azufre es típicamente mayor que en la biomasa leñosa. Por último, el oxígeno, su contenido controla el poder calorífico del biocrudo que se obtiene mediante cualquier técnica de procesamiento. Cabe señalar que el oxígeno no se mide directamente, sino que se resta de 100 las concentraciones de los demás elementos (C, H, N, S) y del contenido de cenizas

del combustible seco (Gollakota et al., 2018). La Tabla 2.1 muestra las diferentes fuentes de biomasa para fines energéticos (Gollakota et al., 2018).

Tabla 2.1. Fuentes de origen de la biomasa con destino energético

Cultivos energéticos	Herbáceos	Cardo, sorgo, miscanto, girasol, soja, maíz, trigo, cebada remolacha, especies C4 agrícolas.
Restos y residuos	Leñosos	Chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias y especies C4 forestales.
	Restos de cultivos agrícolas	Herbáceos: paja, restos de cereales, restos de cultivos hortícolas.
		Leñosos: poda o eliminación de plantaciones de frutas de hueso y pepita, olivo, vid, cítricos, etc.
	Restos de operaciones silvícolas	Cortas finales, podas, claras, clareos, apertura de vías y pistas forestales, limpieza de monte para prevención de incendios, catástrofes forestales (incendios)
	Restos de la industria agroalimentaria	Piel de frutos (cítricos), cascaras (almendra, cacahuate...), huesos (aceituna), pulpa en industria de zumo, etc.
	Restos de las explotaciones ganaderas	Purines, cama animal, animales fallecidos
	Productos o restos marinos	Algas, conchas, etc.

	Actividades humanas	Residuos alimenticios, papel.
--	---------------------	-------------------------------

Para hacer un balance del carbono biológicamente secuestrado, modelar los ciclos biogeoquímicos y comprender la evolución histórica de la biomasa, Bar-On et al., (2018) argumentan que es fundamental hacer una descripción cuantitativa de la distribución de la misma. La suma de la biomasa de todos los taxones de la Tierra es ≈ 550 Gt C, de las cuales el $\approx 80\%$ (≈ 450 Gt C) son plantas dominadas por plantas terrestres (embrionarias). Es segundo componente principal de la biomasa son las bacterias (≈ 70 Gt C) que constituye el $\approx 15\%$ de la biomasa mundial. Otros grupos en orden descendente, son los hongos, las arqueas, los protistas, los animales y los virus, que representan el $<10\%$ restante. La actividad humana contribuyó a la extinción de la mega fauna cuaternaria, que se llevó alrededor de la mitad de las especies de mamíferos terrestres grandes (>40 kg) (Bar-On et al., 2018).

La biomasa representa un abundante recurso renovable y orgánico que puede derivarse de distintos tipos (Figura 2.4), es una de las primeras fuentes de energía de la humanidad, particularmente en las áreas rurales donde a menudo es la única fuente accesible y asequible, la generación de energía a partir de materiales de biomasa ofrece el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de combustibles fósiles. También puede garantizar la seguridad energética y abordar los problemas medioambientales, y contribuye a su gestión eficiente y al desarrollo económico de las zonas rurales (Kpalo et al., 2020).

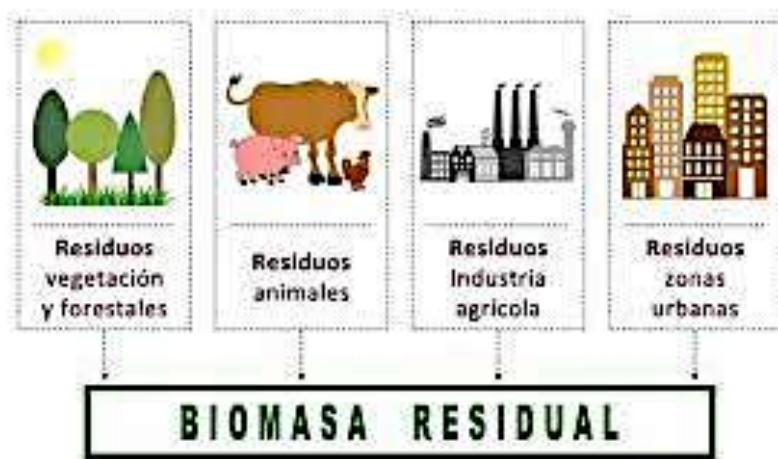


Figura 2.4. Tipos de biomasa

https://www.cyted.org/sites/default/files/presentacion_biometrans-web.pdf

La biomasa como biocombustible sólido puede ser madera, astillas de madera, residuos agrícolas, material vegetal y de algas, y la fracción orgánica de residuos sólidos municipales. Estas materias primas ofrecen la ventaja de ser renovables y eliminar los desechos en lugar de principalmente, dependiendo de los combustibles fósiles. La bioenergía en los países en desarrollo ha sido tradicionalmente utilizada en aplicaciones de cocina y calefacción, lo que representa el 6.7% del suministro mundial de energía primaria, alrededor de 33 EJ. Sin embargo, otra parte de la contribución de la biomasa al suministro de energía primaria (3.3%) es tratado hacia una mayor eficiencia de conversión y mayor calentamiento (Angulo-Mosquera et al., 2021).

Del total de bioenergía que se produce en la actualidad, la biomasa de madera representa el 87%, los cultivos agrícolas el 9% y los residuos municipales e industriales el 4%. La biomasa aumentará de 1313 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) en 2010 a 3271 Mtep en 2040. Actualmente, el rendimiento global de todos los cultivos de biomasa, incluyendo cultivos leñosos y herbáceos que crecen en regiones templadas y subtropicales, varía de 8 ton ha secas—1 año—1 (para el sauce en Suecia) de 10 a 22 ton ha secas por año (para cultivos leñosos de rotación corta en EE. UU.). Algunas plantaciones comerciales en Brasil han reportado hasta 20 ton ha secas por año. Un promedio de biomasa global conservador sería de 10 ton ha secas por año, aunque algunos

ensayos de campo a pequeña escala han informado cuatro veces este nivel de producción de biomasa. Esta producción de biomasa, también conseguida en algunos cultivos de invernadero del sur de España, como el tomate, es de 9.8 ton ha secas por año (Manzano-Agugliaro et al., 2013).

2.4.1. Biomasa maderable

Como ya se mencionó anteriormente, una de las aplicaciones de la biomasa es la generación de electricidad. La producción de 1 kWh de electricidad a partir de la madera mediante la gasificación llevaría a un potencial de calentamiento global de 0.07 kg de CO₂eq, un potencial de acidificación de 0.09 kg de SO₂eq, y un potencial de eutrofización de 0.36 kg de NO₃eq. Considerando a Islandia como un caso de estudio, evaluaron la producción de energía a partir de 1 tonelada de madera y desechos de madera como aproximadamente la mayor reserva de biomasa existente y la más beneficiosa para el medio ambiente de ese país. Desarrollaron un simulador informático para la gasificación integrada de biomasa de desechos con cogeneración de calor y energía (CHP), utilizando el software Aspen Plus (de Jong et al., 2017)

Para el caso de energía térmica, como lo cita Caliano et al. (2017) realizaron un estudio sobre la optimización del diseño y análisis de sensibilidad de un sistema combinado de refrigeración, calefacción y energía (CCHP, por sus siglas en inglés, Combined Cooling, Heating, and Power) de biomasa con sistemas de almacenamiento de energía térmica; la unidad de cogeneración suministra electricidad a la red externa y calor para la demanda de agua caliente sanitaria durante todo el año. Durante la estación fría también proporciona calor para la demanda de calefacción ambiental, mientras que, durante la estación cálida, la energía térmica generada por la unidad también se utiliza para ofrecer refrigeración por el enfriador de absorción. El sistema de almacenamiento de energía térmica se incluye para almacenar el excedente de generación de calor de la unidad de cogeneración, con respecto a la demanda de calor para un uso posterior (Figura 2.5).

La biomasa de residuos de tala, es la principal fuente de bioenergía en el hemisferio sur y el sur de EE. UU, en este último también se utiliza la madera de tallo. Este tipo de biomasa forestal se genera mediante operaciones como la extracción de madera comercial, el aclareo para evitar incendios, la tala de salvamento y la restauración forestal. En los países europeos, utilizan la madera de las actividades de aclareo y de la recolección de residuos de tala rasa; las primeras son más costosas debido a que absorben todo el costo operativo, a diferencia de la recolección de residuos que solo acarrear los costos de astillado y transporte secundario.

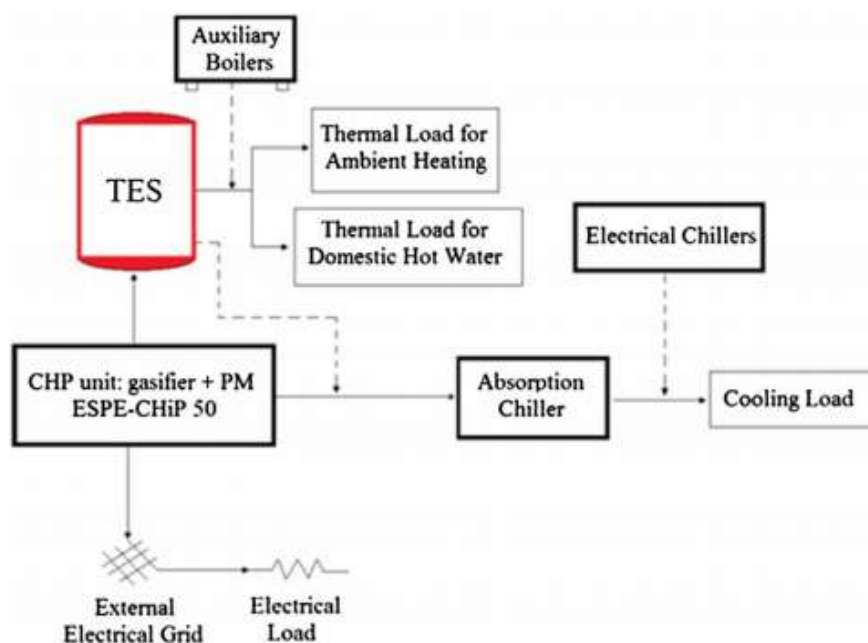


Figura 2. 5. Diseño de una planta CCHP

Es importante mencionar que los residuos de la tala es la única fuente considerada carbono neutral. Adicional se encuentran las toneladas de residuos producidos en la industria de procesamiento de la madera, los cuales se utilizan para la producción de bioenergía y productos forestales de base biológica. Estos consisten en astillas, corteza, trozos, losas, y material fino como virutas y aserrín. No obstante, el área de oportunidad que representa la biomasa forestal, aún debe superar algunos desafíos; se debe cuantificar la disponibilidad de los mismos para cumplir con los estándares requeridos en los diversos procesos de conversión de biomasa, lo cual resulta un poco complicado, ya que varía en función de la configuración del equipo utilizado

en los aserraderos, la especie, el método de trabajo, la calidad de la troza, la clasificación, el almacenamiento y el secado (Woo et al., 2019).

En un estudio sobre la evaluación de residuos maderables de *Pinus* spp. para la producción de briquetas, adoptaron una metodología de seis fases: primero se recolectaron las muestras, en esta fase se elaboró un diagnóstico para determinar los residuos maderables potenciales y se recolectó la materia prima (aserrín y viruta). En la segunda fase se caracterizó la biomasa: se evaluó el contenido de humedad, granulometría, material volátil, contenido de cenizas, carbón y densidad. En la tercera fase se fabricaron las briquetas: se desarrolló el sistema mecánico para la fabricación de las briquetas, se preparó el aglutinante y la mezcla y al final se dejaron secar las briquetas. Para la cuarta fase se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de las briquetas: contenido de humedad, densidad, poder calorífico y contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina. Posteriormente (fase 5) se hizo una evaluación termográfica y se midió la pérdida de masa. Finalmente (fase 6) se realizó una evaluación económica considerando los costos del proceso y su asequibilidad en referencia a la comunidad (Morales-Máximo et al., 2020) (Mario Morales-Máximo et al., 2021).

2.4.2. Consideración de los impactos ambientales de la biomasa

El potencial mundial de la biomasa para fines energéticos ha tomado una gran importancia, ya que su obtención puede ser a partir de tierras de cultivo excedentes, cultivos energéticos en tierras degradadas, residuos agrícolas, residuos forestales, estiércol animal y desechos orgánicos (Bridgwater, 2011). Por lo tanto, no es "un hecho" que la biomasa para energía pueda estar disponible a gran escala. Además, se muestra que las políticas que apuntan al suministro de energía a partir de biomasa deben tener en cuenta factores como el desarrollo del sistema de producción de alimentos en los esquemas de desarrollo integral (Pérez-Denicia et al., 2017)

2.5. Bioenergía

En el contexto de la Unión Europea (UE), se puede encontrar un análisis sobre los tres principales enfoques para evaluar el desarrollo futuro de la bioenergía: 1)

basado en la oferta, 2) basado en la demanda y 3) combinación del enfoque 1 y 2. En el primer enfoque identificaron dificultades para llevar a cabo este tipo de evaluaciones, dado que las proyecciones de disponibilidad de bioenergía primaria, varían en gran medida; hasta el 2020 las diferencias oscilan entre 4.8 y 21.6 EJ/año, se observa un rango de entre 8.6 y 25 EJ/año a mediados del 2030, y hay muy pocos estudios para las estimaciones a largo plazo. En cuanto al segundo enfoque, sólo un modelo híbrido a nivel mundial de simulación a largo plazo, como el modelo energético mundial (MEM) produjo estimaciones desde 2030-2040 de la demanda de la bioenergía de la UE. Los estudios, en general, presentan un despliegue máximo de alrededor de 12 EJ/año. Por último, los modelos de evaluación integrados (enfoque 3), muestran que la bioenergía contribuirá entre el 7 y el 34% del consumo total de energía primaria de la UE en 2050 (Mandley et al., 2020).

Según Manrique et al. (2020) hablan sobre la bioenergía en Argentina. La mayor proporción del aporte de biomasa a la oferta interna de energía primaria está dada por la participación del biodiesel y el bioetanol. Según la AFoA (Asociación Forestal Argentina) en el 2018 los residuos de la industria forestal (2 millones t/año), los residuos de plantaciones como podas, raleos y tala (5 millones t/año), el aprovechamiento sustentable de bosques nativos (9 millones t/año) y el residuo agroindustrial (9 millones t/año) representan un potencial térmico de 6200 MW (megawatts). Empero, aún hay deficiencias en muchos aspectos necesarios para el progreso de la bioenergía en este país; en el caso de pellets, hay dificultad en la importación de tecnología (calderas, estufas, hornos, etc.), falta de conocimiento en cuanto a su uso y escasos de financiamiento; en el caso de chips, también hay desconocimiento por parte de los bancos, lo que reduce el financiamiento, falta de estandarización y de un mercado transparente (precio/calidad) (Manrique et al., 2020).

La situación es muy distinta en México, ya que, en cuanto a la producción de bioenergía, no se han realizado evaluaciones de las posibles emisiones por el cambio de uso de suelo, como consecuencia de destinar ciertos terrenos a cultivos energéticos. Pero sí se sabe que pueden generar impactos negativos en los niveles

de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes en el suelo. Para disminuir el impacto de la bioenergía sobre la cantidad y calidad de los cuerpos hídricos es importante priorizar a los métodos que utilizan residuos. La parte social tiene que ver con la ética de los desarrolladores de tecnología bioenergética, puesto que, de igual forma en México, ya se han presentado conflictos por la adquisición o arrendamiento de tierras para la energía eólica, por ejemplo; por tal motivo es muy importante respetar un proceso legal en el que los propietarios de tierras que pasen a ser cultivos dedicados, sean compensados debidamente (Tauro et al., 2016).

Adicionalmente, se puede contribuir a la sustentabilidad social de la bioenergía, si el gobierno mexicano crea acciones encaminadas a recuperar la gobernabilidad y la seguridad de zonas donde las condiciones de violencia e inseguridad prevalecen debido al crimen organizado. A partir de la preocupación por la seguridad alimentaria, en México, la Ley para el Desarrollo de los Bioenergéticos prohíbe el uso de maíz para la producción de etanol. A base de sorgo grano, una de las empresas ganadoras de licitación vende a PEMEX 183 millones de litros etanol al año (Tauro et al., 2016).

Resulta trillado disertar sobre la dependencia hacia los combustibles fósiles y su impacto negativo hacia el medio ambiente debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), describe los diferentes procesos de aprovechamiento de la biomasa generada a partir de los residuos forestales, destinada a la producción de bioenergía. Con la gasificación, por ejemplo, se pueden obtener gases con valor calorífico de 4 a 6 MJ/m³, mismos que se pueden emplear para combustión directa o como combustible para turbinas de gas y motores. Por otro lado, la pirólisis, es un proceso termoquímico en el que la biomasa se calienta alrededor de 500 °C en ausencia de oxígeno para convertirse en líquido (bioaceites o biocrudos), carbón, gases no condensables, acetona, metanol y ácido acético, como se muestra en la Figura 2.6 (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018).

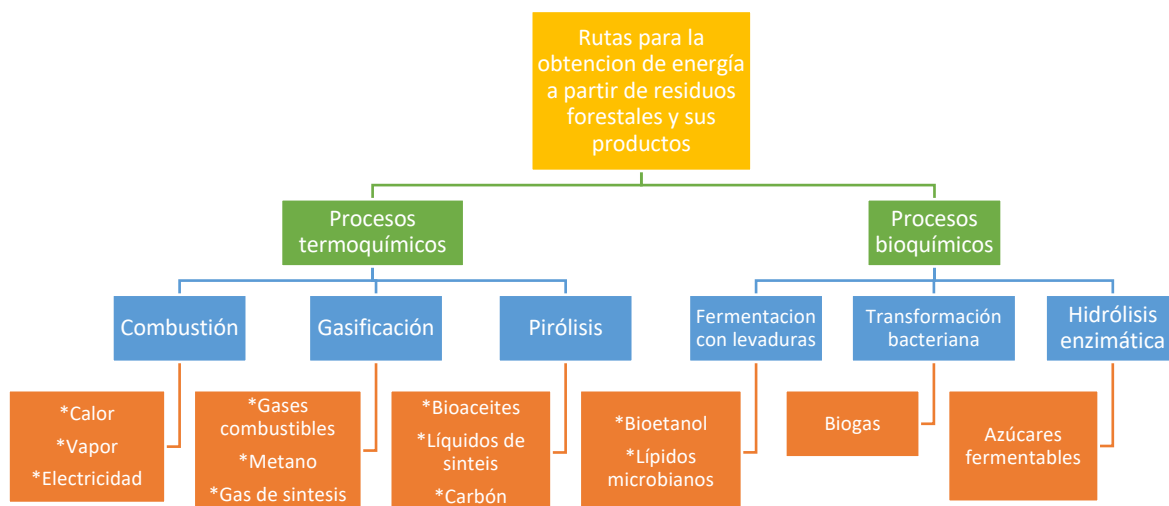


Figura 2.6. Rutas para la obtención de energía a partir de residuos forestales. Elaboración propia (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018)

Una de las desventajas de la bioenergía, y que ha provocado debates internacionales, es cuando la biomasa proviene de cultivos energéticos, los cuales pueden traer como consecuencia el uso intensificado de la tierra, ya sea por invadir tierras vírgenes o aquellas destinadas a la producción de alimentos. Por lo tanto, la bioenergía de la biomasa forestal, es una de las propuestas que no afecta ni al medio ambiente, ni la seguridad alimentaria, pudiendo además contribuir a lograr los objetivos acordados en la conferencia de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. La biomasa leñosa tiene un alto contenido de materia seca, por lo que es una buena materia prima para la combustión, pero la biomasa herbácea, al poseer más humedad, afecta negativamente la combustión. Para contrarrestar limitantes como la baja eficiencia (10-30%) de digestión de la biomasa (biomasa de carretera, por ejemplo), al contener más lignina por las fechas de cosecha tardías, se diseñó un procedimiento llamado “Generación Integrada de combustible sólido y biogás a partir de la biomasa” que mejora el rendimiento energético y la calidad del biocombustible (Van Meerbeek et al., 2019).

2.5.1. La bioenergía y su importancia

La bioenergía es la energía obtenida de la biomasa (la biomasa es una fuente de energía renovable y limpia, la cual tiene un ciclo; ver Figura 2.7). Los biocombustibles son obtenidos a partir de la biomasa. En los últimos años, ha

cochado importancia la necesidad de contar con marcos reglamentarios sólidos para la bioenergía, tanto a nivel nacional como internacional. Impulsado por los efectos de los altos precios del petróleo y el gas natural, muchos países están implementando políticas y leyes nacionales para fomentar la producción de bioenergía como medio para lograr la seguridad energética y la autosuficiencia y para reducir la dependencia de las reservas extranjeras de combustibles fósiles (Moosmann et al., 2020) (García & Masera, 2016).

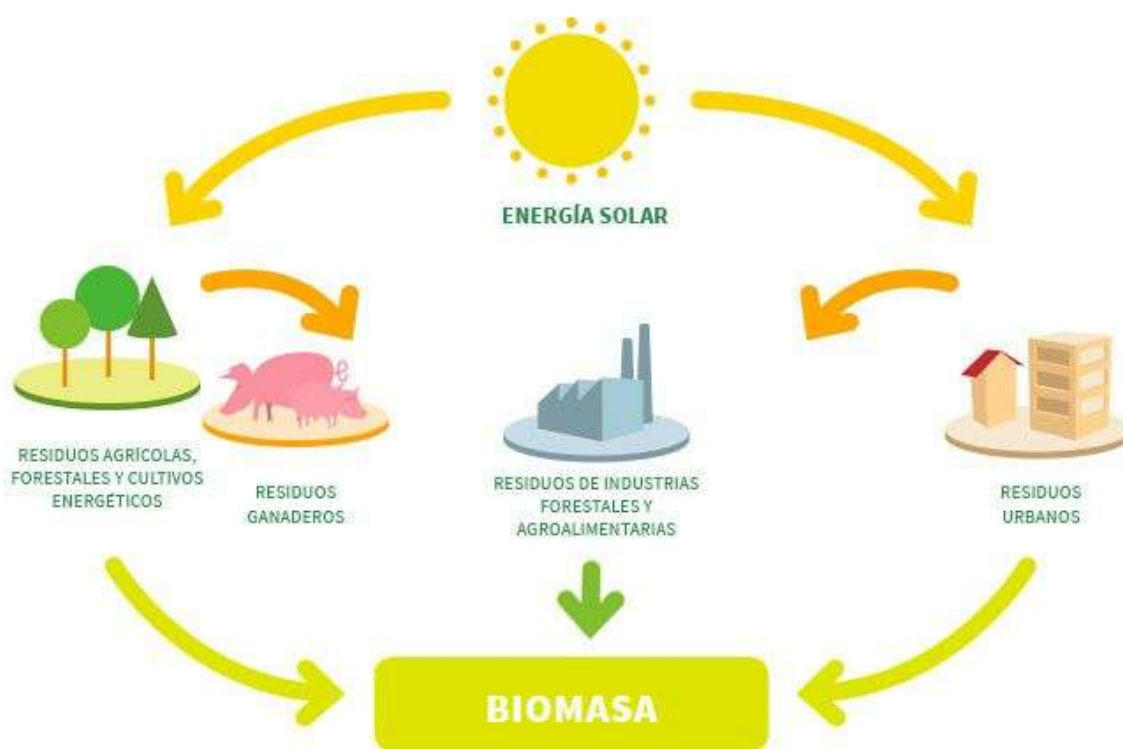


Figura 2.7. Ciclo de la biomasa

Los biocombustibles se refieren a la biomasa vegetal y los productos refinados que se queman para obtener energía (calor y luz). Al igual que los combustibles fósiles, los biocombustibles existen en formas sólidas, líquidas y gaseosas. Los seres humanos han estado utilizando bioenergía y biocombustibles para fines domésticos desde la historia pregrabada. La madera se quemaba para obtener calor y luz para cocinar alimentos, iluminar la noche, calentar refugios y tratar los artefactos de arcilla. Antes del siglo XIX, la madera era el combustible predominante para cocinar y calentar y el aceite vegetal era el principal

combustible para la iluminación en todo el mundo. Hoy, sin embargo, los combustibles fósiles son las fuentes de energía dominante (Guo et al., 2015).

La bioenergía tiene ventajas sobre los combustibles fósiles convencionales debido a su renovabilidad y capacidad, que tiene un papel dominante en el blindaje de la seguridad energética que puede ser una alternativa favorable a la alteración de los alimentos, los recursos y la atmósfera. Para mantener sus niveles de energía inmediatos y restaurar la atmósfera, los países basados en el carbón necesitan combustibles alternativos. Por ejemplo, la incorporación maravillosa a las energías renovables son los biocombustibles derivados de los residuos de cultivos sin sacrificar la producción de alimentos. Reemplazar los combustibles fósiles por biocombustibles puede reducir significativamente efectos dañinos que surgen de varios combustibles fósiles (Rather et al., 2022).

Los biocombustibles están enfocados en el aprovechamiento energético de la biomasa tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales, dentro de un contexto nacional e internacional con el objeto de generar una menor contaminación ambiental y son una alternativa viable al agotamiento de combustibles fósiles, como el gas y el petróleo, donde se encuentra presente el incremento en sus precios (Morales-Máximo et al., 2022).

2.5.2. Características de la bioenergía

La bioenergía posee distintas ventajas con respecto a otras fuentes de energía: permite producir calor, fuerza motriz, electricidad y biocarburantes líquidos. Es omnipresente: es decir es posible encontrarla en casi todas partes, y está disponible en forma concentrada como subproducto de procesos agroindustriales, residuos de actividades humanas o como estiércol de animales. La biomasa leñosa tiene el potencial de crear empleos locales indirectos en áreas rurales, y esta característica puede ser clave para atraer nuevas oportunidades comerciales en las economías rurales con bosques (Jackson et al., 2018).

Si se aprovecha de manera sustentable, la bioenergía presenta numerosas ventajas sociales, económicas y ambientales ya que es posible crear sinergias

positivas por la interacción entre distintos sectores como el agrícola-forestal (donde se produce la biomasa), el sector industrial que la transforma y los sectores que la utilizan (energético, transportes, residencial, entre otros). Estas sinergias crean distintas condiciones para trabajos locales agregando valor agregado a los productos, al mismo tiempo que reducen la dependencia de recursos fósiles (Morales M. et al., 2022).

La producción de biocombustibles, de acuerdo a la Agencia Internacional de Energía, su demanda aumentará ya sea para la producción nacional de biocombustibles o para la exportación como materia prima. Los cultivos energéticos, tiene un impacto positivo significativo en los ingresos de las comunidades agrícolas, el potencial de creación de empleo a lo largo de la cadena de suministro de biocombustibles avanzados es significativo ya que los puestos de trabajo se crean mediante el cultivo (Usmani, 2020).

La producción de biomasa puede contribuir a distintos servicios ambientales como reducción en las emisiones de GEI se informan ampliamente en comparación con los métodos de producción basados en combustibles fósiles (Takeda et al., 2021). La biomasa podría conducir a un suministro sostenible, esencial para una transición energética.

2.6. Uso actual de la energía en México y aplicaciones de la bioenergía

De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER), durante el año 2019 la producción de energía primaria disminuyó 2.40% respecto al año 2018 y totalizó 6,332.81 PJ. La reducción de la producción de carbón y petróleo crudo fueron los principales elementos que definieron este comportamiento en la reducción de la producción de energía a nivel nacional (SENER, 2019). La fuente principal de energía fue el petróleo, seguido del gas natural. Las energías renovables en México tienen una participación del 11.25 %, en donde la biomasa representa 6.43 %, mientras que la energía eólica, solar y la geoenergía participaron con el 3,45 % y la hidroenergía 1.43% ver (Figura 2.8) (SENER, 2021)

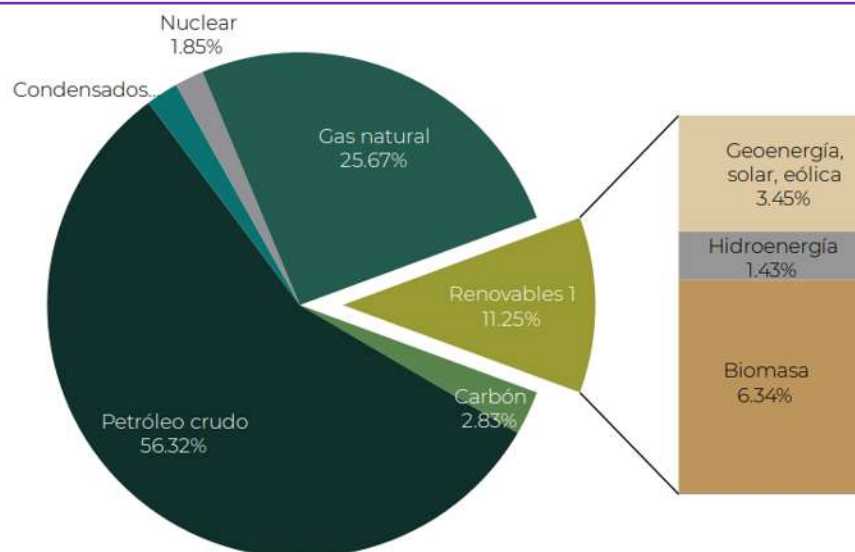


Figura 2.8. Producción de energía (SENER, 2021)

Históricamente, se ha tenido la tendencia a incrementar la participación de la biomasa en el consumo nacional de energía, aunque en términos absolutos el consumo de los bioenergéticos (leña, carbón vegetal y bagazo) permanece más o menos constante. Un estudio reciente señala que el consumo de leña indicado en el Balance Nacional de Energía (BNE) está subestimado debido a dos factores: a) la leña requerida para la producción de carbón vegetal no se contabiliza y b) el consumo real de leña sería mayor al indicado por el BNE (Masera et al., 2011).

Existen distintas rutas las cuales permiten satisfacer múltiples aplicaciones y diferentes usos finales, a partir de distintas fuentes de biomasa. Un ejemplo es en la provincia de Córdoba, España, donde se puso en marcha en 2017 una planta de generación de energía eléctrica a base de cáscara de maní por parte la empresa Prodeman, de 9 MW, que funciona justamente con cáscara de maní proveniente de su actividad. Se trata de una instalación que acopia y vende 140 mil toneladas anuales de maní. La usina cuenta con una turbina de vapor de 10 megavatios (MW) de potencia, con capacidad para generar 78.840 MW/hora. La empresa usa el 10% de la energía para su funcionamiento; el 25%, para el proceso de industrialización del maní y el 65% restante se incorpora a la red

nacional de electricidad. Esa cantidad permite abastecer a unos 8000 hogares al año (Manrique et al., 2020).

De la biodigestión anaeróbica de residuos orgánicos se puede obtener biogás, y gas de síntesis por medio de la gasificación térmica de biomasa. Ambos pueden generar calor, electricidad o cogenerar calor y electricidad a la vez. La producción de biogás a partir de desechos orgánicos es una parte importante en la transición hacia combustibles libres de fósiles para el sector de industrias y el transporte (Nordell et al., 2022).

Existen aplicaciones rurales para la biomasa, un ejemplo es la leña que se utiliza principalmente en la generación de calor para la cocción de alimentos. La forma tradicional de hacerlo se basa en utilizar herramientas, como el fogón, por lo que se han desarrollado tecnologías que mejoran la eficiencia de su uso, diferentes estudios sugieren la posibilidad de producir briquetas con propiedades adecuadas para combustión a partir de mezclas. Estudios muestran medios de reducir el desperdicio, la escasez de energía y la contaminación del aire interior en las comunidades rurales (Kpalo et al., 2021).

2.6.1. La bioenergía a nivel mundial

Los biocombustibles, así como las formas de aprovechamiento sólido (briquetas, pellets) han penetrado en los mercados mundiales de la mano de diferentes instrumentos de fomento, como son los cortes obligatorios, beneficios impositivos y subsidios. Una buena parte de dichos apoyos fueron basados en promover una fuente de energía alternativa que redujera los impactos negativos de los combustibles fósiles.

Ante las controversias mencionadas las administraciones buscan asegurarse que estas premisas sean cumplidas imponiendo análisis y restricciones al ingreso de biocombustibles que no cumplan con determinadas pautas preestablecidas. Algunos estudios sobre la producción de biocombustibles sólidos, se muestran por ejemplo en Portugal, donde la viabilidad económica de utilizar residuos de biomasa forestal para la generación de energía, es un caso de estudio para los sectores

doméstico, turístico e industrial. Pero tienen la visión de generar energía eléctrica a través de biomasa forestal y suministrarla a toda una región (Guilhermino et al., 2018).

Por su parte, Polonia está generando briquetas a partir de biomasa forestal a través de un proceso de briqueteado en prensas de pistón y que se pueden usar como combustible en calderas automáticas, estas briquetas son una fuente de alimentación prospectiva y prometedora para generar calor en las casas familiares (Stolarski et al., 2016).

2.6.2. La bioenergía nacional

La bioenergía tiene un potencial energético muy importante en México, que alcanza dos terceras partes del consumo de energía final del país. Asimismo, muchas de sus aplicaciones están asociadas a tecnologías maduras y, en muchos casos, rentables. Sin embargo, determinar con precisión el nivel de penetración futuro que podría tener la bioenergía en la matriz energética de México y evaluar sus impactos en el campo ambiental, económico y social, no es una tarea fácil, por varios motivos: (Núñez-Retana et al., 2020).

Por un lado, existe incertidumbre sobre la disponibilidad actual y futura de biomasa apta para uso energético: sus límites y condiciones físicas, tecnológicas, económicas y sociales son dinámicos, están fuertemente interrelacionados con otros sectores económicos, y en última instancia dependen de decisiones político-normativas (García & Masera, 2016).

Actualmente en México no existe un manejo o una aplicación para el desperdicio de recursos forestales que se generan a diario en las macro y micro empresas que trabajan la madera, esta carencia de aplicación puede deberse a la falta de tecnología para el aprovechamiento de estos residuos maderables. Un dato importante es que no existen datos precisos acerca de la cantidad de aserrín que se genera en la industria mexicana de aserrío (Correa-Méndez et al., 2018). Pero, se puede decir que en México se tiene la materia prima necesaria, tanto forestal como agrícola, para la producción de pellets y sólo falta la iniciativa, tanto del productor

como el del inversionista, para generar un proyecto rentable en materia de biocombustibles sólidos.

2.6.3. La bioenergía a nivel local

Existen investigaciones de aportaciones locales en distintos países, tal es el caso de la elaboración de briquetas con aglomerante y con la ayuda de una prensa manual según Vega-Nieva et al. (2015). Para este caso de estudio que se elaboró en Colombia, al producir briquetas con almidón como aglomerante. Las diferentes pruebas que realizaron para determinar la proporción ideal de aglomerante, se replicaron varias briquetas con diferentes mezclas hasta lograr un producto con mayor viscosidad y eficiencia de adherencia, la proporción óptima fue la siguiente como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Mezcla para la realización de briquetas

Yuca fresca utilizada / Kg	Cantidad de almidón producido	Cantidad de almidón utilizado por briqueta	Agua utilizada en la solución
1	230 g	50 g	300 ml

En México, de acuerdo con un estudio realizado sobre la elaboración de briquetas con residuos maderables de pino, generado en el complejo de San Juan Nuevo Parangaricutiro en el estado de Michoacán, se formaron a tres diferentes temperaturas (60, 80 y 100 °C) con 30 segundos de prensado a 15 MPa y con dimensiones de 82 mm de largo por 32 mm de diámetro. El poder calorífico obtenido estuvo en un rango de 19.12 MJ/Kg a 20.47 MJ/Kg (Tabla 2.3) (Orihuela et al., 2016) (Correa-Méndez et al., 2014) (Pintor-Ibarra et al., 2017).

Tabla 2.3. Valores obtenidos de las briquetas realizadas en San Juan Nuevo

Biomasa	Temperatura en (°C)			Presión ejercida
Poder Calorífico	60 °C	80 °C	100 °C	15 MPa
Aserradero	19.58 MJ/Kg	19.49 MJ/Kg	19.52 MJ/Kg	
Astilladora	19.04 MJ/Kg	19.12 MJ/Kg	19.21 MJ/Kg	
Taller de Secundario	20.17 MJ/Kg	20.25 MJ/Kg	20.47 MJ/Kg	

2.7. Ecotecnologías

Según Gastón et al. (2017), las ecotecnologías son una forma eficiente y sostenible para el aprovechamiento de recursos materiales y naturales, con la finalidad de producir bienes y servicios que benefician económicamente al hombre o una comunidad, permitiendo una operación limpia y ecológica. Los principales involucrados en utilizar estas ecotecnologías, sobre todo, las ecotecnias, son poblaciones rurales que eligen aquellas que mejor se adaptan a sus necesidades, entorno, cultura y, a los materiales disponibles en su comunidad (Figura 2.9).

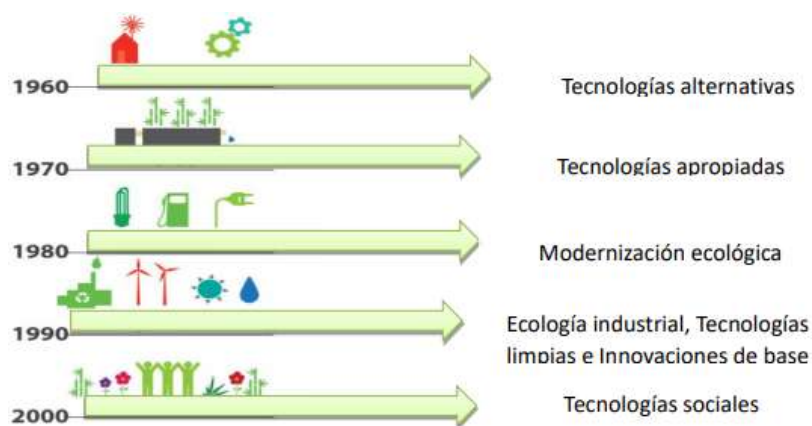


Figura 2.9. Movimiento cronológico del concepto de Ecotecnología (Mejía Ávila, 2017)

En Guanajuato se llevó a cabo un estudio sobre la transferencia de tecnologías ecológicas (TTE), dicho de otra forma, ecotecnologías; su objetivo fue medir cualitativa y cuantitativamente la transferencia de ecotecnias y su adopción social en localidades vulnerables de dicho estado, siendo estas Pénjamo, Comonfort, Apaseo el Alto, Tierra Blanca y San Felipe, mediante la construcción de un índice con base en la descripción recolectada a través de entrevistas, cartas etnográficas y talleres, de las viviendas beneficiarias durante el periodo de 2013-2015. Los usuarios beneficiarios se obtuvieron con el programa social “Impulso”, un instrumento de la política pública como respuesta del gobierno estatal a las problemáticas de desarrollo social, drenaje, agua entubada, piso de tierra y electricidad, por ejemplo. Se identificó que el gobierno únicamente hacía entrega de las ecotecnias sin respetar un proceso de transferencia y adopción de las mismas, lo que motivó la realización de este estudio. El índice de transferencia ecotecnológica consideró la frecuencia de mantenimiento anual sobre el número de

años de vida de la ecotecnia, nivel de facilidad en el uso de la ecotecnia, disposición de técnicos especializados en el mismo día, número de restricciones de infraestructura en la vivienda, número de restricciones territoriales-ambientales, retorno sobre la inversión, tasa interna de retorno, percepción sobre nivel de aceptación de la tecnología y número de viviendas con ecotecnias sobre el total de viviendas en la comunidad (Álvarez-Castañón & Tagle-Zamora, 2019). En la Figura 2.10 se aprecia el proceso de TTE.

También es muy importante mencionar la actuación de las ecotecnologías para mitigar los efectos del cambio climático global. En América Latina y el Caribe, la disminución de las regiones boscosas y, por consiguiente, de la biodiversidad, continua. Debido a la escasez de recursos materiales, tanto para las investigaciones ecológicas y forestales, como para las atenciones silviculturales en las nuevas plantaciones, se pretende optar por alternativas de bajos insumos como las ecotecnologías, tales como la aplicación de tratamientos pregerminativos de hidratación-deshidratación y de inóculos micorrízicos (Chang et al., 2017).

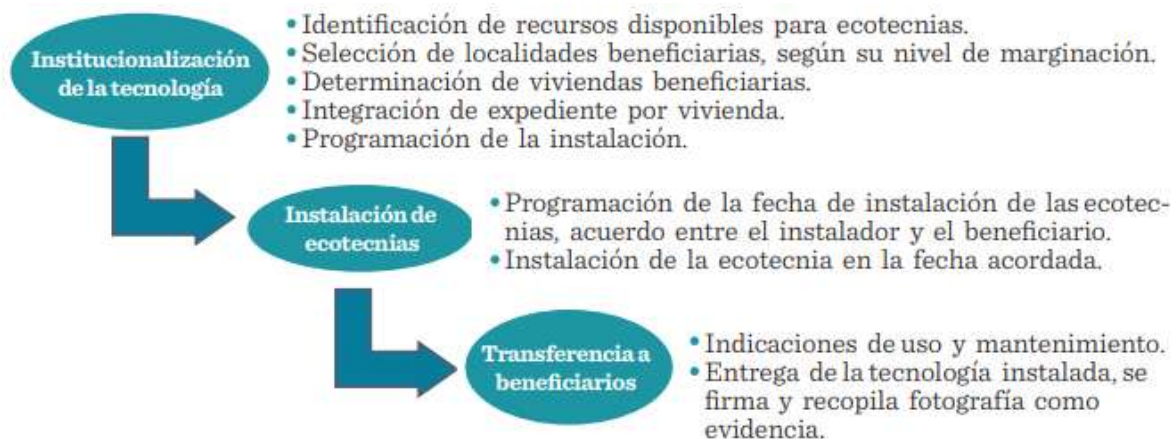


Figura 2.10. Proceso de TTE

Cabe destacar que, lamentablemente, dichas ecotecnologías casi no se han utilizado en campo para la restauración ecológica tropical, sino que se han restringido al ámbito académico y experimental, aunque se destacan resultados obtenidos en Brasil, Colombia, Cuba, México y Venezuela (Chang et al., 2017).

Es indudable que, al hablar de ecotecnologías, los temas redundantes varían de un contexto a otro. Por ejemplo, si hablamos del agua, un vital líquido indispensable

para la salud y el saneamiento, así como para la estabilidad social y política, habría que mencionar la problemática que se vive en México por la distribución de agua potable, drenaje, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, ejes fundamentales para el cumplimiento del artículo 4° constitucional, en la cual, las ecotecnologías, pueden devenir en parte de la solución como una alternativa sustentable para resolver la escasez de agua de calidad en nuestro país, por medio de colectores en comunidades rurales, difundiendo tecnología apropiada de suministro de agua como la captación de lluvia y niebla, cisternas, dispositivos de bombeo, filtración y desinfección, construcción de baños y lavaderos ecológicos, biofiltros, entre otros (Vidal-Álvarez, 2018).

Ejemplos de ecotecnologías que se han implementado en México, son sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores y un secador solar, resultado de proyectos desarrollados por distintos centros del país (Álvarez-Castañón & Tagle-Zamora, 2019)(Ortiz Moreno et al., 2014)

Adicionalmente, biocombustibles sólidos como las briquetas, se pueden considerar una ecotecnología; por ejemplo, dentro de los materiales y métodos para la elaboración, caracterización y aplicación de briquetas de residuos de café se encuentran: la presión de compactación y mezcla adecuada entre los residuos de café, aglutinante y agua, el diseño y la construcción de la máquina o prensa briquetadora (Balseca-Sampedro et al., 2018).

2.8. Los biocombustibles sólidos

Un biocombustible sólido (Figura 2.11) es un tipo de combustible que se produce a partir de recursos renovables, especialmente la biomasa vegetal. El biocombustible es una fuente de energía importante, que representó el 9,5% del consumo total de energía en el mundo en 2017. Las emisiones de la combustión de biocombustibles de diversos contaminantes contribuyen significativamente a la contaminación del aire y pueden tener efectos adversos sobre la salud (Tao et al., 2021).



Figura 2.11. Tipos de biocombustibles sólidos (pellets y briquetas)
[\(https://combustiblesaragon.es/diferencias-entre-briquetas-de-madera-pellets-y-lena/\)](https://combustiblesaragon.es/diferencias-entre-briquetas-de-madera-pellets-y-lena/)

Actualmente, la producción de biocombustibles sólidos a nivel mundial se basa en un concepto de economía circular que fomenta el uso de residuos (o materiales de bajo valor) como fuentes primarias, reduciendo el impacto en el medio ambiente y beneficiando a la economía. Aunque la producción de biocombustibles sólidos aporta beneficios indiscutibles, los investigadores también plantean algunos desafíos inherentes. Por ejemplo, la falta de políticas gubernamentales o subvenciones para iniciar y mantener una demanda de biocombustibles sólidos está obstaculizando el desarrollo y uso generalizado de biocombustibles sólidos (Angulo-Mosquera et al., 2021).

Existen diferentes tipos de biocombustibles sólidos, en la Tabla 2.4 se presenta los diferentes tipos de biocombustibles sólidos, que a la fecha se han derivado de la biomasa forestal, y en lo consecuente se describirán cada uno de ellos con base al estado de arte en el que se encuentra (Carrillo-Parra & Rutiaga, 2020).

Tabla 2.4. Biocombustibles sólidos derivados de la biomasa forestal

Biocombustible	Tamaño de partícula típico	Método común de preparación
Briquetas	Diámetro mayor a 25 mm	Compresión mecánica
Péllets	Diámetro menor a 25 mm	Compresión mecánica
Astillas	5 a 100 mm	Corte con herramientas con filo
Carbón vegetal	---	--

2.8.1 Briquetas

Las briquetas son un biocombustible sólido, que se obtiene mediante la compactación o densificación de residuos (de origen lignocelulósico u otros

materiales). Se producen bajo la aplicación de grandes presiones y temperaturas elevadas que provocan la autoaglomeración de sus partículas, o mediante bajas y medianas presiones con ayuda de una sustancia aglomerante para lograr su compactación (Carrillo-Parra & Rutiaga, 2020). Se utilizan tanto en sector doméstico como en el industrial para la generación de calor o producción de energía, como estufas, chimeneas, hornos, entre otros. Son considerados combustibles ecológicos y renovables, pueden estar hechos de desperdicios forestales como: aserrín, viruta, astillas, ramas, restos de poda, aclareos, etc., se basa en diferentes aspectos. El tamaño depende del uso previsto y las especificaciones de la máquina briqueteadora, que define el ancho de la briqueta. Para procesos industriales o negocios, la longitud varía entre 30 y 100 cm, entre 10 a 50 cm para productores o restaurantes, y finalmente, entre 3 y 8 cm para el sector familiar (Arévalo et al., 2017). En la Figura 2.12 se observan algunas briquetas.



Figura 2.12. Corte transversal de las briquetas. Lote A: se observa mejor compactación del material y un acabado uniforme; Lote B: Se observan espacios vacíos en el interior, menor compactación y apariencia no uniforme.

(<https://www.leroymerlin.es/fp/12856753/pack-de-briquetas-de-madera-caryse-de-7-kg>)

Una forma de mejorar las propiedades de combustión y manipulación de la biomasa es mediante la densificación en briquetas. Las briquetas fabricadas a partir de biomasa torrefactada dan muchas ventajas sobre la materia prima (Trubetskaya et al., 2019).

Las briquetas en un 40% en comparación con la materia prima bruta sus contenidos químicos evitan la utilización de adhesivos y se caracterizan por su alto poder calorífico. Estudios de Soto y Núñez (2008), como se citó en Carrillo-

Parra & Rutiaga-Quiñones (2020). Encontraron que la eficacia calorífica superó las 5 092.5 kcal/kg con una combinación que contenía 47.5% de carbonilla y un 52.5% de aserrín, esto originó una ganancia energética de 24.25% con respecto al poder calorífico de los pellets de aserrín (4 098,6 kcal/kg). A nivel mundial las briquetas se comercializan en diferentes presentaciones, por lo que es frecuente conseguir las en forma de: prisma hexagonal, octogonal (la menos común con un orificio al centro para acelerar su combustión), otra forma es la rectangular, con sus cuatro esquinas redondeadas, ésta última tiene la ventaja de arder más despacio, siendo más vendida para uso casero, principalmente en Sudamérica (Da Silva, 2013). El impacto de las briquetas en la sociedad se refleja en investigaciones realizadas en distintos países.

2.8.2 Pellets

Los pellet de madera es un biocombustible sólido estandarizado producido en base a residuos de madera proveniente de la industria forestal, principalmente; son cilindros que se obtienen mediante un prensado de aserrín, virutas o polvo de madera en equipos especialmente concebidos para este fin (prensa pelletizadora), Los pellets, son biocombustibles sólidos, de bajo contenido de humedad y con una alta densidad energética, de forma cilíndrica con diámetros normalmente comprendidos entre 7 y 22 mm y longitudes de 3.5 a 6.5 cm (Figura 2.13), cuya fabricación se realiza a alta presión, sin necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo (Marcos y Núñez, 2006 como se citó en Carrillo-Parra & Rutiaga-Quiñones (2020).



Figura 2.13. Pellets de madera
(www.smarterbusiness.org.uk)

La combustión de los pellets es más atractiva ambientalmente hablando, debido a que reduce las concentraciones de GEI. Es posible fabricar pellets de alta calidad para la recuperación de energía de cocción e incineración, se utilizan para la recuperación de energía a partir de residuos, destacando sus ventajas económicas y ambientales asociadas dentro de los desafíos actuales para enfrentar el aumento global de la demanda de energía y el crecimiento constante de la generación de residuos dentro de una sociedad más sostenible (García et al., 2021).

En México, los productos residuales maderables son comunes que sean quemados. En la actividad de elaboración de artesanías maderables, los residuos no son aprovechados o no son utilizados en sus mejores condiciones sin embargo bien podrían ser utilizados como biocombustibles, los que permitirían reducir el consumo de energía de gas LP, al utilizarlos como materia prima para la fabricación de pellets. Al respecto, en el Tecnológico de Monterrey (2012) se realizó un estudio de mercado sobre la preferencia y factibilidad de utilizar los pellets como combustible doméstico e industrial, encontrando una gran aceptación por parte de la sociedad, ya que consideran que es un producto amigable con el ambiente y favorece el desarrollo sustentable (Ramírez-Ramírez et al., 2022).

Se puede decir, que en México se tiene la materia prima necesaria (forestal y agrícola) para la producción de pellets, sólo falta generar proyectos que sean factibles de realizar y convencer a inversionistas sobre la rentabilidad de este tipo de industria forestal.

2.8.3. Importancia de las evaluaciones económicas del uso de los biocombustibles sólidos

La creciente conciencia ambiental ha motivado la valorización de la biomasa para la producción de energía, la tendencia actual es hacia la investigación en materia de biocombustibles de segunda generación, que permiten la transformación de la biomasa lignocelulósica (obtenida a partir de residuos forestales o de cultivos, maderas de bajo precio o serrín) en energía (Alemán-Nava et al., 2014).

Los biocombustibles sólidos son materia vegetal, como astillas de madera y otros tipos de biomasa sólida o leñosa, que puede utilizarse como combustible directamente por lo general en las cocinas tradicionales. Una fuente importante de generación de biomasa sólida es la que se deriva de los aprovechamientos forestales (Goche et al., 2016).

A nivel mundial los biocombustibles sólidos son una opción importante para la generación de energía calorífica principalmente. En México se emplean y se comercializa la leña y el carbón vegetal sin considerar algunos aspectos de calidad, solo se contemplan costos de producción, almacenaje y transporte.

2.9. Análisis de ciclo de vida

El aumento de la contaminación y la escasez de materiales y fuentes de energía ha impulsado el desarrollo de enfoques orientados al ciclo de vida para el perfil ambiental de los productos. El primer análisis de ciclo de vida fue en 1960 gracias a la colaboración entre industria y universidades. Hoy el ACV es definido como una herramienta para evaluar los impactos ambientales potenciales y los recursos usados a lo largo del ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de materia prima, producción, uso y gestión de los desechos (Hauschild et al., 2017).

El uso de los ACV ha sido cada vez mayor para analizar cuestiones a macro escala, por ejemplo, sistemas nacionales de energía y sistemas de gestión de residuos. Una encuesta del 2006 reveló que son usados principalmente para estrategias de negocios, desarrollo de políticas y diseño y desarrollo tanto de productos como procesos. Otra encuesta similar del 2011 mostró su participación en la agricultura (56%), sector alimenticio (62%), bienes de consumo (38%) y energía (37%). El crecimiento del uso del ACV en el sector privado se muestra en la Figura 2.14 donde se aprecia el número total anual de informes de responsabilidad corporativa que mencionan un ACV (Hauschild et al., 2017).

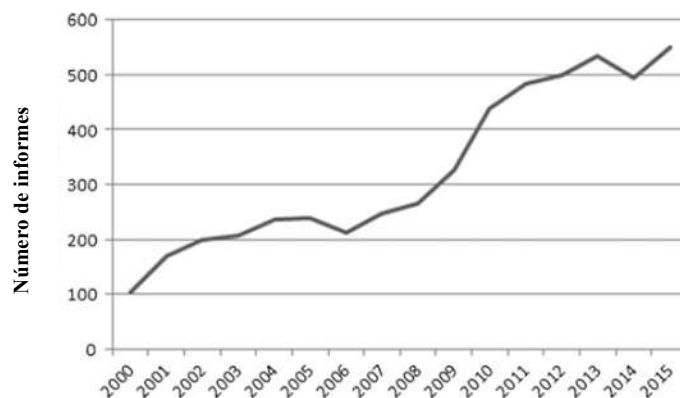


Figura 2.14. Desarrollo en número de reportes publicados de responsabilidad corporativa que mencionan un ACV por año, del 2000 al 2015 (Hauschild, 2017)

Apenas el año pasado en el Reino Unido se realizó un Análisis de Ciclo de Vida de la producción de biocombustibles líquidos (acetona, butanol y etanol) a partir de desechos sólidos urbanos, en el que se aprovechan los materiales con fibra lignocelulósicos como papel, residuos de comida, madera; el proceso comienza con el autoclave, un proceso de tratamiento térmico mecánico desarrollado por el bioquímico Wilson, en el que los residuos sólidos urbanos se tratan con vapor de alta presión saturada en un proceso por lotes; la fracción orgánica se descompone en una fibra rica en celulosa con alto contenido de azúcar (40-50%), lo cual podría ser adecuado para la producción de biocombustibles. Seguido por la clasificación de los desechos donde se separan los metales ferrosos y no ferrosos, plásticos, vidrio y otros residuos inorgánicos; cabe mencionar que estos desechos no se encuentran dentro del estudio, es decir, están fuera del límite del sistema. La fibra de celulosa pasa a hidrolisis enzimática para la recuperación de azúcares. Posteriormente se realizan la fermentación y destilación, etapas en las que se recupera energía en forma de electricidad y calor (Meng et al., 2019).

2.9.1. Análisis de ciclo de vida de biocombustibles sólidos

En una evaluación ambiental se seleccionaron casos de ACV de biocombustibles sólidos. Primeramente, durante la revisión a la literatura se encontró que la mayoría de los estudios tratan sobre biocombustibles líquidos, biodiesel y bioetanol; y, referente a biocombustibles sólidos, son pocos los ACV que se han realizado. Entre estos pocos, se ha comparado el uso de la leña tradicional con pellets de madera

fabricados a base de biomasa para calefacción doméstica, y se halló un gran potencial en la reducción de impactos sobre la salud humana, la calidad de los ecosistemas, consumo de energía primaria y cambio climático (Christoforou & Fokaides, 2019).

Kylili et al. (2016) investigaron los impactos ambientales de la pelletización con residuos de las fábricas de oliva, cuyo propósito era la calefacción doméstica. Esta investigación reveló que el transporte y empleo de un sistema de energía renovable en el proceso, son factores críticos que pueden influenciar en los impactos ambientales. La incorporación del sistema de energía renovable podía disminuir hasta un 85% de los impactos en categorías específicas como acidificación, cambio climático y la creación de ozono fotoquímico, en comparación con el uso de combustibles fósiles (Christoforou & Fokaides, 2019).

En un estudio integraron un análisis tecno-económico y un ACV de diferentes tecnologías termoquímicas de conversión de biomasa lignocelulósica. Argumentan que la importancia del análisis tecno-económico radica en la identificación de costos para el desarrollo y comercialización de combustibles y productos químicos fabricados con biomasa. Dichos productos han surgido como medio para la mitigación de emisiones de GEI de diferentes sectores que demandan energía, como el sector de transporte y el industrial, entre otros. En cuanto al ACV, las fases que componen el sistema general para la conversión termoquímica de la biomasa lignocelulósica, son tres: 1) la plantación de la biomasa, la cosecha y el transporte (importante mencionar en este punto, cómo se obtiene la biomasa, si es de cultivos energéticos, residuos forestales o residuos agrícolas, ya que los impactos ambientales difieren dependiendo el origen de la biomasa); 2) la operación de la planta y el mejoramiento de productos primarios si es necesario, y 3) demolición y reciclaje de la planta. Resaltan que la mayoría de los estudios que se encuentran en la literatura se enfocan únicamente en las fases 1 y 2, por lo que recomiendan que en futuros trabajos se consideren las tres. De igual forma, aún falta por abordar para realizar un análisis completo que compare las distintas tecnologías termoquímicas de conversión (Patel et al., 2016).

Respecto a los biocombustibles, existen varios procesos para su fabricación, entre ellos la licuefacción hidrotermal (HTL). En Columbia Británica, una provincia de Canadá, abundan los residuos forestales y, gracias a la disponibilidad de este recurso, se producen biocombustibles con esta tecnología. En un ACV consideraron tres escenarios: 1) suministro de residuos forestales para su conversión en una refinería central integrada; 2) la HTL de residuos forestales a bioaceite en biorefinerías distribuidas y su mejora subsiguiente en una refinería de petróleo central; 3) la densificación de los residuos forestales en plantas de pellets distribuidas y conversión en una refinería central integrada. Dicho análisis demostró que estos biocombustibles pueden contribuir significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), aunque la etapa de conversión sea la que domina el total de las emisiones de GEI constituyendo más del 50% (Nie & Bi, 2018).

Enfocados en el tema de biocombustibles sólidos, también en esta década se han llevado a cabo varios estudios sobre la utilización de briquetas y pellets; En China, por ejemplo, se basaron en un caso de estudio en la Provincia de Jilin, para realizar un análisis de ciclo de vida del consumo de energía de combustibles fósiles y emisiones de GEI de la cadena de suministro de combustibles pellets de paja de maíz, así como una evaluación económica de proyectos incipientes a pequeña escala en regiones rurales. Los resultados de dicha evaluación sugieren que el uso de pellets de paja de maíz debe ser impulsado para usuarios industriales y comerciales para mejorar la economía de estos proyectos en áreas rurales. El ACV demostró que el desarrollo de estos pellets puede reducir significativamente las emisiones de GEI como el CO₂, CH₄ y N₂O reemplazando la quema de carbón; también menciona que, por parte del gobierno, este tipo de proyectos deben ser priorizados en planes y políticas nacionales para alcanzar la meta establecida referente a la mitigación del cambio climático (Song et al., 2017).

Así mismo en China, redactaron un artículo que habla sobre los impactos ambientales de briquetas de tallos de maíz, los cuales, en algunas ocasiones son quemados en el campo, y otras, son aprovechados para la producción de fertilizantes y en procesos bioquímicos. Henan es una de las regiones más

importantes y productoras en el sector agrícola en China, por lo que abundan los tallos de maíz. El artículo se basa en dos enfoques: 1) todos los impactos ambientales son asignados al maíz y los tallos son considerados únicamente como residuos; 2) los impactos son asignados tanto al maíz como a los tallos. El método que utilizaron para el análisis del inventario de ciclo de vida (AICV) fue ReCiPe Midpoint (H) (V1.12) con valores de 18 categorías de impacto: cambio climático, agotamiento de ozono, toxicidad humana, formación de óxido fotoquímico, formación de partículas de materia, radiación ionizada, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, eutrofización marina, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina, ocupación agrícola de la tierra, ocupación urbana de la tierra, transformación natural de la tierra, agotamiento de agua, agotamiento de metales y agotamiento fósil (Wang et al., 2017).

Revisando la literatura, se encontró que la biomasa útil para fabricar briquetas es muy diversificada, ya que cambia según el país o la región; en la India, por ejemplo, usan tallos de maíz, astillas de madera, tallos de algodón, cascara de café y residuos forestales. En Líbano, específicamente en Caza of Koura, cuentan con bastas arboledas de oliva, cuyos residuos de poda han sabido aprovechar para la obtención de biomasa a tal grado de construir una planta productora de briquetas. Con el objetivo de evaluar todas las etapas del ciclo de vida de dichas briquetas, desde la extracción de la materia prima hasta el fin de su vida útil, con una perspectiva ambiental, llevaron a cabo un análisis de ciclo de vida. Estos biocombustibles son usados para la obtención de calor en estufas tradicionales de Líbano. El límite del sistema englobó las etapas de 1) transporte de trabajadores al campo, 2) poda y trituración en el campo, 3) transporte de los residuos de poda, 4) manufactura, 5) empaque, 6) transporte de las briquetas empacadas, 7) venta al por menor, 8) transporte de las briquetas empacadas, 9) consumo, 10) transporte de desechos y 11) fin de vida útil (ya sea en un vertedero o reciclaje); es posible darse cuenta que este ACV es de “la cuna a la tumba”(Saba et al., 2020).

CAPÍTULO III

ANTECEDENTES

3.1. Aprovechamiento de energía en el secado de madera

Los residuos para la generación de energía, han crecido debido a su potencial como fuentes de energía limpia, asequible y renovable, sin embargo, el conocimiento sobre la disponibilidad de materia prima, los costos y los posibles proveedores de biomasa es escaso en México (Tauro et al., 2018).

Tal es el caso del estado de Michoacán, México, donde existen diferentes comunidades cuya actividad económica principal es la transformación de la madera en productos finales, por lo cual se genera una gran cantidad de residuo maderable que genera una contaminación atmosférica; al no estar cuantificada este residuo, se desconoce el potencial o alcance que pueda tener el desarrollo de los biocombustibles sólidos (BCS) y su aplicación y beneficio de las comunidades rurales (Muller, 2014), (Rios & Kaltschmitt, 2013).

Otro caso de estudio es el realizado en el estado de Michoacán, México, donde se desarrolló un proceso de fabricación de briquetas, donde la investigación abarco desde determinar el potencial de residuo maderable, la generación de un mecanismo asequible y eficiente, has la evaluación en campo de las briquetas para su rendimiento térmico, por lo cual en los últimos años se ha estado desarrollando biocombustibles con materia prima de comunidades para su aprovechamiento en esas mismas comunidades (Morales-Máximo, 2019).

La eficiencia de secado del sistema se define como la energía utilizada para evaporar la humedad en el producto dividido por la entrada de energía en el secador. El estudio de los secadores solares, se ha aprovechado para la disminución del tiempo de secado de un determinado producto que puede ser agrícola o forestal, en los últimos años se han realizado diferentes tipos de diseño y funcionamiento de estos dispositivos utilizando fuentes de energía renovable, tal es el caso del secador tipo de túnel solar AIT tiene un Anchura de 1.8 m y una longitud total de 8.25 m (Chavan et al., 2011).

Existen diferentes formas de secar la madera, entre ellas una de las más comunes a nivel local y nacional es el secado natural o al aire libre, donde el agua que

contiene la madera se evapora en forma natural por la ventilación y la radiación solar, otra práctica de forma más industrial es el secado artificial que se realiza a través de equipos o cámaras de vacío, donde se elimina el agua que contiene la madera de forma controlada, evaluando parámetros como temperatura, humedad, ventilación principalmente. Otro tipo de secado para madera es a través de los secadores solares, como se mencionó anteriormente, este tipo de secadores de baja temperatura pueden dar la oportunidad de controlar diferentes factores que intervienen en el secado, evitando así defectos muy notorios como el agrietamiento de la madera (Martínez-Pinillos Cueto, 1997)

Un diagnóstico de la industria de la madera y mueble en la ciudad de Cuenca, Ecuador, resaltó la importancia del proceso de secado y la necesidad de obtener madera seca para que sea utilizada en dicha industria (Martínez-Pinillos Cueto, 1997).

Al tener la madera estabilizada a un cierto contenido de humedad, se pueden obtener muchas formas y secciones más fácilmente, que, con otros materiales, posee una alta capacidad de absorción de energía de deformación, lo que hace factible que la madera sea utilizada para fines estructurales. El secado solar es un proceso que se ha utilizado en distintas partes del mundo, pero principalmente en Asia y Africa (Milota & Wengert, 1995). Esta tecnología se puede considerar como intermedia, entre los dos métodos utilizados con mayor frecuencia entre el sector de transformación de la madera de nuestro país, que son el secado al aire libre y el secado convencional, el cual usa como fuente generadora de calor con serpentines con vapor de agua en su interior (Martínez-Pinillos Cueto, 1997), o bien simplemente con la circulación de aire caliente. Tanto en el secado en estufa como en el secado al aire, el agua es removida de la superficie de la madera por evaporación, la velocidad de evaporación es controlada por la temperatura, la humedad del ambiente y la velocidad del aire que pasa a través de la pila de secado.

En el secado al aire, cuando la madera está expuesta a la radiación directa del sol, la temperatura superficial de las piezas de madera puede llegar a ser muy superior a la temperatura del aire en circulación, esta situación generalmente propicia

condiciones de secado muy severas, que se manifiestan en defectos en la madera como torceduras, grietas o rajaduras en los extremos, entre otras deformaciones. (Simpson, 1991). Un secador de baja temperatura como pueden ser los secadores solares nos puede dar la oportunidad de controlar estos factores, evitando así estos defectos mencionados.

En México existen distintos tipos de secadores comerciales (Fuentes-Salinas et al., 2003a). Así, el estudio del secado de madera es un tema que se ha sistematizado con el paso del tiempo, sin embargo, el desarrollo de tecnología para estos dispositivos, no ha logrado que ésta sea apropiada a las necesidades de la población objetivo. Otro factor es que en el país se seca poco volumen de madera por métodos artificiales o estufas convencionales debido principalmente a que estos métodos de secado son bastante elevados en los costos de inversión (Fuentes-Salinas et al., 2003a), lo cual limita que muchos trabajadores de la madera no tengan la capacidad económica para secar artificialmente su madera; considerando lo anterior, una alternativa es la construcción y utilización de secadores solares con el apoyo de un respaldo térmico.

CAPÍTULO IV

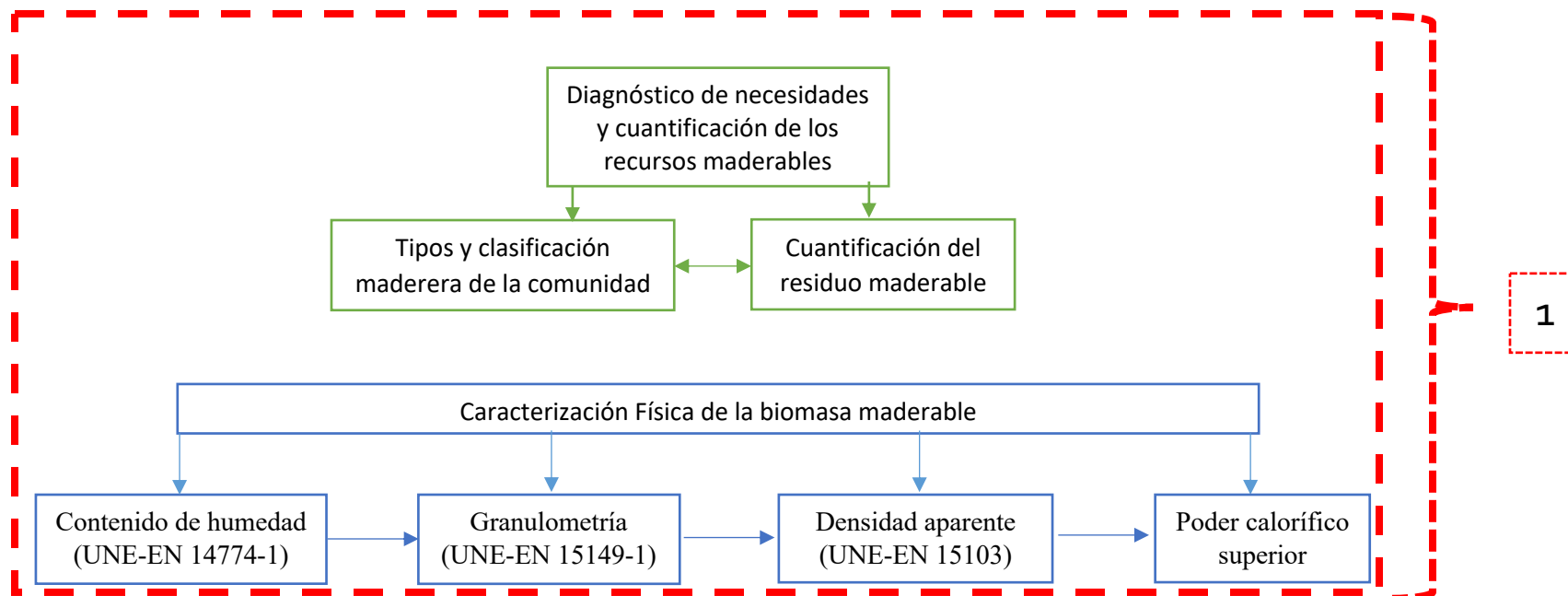
MATERIALES

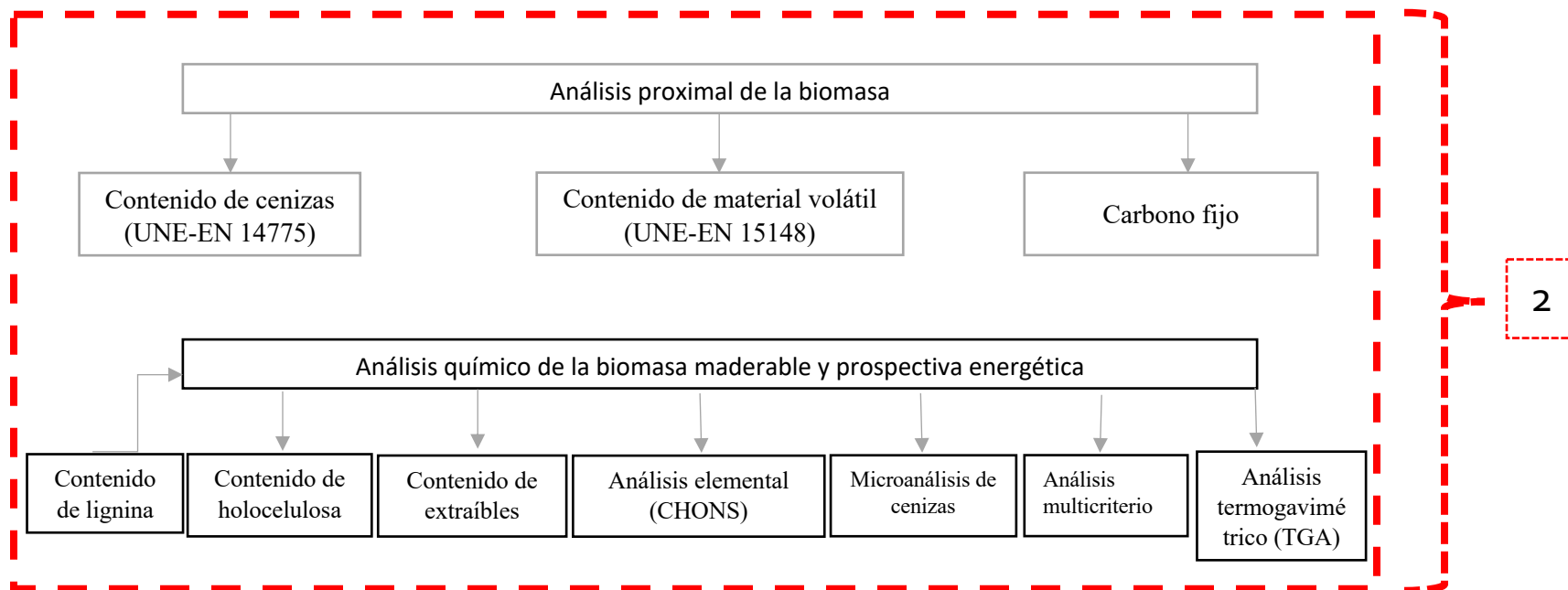
Y

MÉTODOS

4.1. El diagrama metodológico

La metodología propuesta para esta investigación estará enfocada en 3 fases disciplinarias que a continuación se describe cada una de ellas (Figura 4.1).





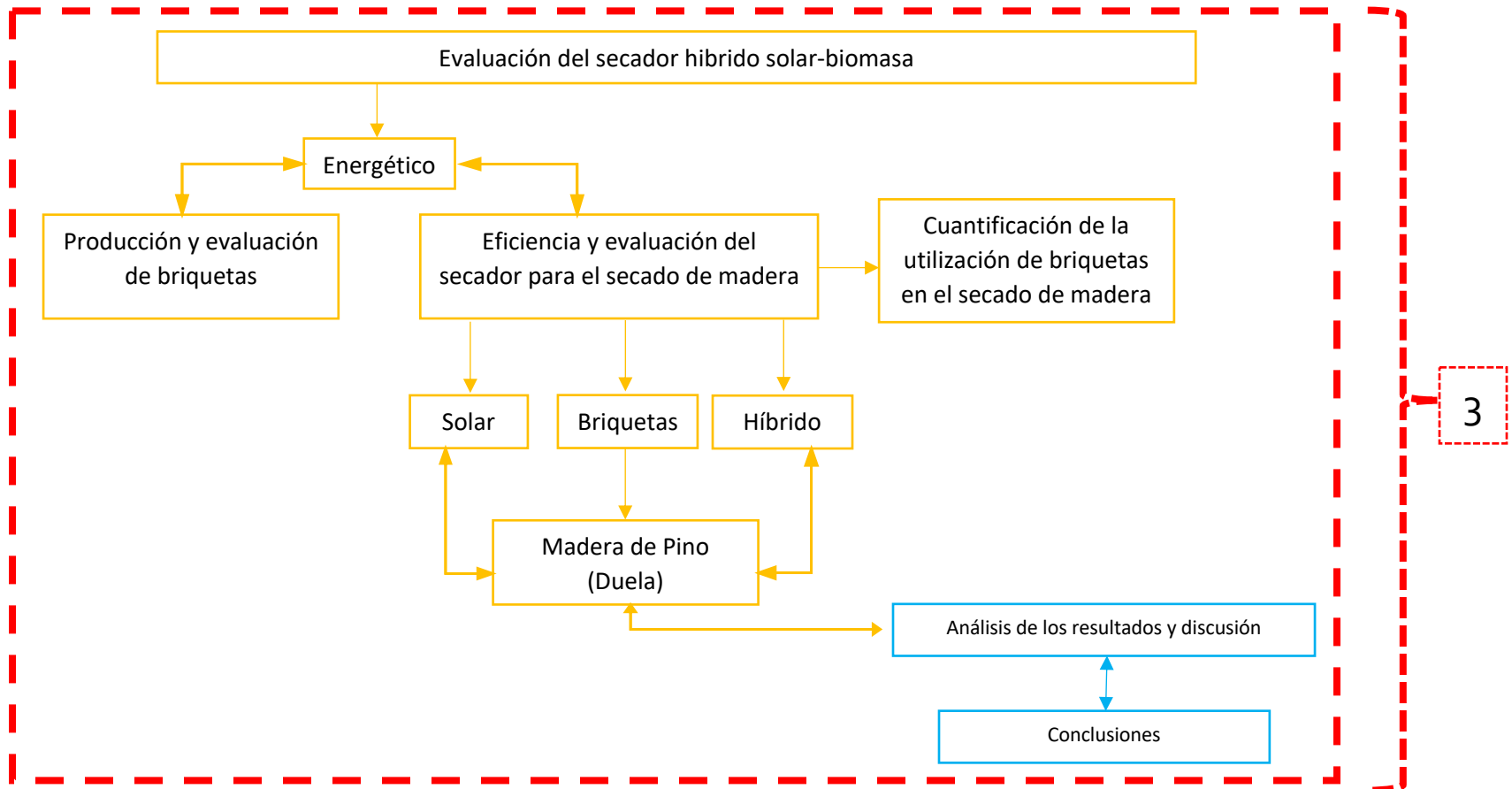


Figura 4.1. Marco metodológico

4.2. El caso de estudio

El estudio se realizó en San Francisco Pichátaro, Michoacán, México; en la Figura 4.2 se muestra la comunidad objetivo.



Figura 4.2. Comunidad objetivo San Francisco Pichátaro y su ubicación geográfica

Esta comunidad pertenece al municipio de Tingambato y a la subregión de la meseta *p'urhépecha*. Forma parte de la Cuenca de Pátzcuaro. El poblado tiene una extensión de 9088 ha y está ubicado en la zona del municipio de Tingambato, en el estado de Michoacán en el occidente de México, siendo sus coordenadas 19°31'09", 19°38'29"N latitud y 101°45'53", 101°52'20"O longitud. La región circundante se llama "Meseta Purépecha", la cual está rodeada de altas montañas, a una altitud de 2350 m.s.n.m. (Herrera-Arroyo et al., 2021). Pichátaro obtuvo la titularidad de bienes comunales por decreto presidencial el 23 de diciembre de 1953, y está conformado por siete barrios: Santo Tomás 1° y 2°, San Bartolo 1° y 2°, San Francisco, Santos Reyes y San Miguel (CREFAL, 2000).

La comunidad tiene una población total de 5696 habitantes, de los cuales 2776 son hombres y 2920 mujeres, de acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020) donde 727 de ellos son dueños de los recursos naturales que la comunidad posee según el padrón de comuneros y la Secretaría de la Reforma Agraria, los cuales están constituidos principalmente por el bosque, ecosistema que los habitantes aprovechan para obtener sus ingresos para la subsistencia diaria, ya sea por medio de los bienes maderables (BM) o bienes no maderables (BNM).

4.3. Diagnóstico de necesidades de los recursos maderables

El bosque de la comunidad está conformado por una gran biodiversidad pese a su deterioro por la tala clandestina, incendios y plagas; en él viven una gran variedad de plantas y animales, muchos en condiciones de endemismo y en peligro de extinción. El bosque está cubierto por varias especies de pino y encino, predominando en el caso de pino las especies cancimbo (*Pinus pseudostrobus*), lacio (*Pinus montezumae*) y pino chino (*Pinus leiophylla*); en los encinos el encino avellano (*Quercus rugosa*) y el encino laurelillo (*Quercus laurina*) (Francisco Arriaga et al., 2011) (Morales-Máximo et al., 2019) (Figura 4.3).

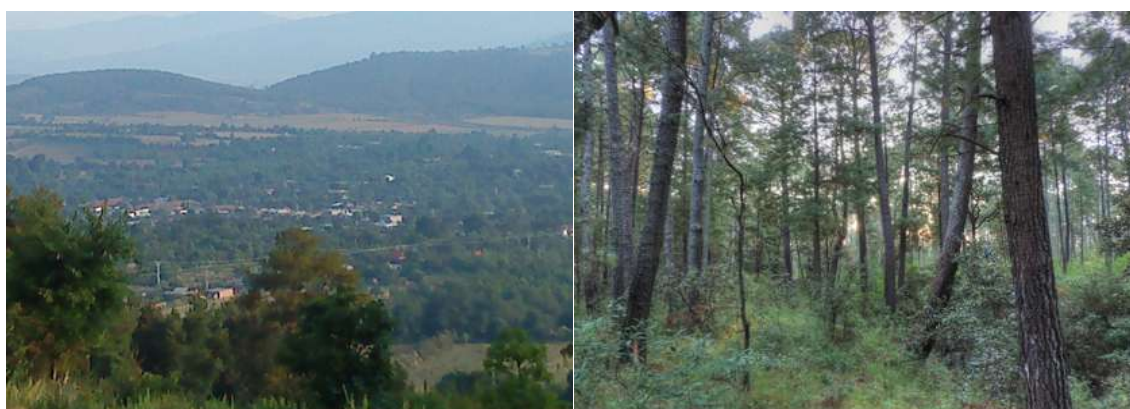


Figura 4.3. El recurso forestal de la comunidad de Pichátaro

4.4. Cuantificación del residuo maderable y su potencial energético

Para determinar los porcentajes de consumo, aprovechamiento de la materia prima y desecho de los residuos maderables en talleres artesanales no industrializados de la comunidad de San Fco. Pichátaro, se realizó un diagnóstico, con visitas domiciliarias a los 50 talleres seleccionados aleatoriamente durante un mes y medio, donde fue necesario caracterizar cada taller en términos de residuo maderable (VER ANEXO 1). Para determinar el residuo maderable se tomó la misma muestra de los 50 artesanos encuestados, con una bolsa para basura (costal) se llenó ese costal con viruta y después con aserrín y con una báscula eléctrica manual se determinó su peso respectivamente, los lugares seleccionados se pueden observar en la Figura 4.4 enmarcados con diferentes colores en un mapa de la comunidad de estudio.

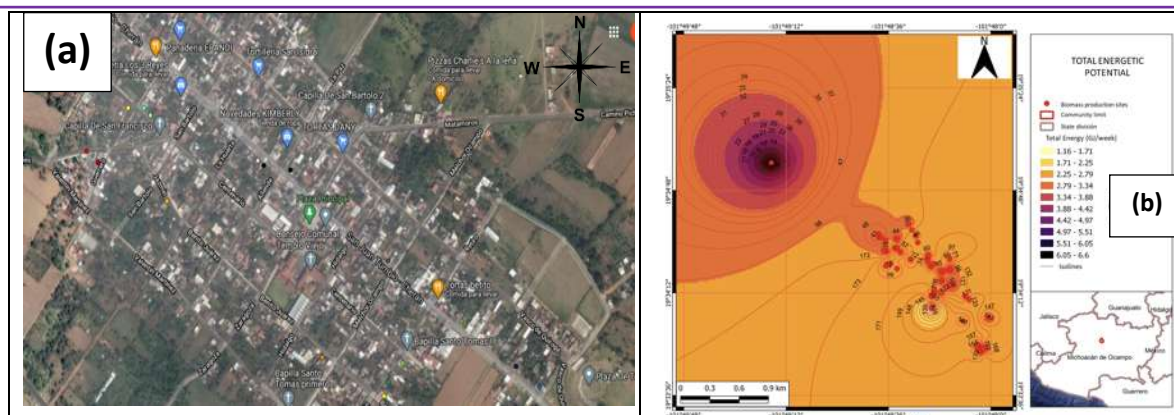


Figura 4.4. a) Distribución de los talleres para determinar los tipos de madera utilizada y el aserrín generado San Fco. Pichátaro 19° 34" N, 101° 40" O altitud 2350 m.s.n.m., b) Energía emitida en cada una de las ubicaciones del taller

Posteriormente, se eligieron 5 talleres aleatoriamente de los 50 artesanos encuestados, esto con la finalidad de tomar 5 muestras de viruta y 5 muestras de aserrín ver (Figura 4.5) de esos talleres tal y como marca la metodología propuesta para esta investigación, para su posterior análisis.



Figura 4.5. Cuantificación de la materia para su posterior análisis

El potencial energético de la biomasa se obtiene a partir de la relación que existe entre la masa de residuo seco (Mrs) y la energía del residuo por unidad de masa (E) también conocida como Poder Calorífico (PC). En la ecuación 1 se expresa la relación existente entre las variables y se plantea un modelo matemático aproximado (Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016).

$$PE = (Mrs) * (E) \quad (1)$$

Dónde:

PE : Potencial energético [Tj/año]

Mrs : Masa de residuo seco [t/año]

E: Energía del residuo por unidad de masa [Tj/t]

PC: Poder calorífico (MJ/kg)

4.5. Estimación del consumo de madera y gasto económico

En la comunidad de estudio existen diferentes tipos de madera de medidas no nominales, como ocurre comúnmente en las madererías certificadas. Para este estudio se está enfocando la implementación de un secador híbrido que seque madera de máximo 2 metros de longitud y con un espesor de 1 cm como máximo (García-Bustamante et al., 2018).

En el caso de la comunidad de Pichátaro se tiene identificado dos tipos de madera de esta denominación, conocida como duela. La primera duela tiene las siguientes dimensiones: 1 metro de longitud, 15 cm de ancho y 15 mm de espesor; la segunda duela tiene las siguientes medidas: 2 metros de largo, 15 cm de ancho y 15 mm de espesor, en ambas maderas lo único que cambia o es diferente una de otra es la longitud (Chang et al., 2017).

Para la estimación de la cantidad de madera utilizadas en los diferentes talleres de la comunidad, se tomó como base a los mismos 50 artesanos encuestados, y se les preguntó, qué en promedio, cuanta madera de la denominada duela utilizan a la semana para la fabricación de sus diferentes muebles. Posteriormente se realizó un cálculo para estimar el gasto económico por la compra de esa madera (duelas), fijando como precio \$16.00 pesos mexicanos o \$0.80 USD actuales al año 2020 (VER ANEXO 2).

4.6. Trabajo de laboratorio

En términos generales las briquetas se clasifican para uso industrial y para uso no industrial, pero el uso de las briquetas es muy amplio y la limitación de la briqueta dependerá de la materia prima y la tecnología para la fabricación. Entre los usos no industriales se encuentran como medio de calefacción y para la preparación de alimentos en hogares campesinos o rurales (Morales-Máximo & Rutiaga-Quñones, 2018). En la producción de las briquetas se deben tomar ciertos parámetros, como contenido de humedad, poder calorífico y contenido de cenizas, esto con el fin de

determinar qué tan bueno es el biocombustible que se produjo (Orihuela et al., 2016). Previo a la elaboración de las briquetas, es importante llevar a cabo ciertos análisis de la materia prima que se utilizará, cómo por ejemplo, y en nuestro caso son los siguientes:

4.6.1. El contenido de humedad

La Norma UNE-EN 14774-1 (2010) establece el método de ensayo mediante el secado en estufa. En él se somete a la muestra a una temperatura de 105°C hasta que la masa se mantenga constante, se determina mediante la pérdida de peso por secado, mediante el cual se calienta la muestra y se registra la pérdida de peso debida a la evaporación de la humedad (Figura. 4.6).

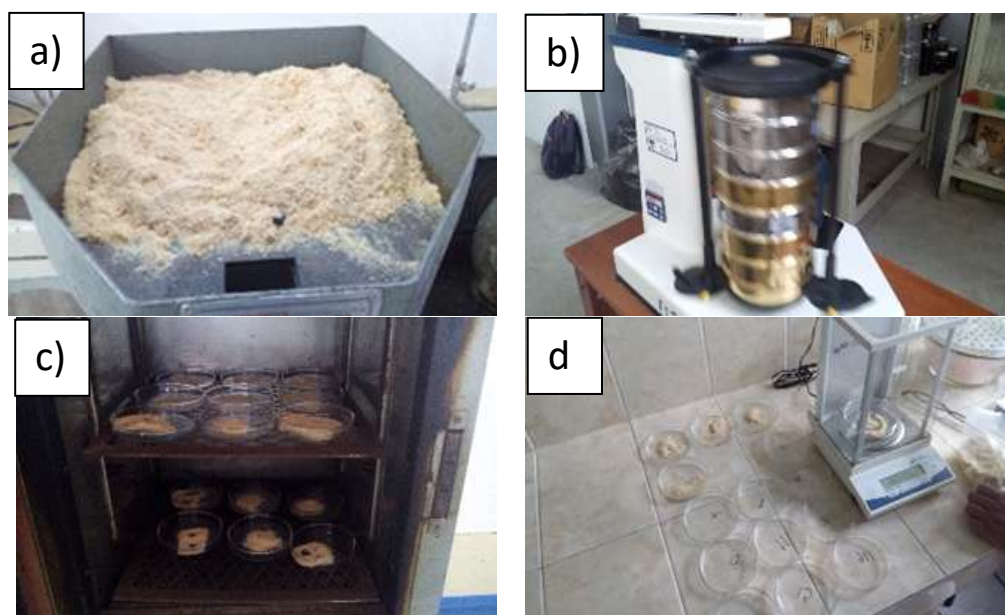


Figura 4.6. a) Muestras a analizar, b) Tamizado, c) Colocación de las muestras en la estufa de secado hasta peso constante, d) Peso de un gramo de la muestra y colarlo en la caja Petri

Esta característica es muy importante debido a que el poder calorífico de cualquier biocombustible forestal disminuye al aumentar la humedad del mismo (Correa-Méndez et al., 2018).

4.6.2. Granulometría

Para este análisis se utilizaron muestras de aserrín y viruta que con anterioridad se habían obtenido del diagnóstico de la comunidad de Pichátaro. La distribución de la

granulometría se determinó siguiendo la norma UNE-EN 15149-1 (2011) empleando para ello un tamiz vibrante como se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Tamiz vibrante. Para este caso se detalló una serie de tamices de malla metálica de especificaciones y tamaños normalizados como los que se muestra en la Tabla 4.1

Tabla 4.1. Número de malla establecido para la prueba

Malla/número de tamiz
3.35 mm
2.80 mm
2.00 mm
1.40 mm
0.50 mm
0.25 mm
Finos mm

4.6.3. Densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente se siguió la norma UNE-EN 15103 (2010). El mismo procedimiento se realizó para la muestra de viruta, como se observa en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Determinación del peso de la muestra de residuo maderable

4.6.4. Poder calorífico

Para la determinación del poder calorífico; se realizó mediante la norma UNE-EN 14918:2011, (2016), este análisis experimental utilizó un equipo denominado calorímetro (Figura 4.9) que es un recipiente adiabático que contiene en su interior la bomba de combustión y agua. Además, también dispone de un agitador, un termómetro y el cableado necesario para la ignición.

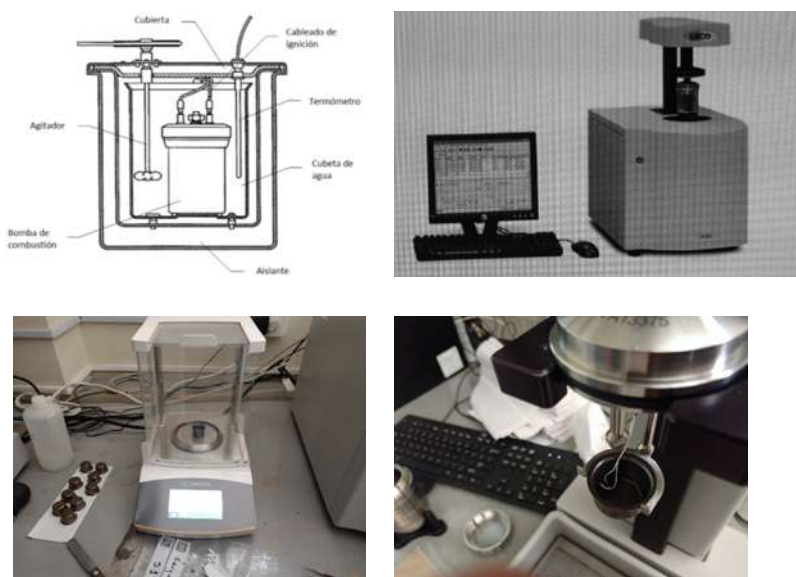


Figura 4.9. Calorímetro

4.6.5. Determinación del contenido de cenizas del residuo maderable

El contenido de cenizas se determinó mediante el procedimiento expuesto en la norma UNE-EN 14775 (2010). En este se calcina la muestra del biocombustible en aire bajo condiciones estrictamente controladas de tiempo y peso a una temperatura controlada de 550°C aproximadamente. Con ello se produce una pérdida de masa en la muestra a partir de la cual se contabiliza el contenido de cenizas. El procedimiento que se siguió para obtener los respectivos resultados se muestra en la Figura 4.10.

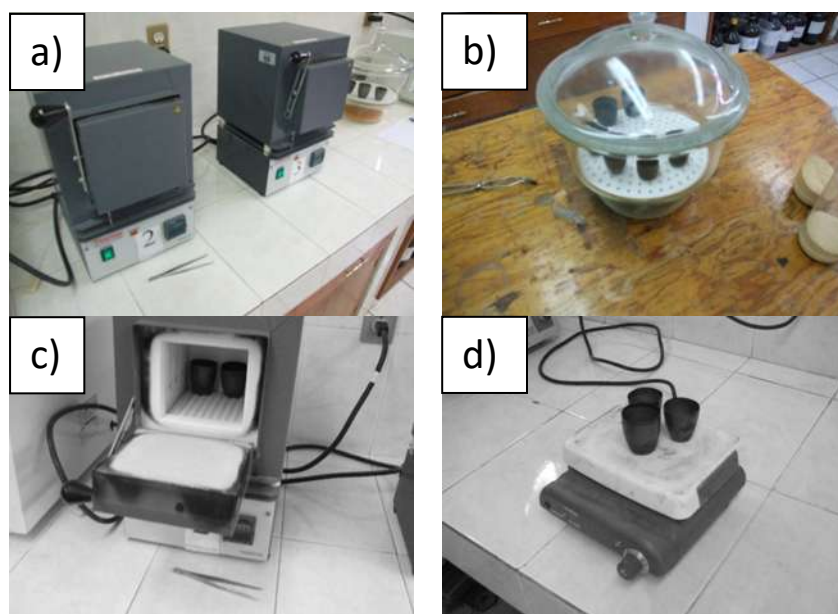


Figura 4.10. a) Mufla, b) Colocación de las muestras en los crisoles c) Calcinación de las muestras en la mufla, d) Obtención de las muestras con las cenizas

4.6.6. Determinación del contenido de materiales volátiles

Para la determinación de la cantidad de materias volátiles se realizó el siguiente procedimiento de acuerdo a la norma UNE-EN 15148 (2010) (Figura 4.11). El proceso se realizó para tres muestras de cada biomasa, dando como resultado 15 muestras de aserrín y 15 muestras de viruta.

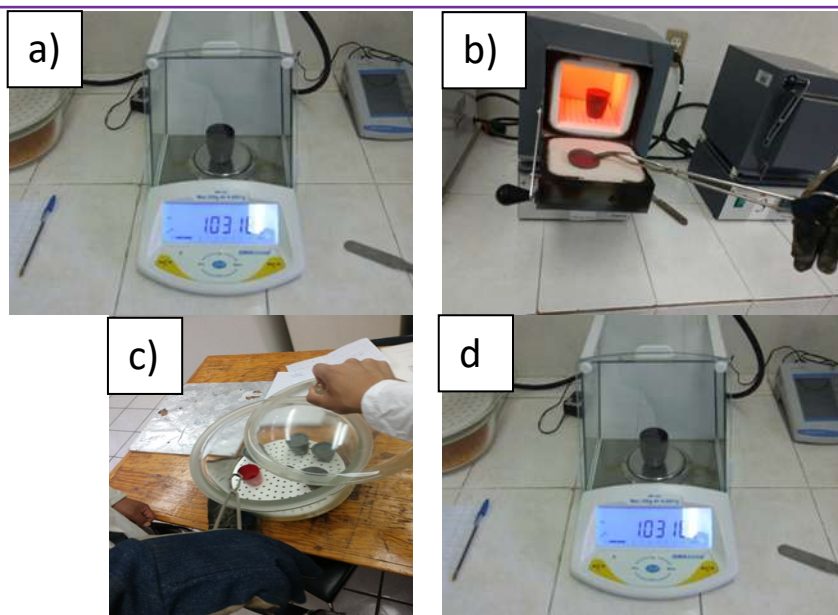


Figura 4.11. a) Colocación del crisol con la muestra, b) Crisol con la muestra fuera de la mufla, c) Colocación del crisol en el desecador, d) Obtención de los materiales volátiles

El nivel de precisión en la determinación de los porcentajes de materiales volátiles no debe diferir uno de otro en más de 2%. Para esta prueba se utilizó tres muestras de cada residuo.

4.6.7. Carbono fijo

El carbono fijo es la fracción residual del combustible que resta una vez se ha pirolizado el material volátil durante el ensayo experimental, este cálculo se realizó a través de la ecuación 2.

$$CF = 100 - CC - MV \quad (2)$$

Dónde.

CF= Es el contenido de carbono fijo en base seca (%)

CC= Es el contenido de cenizas en base seca (%)

MV= Es el contenido de material volátil en base seca (%)

4.7. Análisis químico del residuo maderable de *Pinus* spp.

La madera está formada por células vegetales muertas, en las que se distinguen tres grupos de sustancias estructurales y un cuarto grupo no estructural que son las llamadas sustancias extraíbles, además de sustancias inorgánicas. Los grupos

estructurales son: celulosa, hemicelulosas y lignina, de los cuales la celulosa tiene un papel central, puesto que forma el esqueleto o basamento de la pared celular. Por eso con frecuencia se dice que la lignina es la sustancia cementante de la celulosa. Así pues, la madera tiene una estructura fibrosa formada básicamente por celulosa, $C_6H_{12}O_5$, (50%), que constituye la estructura resistente de los vegetales, y lignina, $C_{19}H_{24}O_{14}$, que proporciona la rigidez y dureza a la madera. Además, contiene, en menor proporción, resinas, almidón, azúcares, taninos, colorantes, alcoholes, y alcanfor, que son productos de utilidad industrial (Núñez, 2004).

De acuerdo con Bernabé-Santiago et al. (2013), la composición química de la madera de los pinos mexicanos se ha estudiado para pocas especies. Pero estudios recientes realizados por Chávez-Rosales et al. (2021), muestran que la composición química de la madera y de la biomasa de pino tiene potencial para obtener biocombustibles sólidos densificados. Este análisis permite estimar el potencial energético disponible en los residuos de pino.

Para el análisis de la composición química de los principales componentes poliméricos de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina) para esta investigación, se determinaron mediante un análisis de fibras basado en el método gravimétrico denominado Van Soest utilizando α -amilasa (Goering HK, 1970). Para ello se tomaron 0.5 g de madera seca de tamaño de partícula homogénea (a través de una malla 60/40, 0.274/0.516 mm). Los análisis se realizaron tres veces para cada muestra, se utilizó un equipo ANKOM-200 (Musule et al., 2016).

4.8. Microanálisis de cenizas

La composición final de las cenizas de biomasa depende de varios factores, como son: la propia biomasa de origen, el tipo de biomasa, la especie de planta, los procesos y las condiciones de crecimiento, el tiempo de cultivo, el método de recolección o el transporte. Y también depende de las condiciones de combustión de la biomasa considerando la preparación del combustible, la tecnología y las condiciones de combustión o el sistema de recolección Vassilev et al. (2013),

encontraron que normalmente los elementos en las cenizas de biomasa decrecían en el siguiente orden: O > Ca > K > Si > Mg > Al > Fe > P > Na > S > Mn > Ti.

Para llevar a cabo el microanálisis de las cenizas de las muestras de residuos maderables, se utilizó un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) Varian (Modelo 730-ES; Varian Inc. (Agilent), Mulgrave, Australia) (Arcibar-Orozco et al., 2014); por este medio se buscó la presencia de 29 elementos químicos y el análisis se realizó sólo una vez.

4.9. Análisis elemental

El análisis elemental permite determinar el contenido elemental de un combustible, pero solamente aquellos que supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión. Así, el análisis elemental incluye el porcentaje en peso de C, H, O, N, S, cenizas, humedad (pérdida de peso a 105 °C, para combustibles sólidos) y agua combinada (equivalencia de oxígeno). En algunos casos, se deben analizar otros elementos que puedan influir en el proceso de combustión o puedan resultar problemáticos en cuanto a las emisiones o los efectos medioambientales que causan (como los halógenos o los metales). La cantidad de oxígeno presente en los combustibles reduce el poder calorífico, sin embargo, contribuye a reducir las necesidades de aire de combustión. El contenido de nitrógeno y azufre tiene un impacto directo en los efectos derivados de la lluvia ácida (Fernández et al., 2017).

El contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, y azufre se midió en un analizador elemental (Modelo 4010; Costech International S.p.A., Milán, Italia) siguiendo la norma UNE-CEN/TS 15104 EX (2008). Para este caso, se utilizó biomasa de malla 40 absolutamente seca. El contenido de oxígeno se calculó por diferencia, y el análisis se realizó sólo una vez.

4.10. Análisis termogravimétrico

Se realizó también un análisis termogravimétrico y diferencial (TGA-DTG), para estimar la cantidad de los compuestos poliméricos y contrastar este análisis con técnicas complementarias. Para la obtención de los datos y posterior análisis, la muestra seca del *Pinus* spp. con un tamaño de partícula uniforme se llevó a un

analizador termogravimétrico Perkin Elmer Simultaneous Thermal Analyzer STA 6000. La primera etapa de la degradación másica se realizó en el rango de 25°C - 105°C, se dejó en isoterma por 30 min y luego se elevó nuevamente su temperatura hasta 700°C, manteniéndose en isoterma por 20 min más. La velocidad de calentamiento fue de 15°C/min. En esta etapa se utilizó argón como gas inerte de alta pureza (99.99%) con un flujo de 150 mL/min. La segunda parte de la rampa de calentamiento se llevó a cabo en aire con un flujo de 50 mL/min, se mantuvo en isoterma por 20 min y posteriormente se realizó el enfriamiento a 30°C/min desde 700°C a temperatura ambiente. En la termobalanza del equipo, se utilizó un crisol cerámico donde se colocaron aproximadamente 6 mg de muestra de *Pinus* spp., con el fin de reducir los efectos de transferencia de masa y calor. Es importante mencionar que antes de realizar cada experimento, se realizó una purga en argón durante 25 minutos con un flujo de 80 mL/min. El proceso de pirólisis se realizó por triplicado.

4.11. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio se realizó utilizando indicadores de sustentabilidad, considerando la metodología de análisis multicriterio y de evaluación de la sostenibilidad (Lopez-Ridaura et al., 2000), con la ayuda del programa MULTIBERSO (López-Sosa & Morales-Máximo, 2022)., esto con el objetivo de establecer un marco normativo que nos ayude a pontencializar los aciertos y debilidades con respecto a los análisis realizados en esta investigación.

4.12. Elaboración de las briquetas

Para la elaboración de las briquetas se llevó el siguiente proceso (Figura 4.12):

- (1) Mezcla de los materiales, aserrín, viruta y aglomerante
- (2) Vacío de la mezcla para su posterior compactación para la generación de briquetas, en una máquina briqueteadora manual
- (3) Desmolde y secado de la briqueta

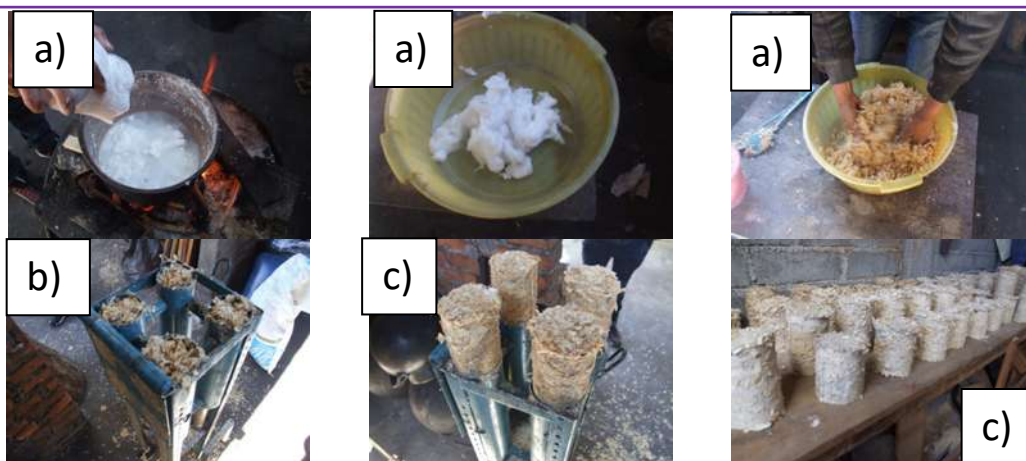


Figura 4.12. (a) Mezcla de todos los materiales, (b) Colocación de la mezcla en la máquina briqueteadora, (c) Obtención y secado de las briquetas

4.13. Evaluación del secador híbrido solar-biomasa

Para la evaluación del secador en la Tabla 4.2 se muestra la lista de materiales con su respectiva descripción.

Tabla 4.2. Equipos utilizados para las pruebas de secado

INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	
Equipo	Descripción
	HT-9815 Digital K termómetro de termopar de 4 canales para termopar sensor de la sonda de temperatura industrial de 200 °C—1372 °C, este termómetro es con la finalidad de detectar la temperatura del agua de entrada y la temperatura de agua de salida dentro del serpentín del secador de madera.
	Termómetro Infrarrojo KY-111 KANGJI temperatura corporal Kangji termómetro temperatura, este instrumento nos ayudó a medir la cantidad de energía desprendida por las briquetas dentro de la cámara de combustión.

	Balanza Digital 10kg Alimentos Cocina Digital Gramer, es para pesar el número de briquetas utilizadas en el secado de madera.
	Medidor de Humedad Madera AMA005. Equipo portátil para medir humedad + temperatura en 1 solo equipo en madera, Temperatura 10-50°C. Se utilizó para medir la humedad y con ello la pérdida de peso de las probetas de madera colocadas dentro del secador.
	Esplic Termómetro Digital Higrómetro, Temperatura, Humedad y Reloj Grabadora. Se utilizó para registrar la temperatura ambiente al momento de realizar las pruebas de secado.
	Cámara termográfica CamInfra, MXCIM-001-004. Se utilizó para conocer la emisividad de calor dentro de la cámara de secado.

El arreglo experimental completo se puede observar en la Figura 4.13.

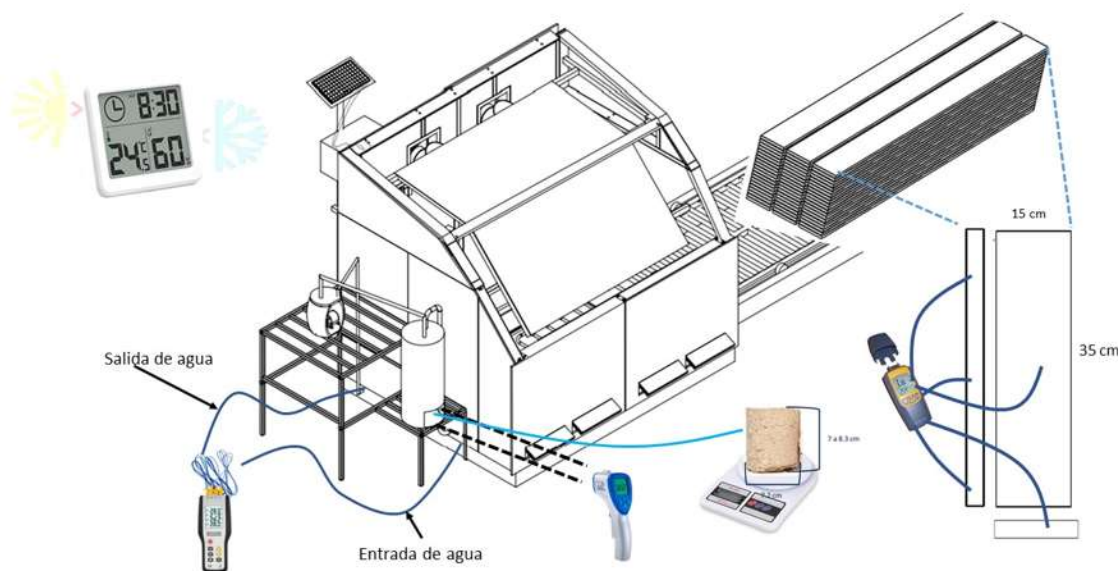


Figura 4.13. Arreglo experimental completo

Por último, en la Figura 4.14 se muestra el arreglo experimental para la obtención de calor a través de la cámara termográfica descrita.

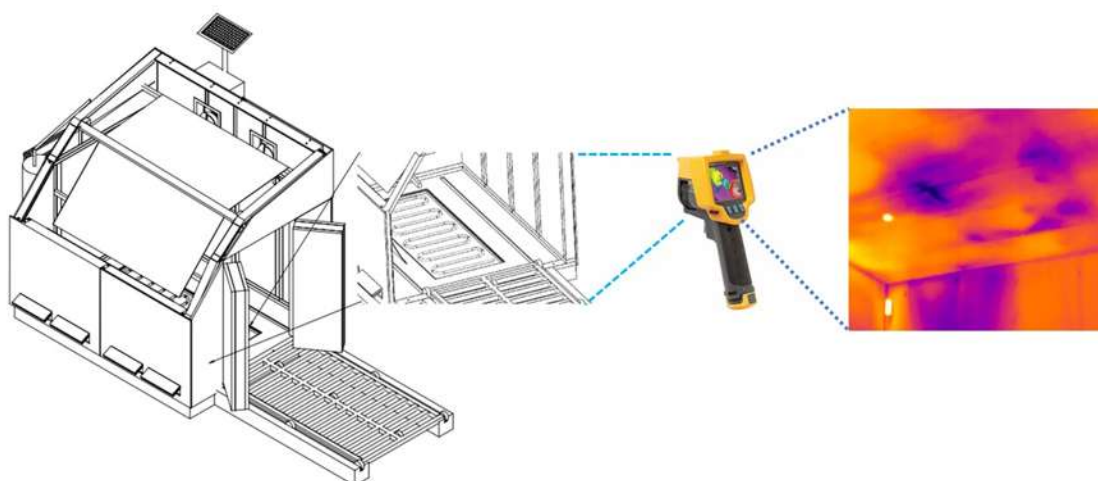


Figura 4.14. Arreglo experimental del secador con la cámara termográfica

4.14. Evaluación de la cinética de secado con energía solar

Previo a introducir la madera en el secador se cortaron varias muestras para llevar un seguimiento en el secado de la madera y conocer el contenido de humedad inicial, para ello se utilizó una balanza digital, para registrar los pesos iniciales de las pruebas e ir monitoreando el peso durante el secado. Para llevar las muestras a

un estado anhidro se utilizó un horno de microondas, lo cual sustituyó la estufa eléctrica que normalmente se utiliza para esta prueba (Figura 4.16).

Para la evaluación de la temperatura interna dentro del secador se realizaron dos pruebas preliminares donde se calentaron 10 litros de agua con 2 kilogramos de briquetas, esto con el objetivo de conocer la temperatura alcanza internamente con el fluido y la circulación de este mismo en el serpentín.

4.13.1. Evaluación de la cinética de secado con briquetas

Se seleccionaron 4 muestras, de las cuales la mayoría representaron la madera húmeda. Se cortó una muestra y una probeta de la misma tabla, estas últimas para la determinación del contenido de humedad como se muestra en la Figura 4.15 (Boyzo Correa, 2019).

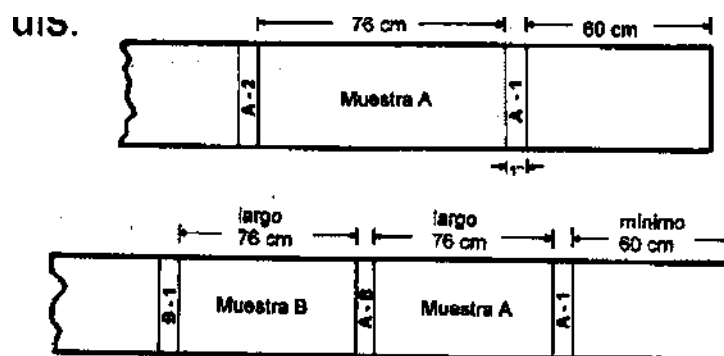


Figura 4.15. Muestreo de la madera a secar

Previo a introducir la madera en el secador se cortaron 4 muestras para llevar un seguimiento en el secado de la madera y conocer el contenido de humedad inicial. Se utilizó una balanza digital, para registrar los pesos iniciales de las pruebas e ir monitoreando el peso durante el secado. Para llevar las muestras a un estado anhidro se utilizó un horno de microondas, que sustituyó la estufa eléctrica que normalmente se usa para esta prueba (Figura 4.16).

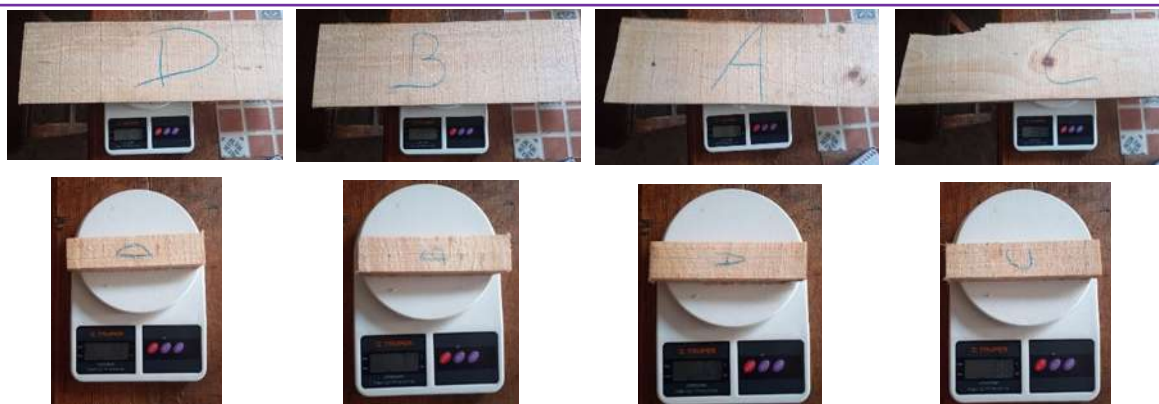


Figura 4.16. Obtención del peso de las muestras y probetas

En la Tabla 4.3 se muestran los pesos en gramos tanto de las muestras de madera, así como de las probetas.

Tabla 4.3. Pesos registrados de las muestras para el seguimiento del secado

Muestra	Peso gramos (g)	Probeta	Peso inicial (gramos)	Peso al horno (gramos)
A	1016	A	68	34
B	1032	B	72	34
C	1069	C	68	32
D	1047	D	68	31

Las probetas se secaron en un horno de microondas para determinar el contenido de humedad base seca, hasta llegar a peso constante, el cual con este registro se permitió saber el peso seco o anhidro mediante la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{Pv - Ps}{Ps} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

CH= Contenido de humedad

Pv= Peso verde

Ps=Peso seco

Pasando a colocar las muestras de secado en los extremos y lado de la pila, lo cual representaran el comportamiento de toda la pila de madera durante su respectivo secado. Posteriormente se apiló la duela de madera de pino en el secador y se

colocaron probetas de madera para evaluar la cinética de secado como se muestra en la Figura 4.17.



Figura 4.17. Báscula digital para obtener la prueba de secado

Posteriormente se apiló la duela de madera de pino en el secador y se colocaron probetas de madera para evaluar la cinética de secado, como se muestra en la Figura 4.18 y Figura 4.19.

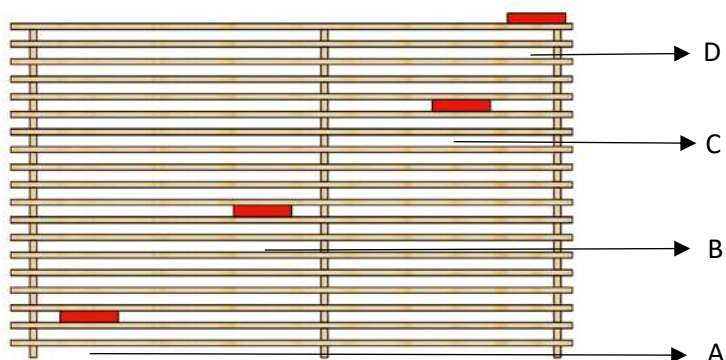


Figura 4.18. Apilado de madera e instalación de probetas (A,B,C,D)

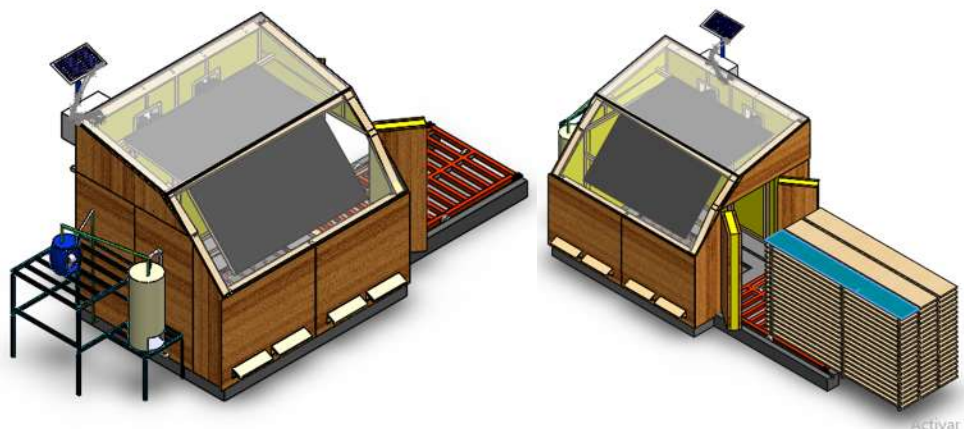


Figura 4.19. Apilado de la madera (duela)

La madera apilada (duela), en total fueron 100 duelas lo que equivale a $2 \frac{1}{4} \text{ m}^3$, de capacidad dentro del secador, la separación entre duela y duela fue de 1 cm esto con la finalidad de que el aire fluyera, a la par se colocó dentro del secador el

ventilador para el aire, la batería solar y el inversor de energía eléctrica de corriente directa a corriente alterna para el funcionamiento del secador como se muestra en la Figura 4.20.

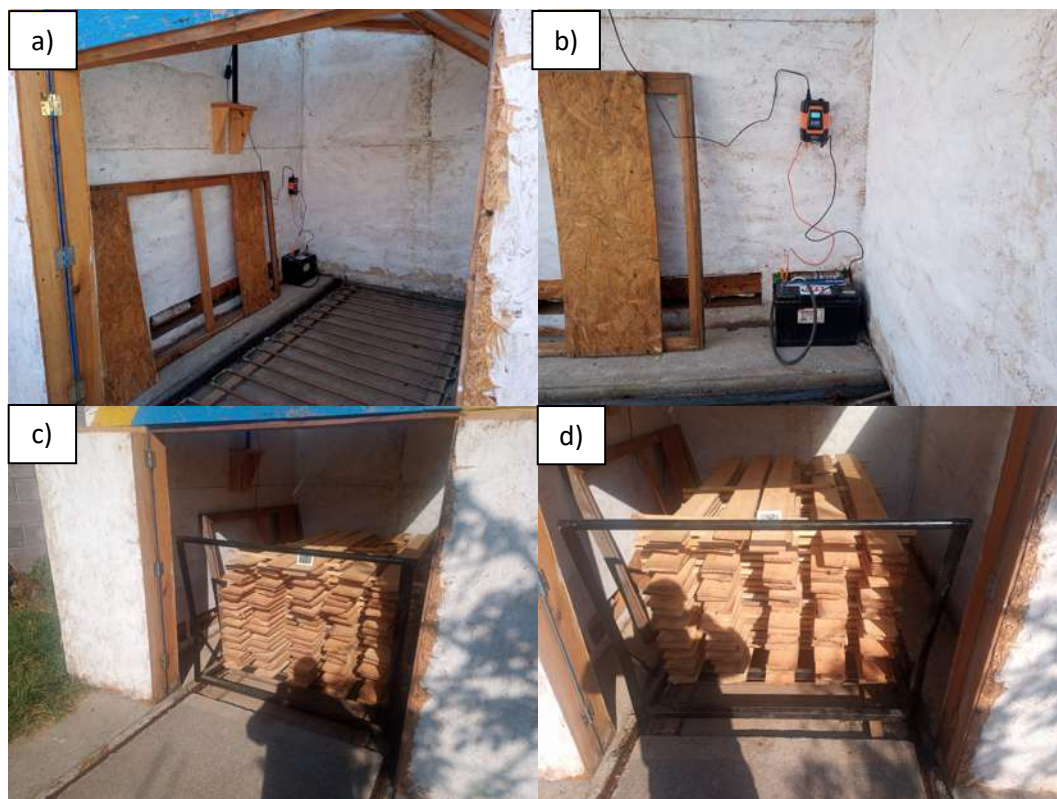


Figura 4.20. a) Instalación del ventilador, b) Instalación de la batería solar para el panel y el inversor, c) madera apilada, d) vista frontal de la madera apilada.

Para la obtención de la pérdida de humedad de la madera en las probetas, se determinó el contenido de humedad base seca de las diferentes muestras de secado, con la siguiente formula:

$$CH = \frac{Pv - Ps}{Ps} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

CH= Contenido de humedad

Pv= Peso verde

Ps=Peso seco

Las briquetas utilizadas para calentar el agua que pasará por el serpentín fueron fabricadas con residuos maderables de *Pinus* spp., de la misma Comunidad. Para

ello se fabricó un lote de este biocombustible para las tandas de secado. El control de peso y cantidad de combustible necesario para calentar agua se llevó a cabo en una balanza Gramer para 10 kg.



Figura 4.21. Briquetas utilizadas para la tanda de secado

Una vez pesadas las briquetas se colocaron en el quemador del secador (boyler) y posteriormente con 10 g de ocote de pino se procedió al encendido de las briquetas (Figura 4.22). El objetivo es calentar 20 litros (L) de agua almacenada en el termotanque que pasará al boyler para su posterior circulación dentro del serpentín del secador.



Figura 4.22. Quemado de las briquetas en el boyler

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. El bosque de la comunidad y su potencial bioenergético

Datos reportados en la literatura científica muestran que la superficie arbolada de la Comunidad de San Francisco Pichátaro para el año de 1985 (Francisco Arriaga et al., 2011) era de 3488 ha y el resto, es decir 6031 ha corresponde a área no arbolada. Teniendo la comunidad de Pichátaro una superficie total de 9519 ha, para ese año (Figura 5.1).

Superficie arbolada total de la comunidad

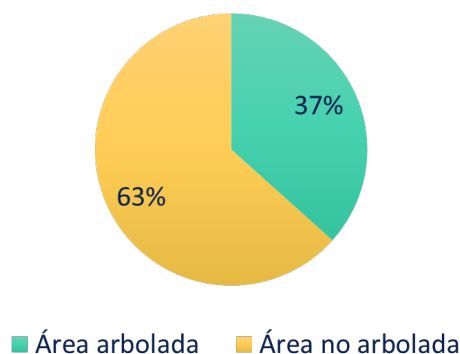


Figura 5.1. Área arbolada en el año 1985 comprendiendo un 37% (3,488 ha) de área arbolada (6,031 ha) de área no arbolada

De acuerdo con una investigación de campo y de vinculación con las autoridades del concejo comunal de Pichátaro, se ha tenido información sobre el área arbolada que actualmente se tiene en la comunidad de acuerdo a diferentes programas de reforestación por parte de CONAFOR que han llegado a la comunidad a partir del año 2010, siendo aprobadas más de más de 800 ha además de la recuperación de terrenos en renta para uso de cultivo agrícola la comunidad cuenta con una superficie total de 8,484.25 ha, de las cuales 4,033.90 ha se encuentran reforestadas esto para el año 2015 (Cuencas et al., 2014).

Datos reportan que para el año 2001 la comunidad tenía una área arbolada de 3,488 ha, que representa el 29 % de la superficie total del bosque (Francisco Arriaga et al., 2011). Una vez generado el programa de reforestación el área reforestada para el año 2015 fue de 4,033.90 ha, que representa el 34% del total de la superficie y siendo el 37% de área no arbolada que corresponde a 4,433 ha que son tierras destinadas para otro tipo de actividad económica como el cultivo agrícola (Figura 5.2).

Superficie arbolada total de la comunidad

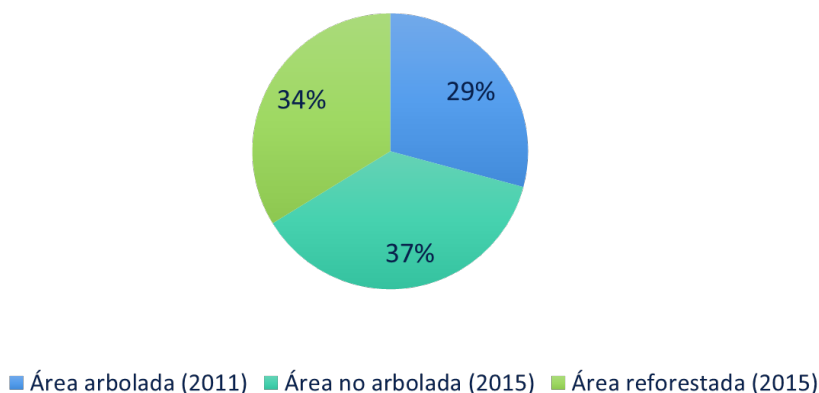


Figura 5.2. Área total forestal de la comunidad con superficie arbolada y no arbolada

Los datos obtenidos en el diagnóstico de acuerdo con la metodología propuesta en esta investigación muestran que las especies más utilizadas para obtener el recurso maderable corresponden al género *Pinus*. Así mismo la madera utilizada es derivada de los propios bosques de la comunidad, por lo cual se demuestra que el residuo maderable para la producción de briquetas es originario de la misma comunidad. Los kilogramos cuantificados de residuo maderable generados por semana son alrededor de 2,324 kg de aserrín (± 15.08) y 5,532 kg de viruta (± 17.65) por taller cuantificado, representado que el 33.40% corresponde al aserrín y 66.59% la viruta como se muestra en la Figura 5.3.

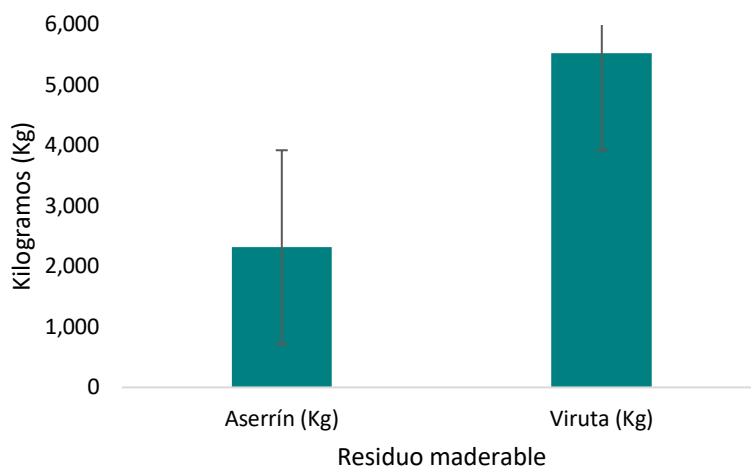


Figura 5.3. Residuo más generado en la comunidad

De acuerdo con la identificación del residuo maderable de la comunidad muestra, se estima que el aserrín de los 2,268 kg generados a la semana eso se traduce que

al año la generación de 108,864 kg (108.86 toneladas/año), en lo que corresponde a la generación de viruta se estima que al año se genera 260,064 kg (260.06 toneladas/año). Aplicando la ecuación 1 el potencial energético que puede llegar a tener el residuo biomásico de la comunidad de estudio para el aserrín es de 1,948.59 TJ/tonelas equivalente a 1.94 PJ, para el caso de la viruta fue de 4,655.07 TJ/toneladas, equivalente a 4.65 PJ, lo cual representa un potencial energético considerable para la generación de bioenergía. Casos de estudio en México muestran un potencial energético sobre el uso de la biomasa para el suministro de energía para hoy y el dos décadas por venir, para lo cual se tiene un potencial estimado de biomasa para la producción de energía de 2.228 PJ/a en promedio (Rios & Kaltschmitt, 2013). Otro estudio realizado en México muestra el potencial de bioenergía y costos para la utilización de biomasa leñosa forestal para uso energético en una escala regional, el potencial teórico energético disponible fue de 45.96 PJ para 2013 (Hernández et al., 2017). Por último, un caso regional, centrado en tres especies con las tasas de utilización más altas (*Pinus* spp., *Quercus* spp. y *Abies* spp.). Se realizó un análisis de pronóstico para el año 2023, en el cual se calculó un potencial técnico de 60.22 PJ, lo que significa un logro de las metas marcadas por la Nacional Consejo Forestal sobre hectáreas en aprovechamiento sostenible (Flores Hernandez et al., 2020). México no es el único país en América Latina que estima su potencial energético de biomasa para suministrar su energía primaria en generar fuentes de energía a través de la biomasa leñosa de residuos forestales; casos como Colombia tiene un interés obvio en la biomasa; la cual en el año 2009 contribuyó con 3.4 PJ, en generar energía eléctrica, 15.7 PJ del suministro de energía en el sector transporte y 193.5 PJ del suministro total de energía primaria (Gonzalez-Salazar et al., 2014).

5.2. Consumo de madera y gasto económico representativo

Como resultado del diagnóstico exploratorio, en la Figura 5.4 muestra que la madera (duela) es una de las maderas más utilizada con frecuencia a la semana por los artesanos de la comunidad, para la fabricación de muebles (dimensiones: ancho 15 cm, largo 2 metros y espesor 15 mm).

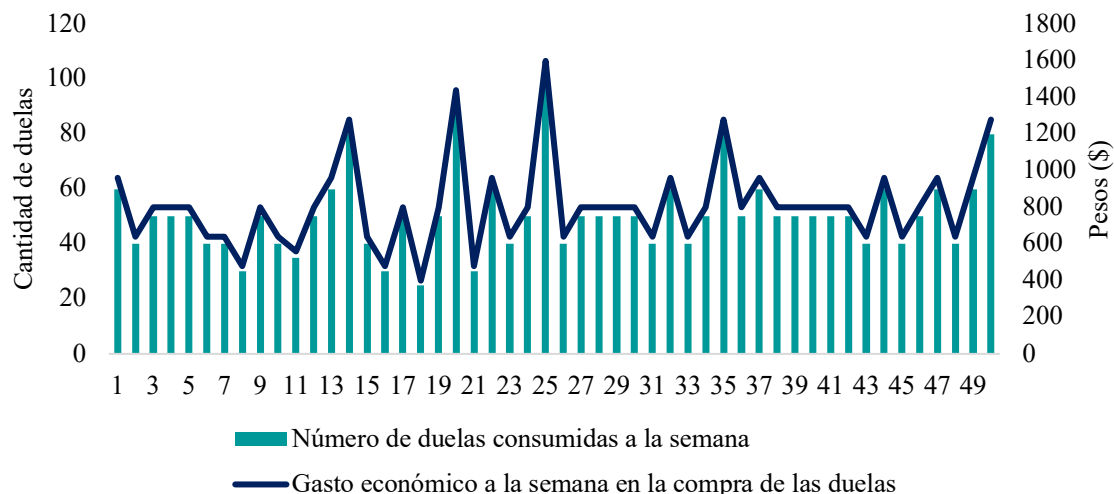


Figura 5.4. Duelas utilizadas por 50 artesanos a la semana y el costo que representa esa utilización

La Figura 5.4 muestra que la cantidad de madera (duelas) utilizadas a la semana por los 50 artesanos es de 2,540 duelas (± 14.70), lo que representa en promedio por artesano 50.8 maderas (duelas) a la semana; el costo económico que representa este consumo maderable a la semana, fijando un precio de \$16.00 pesos (MXN) o \$0.80 USD correspondiente al año 2020, es de \$40,640.00 (MXN) = \$2,044.64 USD, es decir, en promedio un artesano gasta a la semana \$812.8 (MXN) = \$40.89 USD, en el consumo de duela para sus diferentes muebles. Aunado a la evaluación cualitativa con los artesanos, por ello este análisis sugiere un secador de madera como el propuesto por López-Sosa et al. (2019), el cual no deberá ser muy grande, porque los talleres son pequeños y secan madera en pequeñas cantidades. Además, madera seca es más sencilla de manufacturar y genera muebles de mejor calidad.

5.3. Contenido de humedad

La humedad inicial encontrada para las muestras de residuo maderable recolectado en los talleres artesanales se puede observar en la Figura 5.5, que corresponden a las muestras de aserrín (MA) y muestras de viruta (MV), y cuya humedad inicial osciló entre 9.54% a 33.33% de humedad, estando por debajo de datos reportados (Correa-Méndez et al., 2018) para este parámetro.

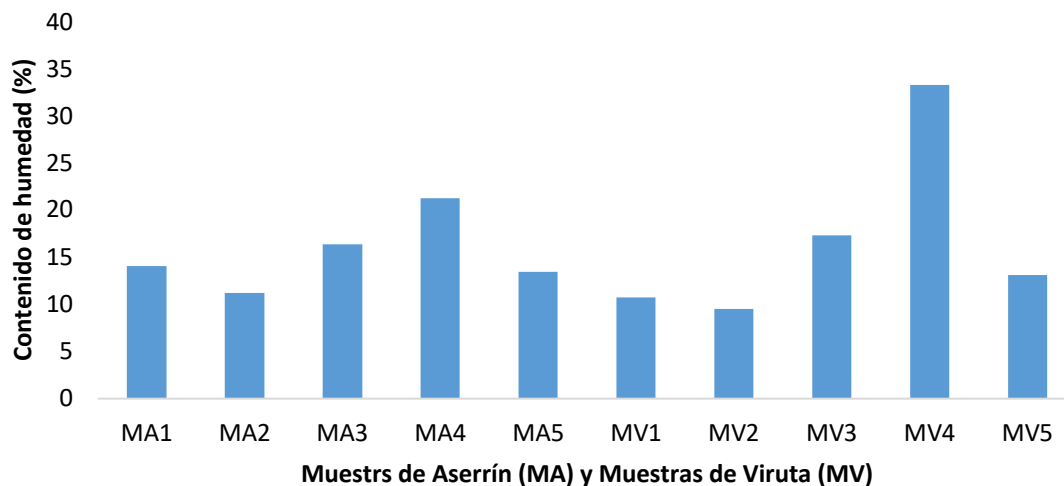


Figura 5.5. Humedad de inicial de las muestras de aserrín (MA) y las muestras de viruta (MV)

Una vez estabilizadas las muestras de acuerdo a la norma UNE-EN 14774-1 (2010) la humedad final se encontró entre el 15.30% para aserrín al 16.82% para la viruta (Figura 5.6), los datos se encuentran en el rango reportado previamente (Pintor-Ibarra, Carrilho-Parra, et al., 2017), incluso por debajo de otros datos reportados (Correa-Méndez et al., 2014).

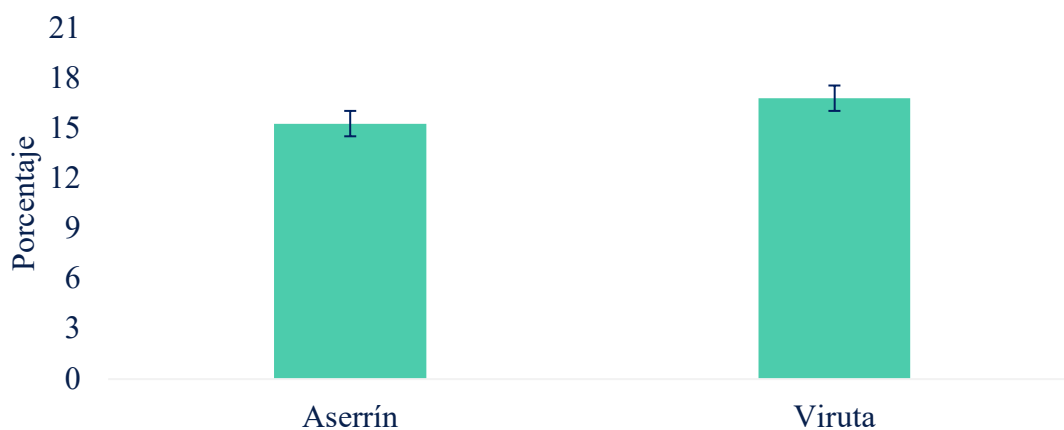


Figura 5.6. Contenido de humedad final

5.4. Granulometría

Los resultados sobre la granulometría muestran que para las muestras de viruta el tamaño de partícula sólo el 25% de lo tamizado puede ser aprovechado para la fabricación de briquetas, el 52% puede ser utilizado para la fabricación de pellets, y el 25% de las muestras, sugiere el aprovechamiento mediante dos opciones:

primero volver a moler y obtener un nuevo porcentaje; y segundo, integrarlo a otro lote de biomasa para otra tamización.

El análisis granulométrico para el aserrín muestra que el 61%, puede ser aprovechado para fabricar briquetas. El 29%, se puede utilizar para otro tipo de biocombustible (Pellets). El 10%, pueden derivarse en dos opciones, el primero volver a moler y obtener un nuevo porcentaje, el segundo integrarlo a otro lote de biomasa para otra tamización, ambos casos se pueden observar en la Figura 5.7.

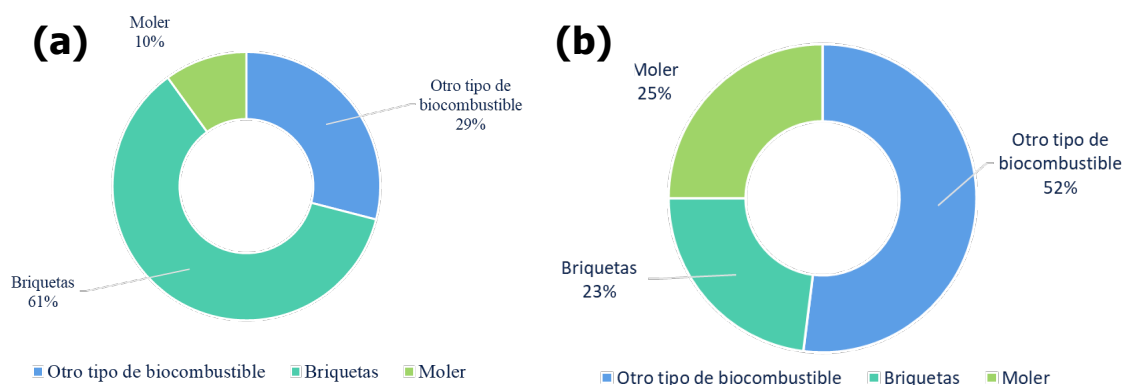


Figura 5.7. Porcentaje del potencial de aprovechamiento para briquetas a) Material de aserrín, b) Material de viruta

5.5. Densidad aparente

Las densidades aparentes reportadas en maderas de coníferas muestran valores de 160 y 330 kg/m³ (Correa-Méndez et al., 2018). La densidad a granel, para las muestras de viruta oscilan entre 40.49 a 57.88 kg/m³ mientras que para las muestras de aserrín, presentan valores de 143.89 a 196.91 kg/m³, otros datos reportan valores entre 160 y 235 kg/m³ (Ortiz et al., 2003) (Morales-Máximo et al., 2020). La densidad aparente para las muestras de viruta en esta investigación se encuentran dentro de los parámetros aceptables reportados por investigaciones anteriores (Pintor-Ibarra et al., 2017).

5.7. Poder calorífico

El poder calorífico es la característica fundamental de un combustible, el cual lo define como tal. Altos poderes caloríficos indican buenos combustibles y bajos poderes caloríficos señalan malos combustibles. Para el caso del poder calorífico de las muestras analizadas los resultados se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2.

Tabla 5.1. Poder calorífico de las muestras de Aserrín

MUESTRAS	PODER CALORÍFICO (MJ/kg)
Aserrín 1	17.8
Aserrín 2	18.1
Aserrín 3	17.7
Promedio	17.8
SD	0.20

Tabla 5.2. Poder calorífico de las muestras de viruta

MUESTRAS	PODER CALORÍFICO (MJ/kg)
viruta 1	17.7
viruta 2	18.1
viruta 3	18.3
Promedio	18.0
SD	0.30

Para ambos casos el poder calorífico se encuentra en un rango entre 17.8 MJ/kg a 18.0 MJ/kg, el cual es un poder calorífico aceptable para las especies de residuos maderables de *Pinus* spp., de acuerdo a los datos presentados por Orihuela et al., (2016) para la generación de briquetas. Otros datos reportan un poder calorífico entre 17.0 MJ/kg a 18.3 MJ/kg (Morales-Máximo et al., 2018). Los datos obtenidos para esta investigación se encuentran en un rango favorable en comparación de otras investigaciones, por lo cual se concluye que el material particulado de la comunidad de San Fco. Pichátaro tiene un poder calorífico considerable.

5.8. Determinación del contenido de cenizas

El término cenizas está definido por el porcentaje en base seca, del cociente de la muestra calcinada y la muestra seca. Los resultados obtenidos para 5 muestras de aserrín y 5 muestras de viruta se pueden observar en la Figura 5.8.

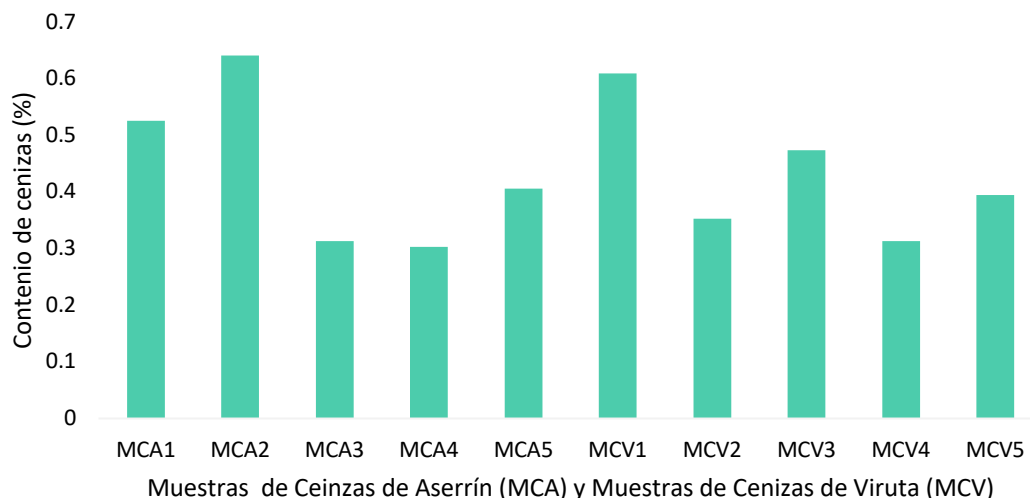


Figura 5.8. Determinación del contenido de cenizas

El análisis realizado a las muestras maderables determina que el nivel de precisión refiere que de los resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de ceniza no debe diferir uno del otro en valores relativos más que el 10%. Para el caso de este análisis los resultados se encuentran en un rango de 0.30% a 0.64% para las muestras de aserrín mientras que para las muestras de viruta se encuentran entre 0.31% a 0.62%, por lo cual cumplen con este parámetro y concuerdan con los reportados previamente (Correa-Méndez et al., 2014), donde los análisis están en un rango de 0.28% a 1.25%. Otros datos reportan contenido de cenizas de 0.38% a 1.78% en maderas del género de *Pinus* spp. (Morales-Máximo et al., 2018).

5.9. Contenido de materiales volátiles

El material volátil se determina mediante la pérdida de masa que experimenta la muestra debido a la pérdida de humedad. Los resultados obtenidos de este análisis fueron los siguientes (Figura 5.9).

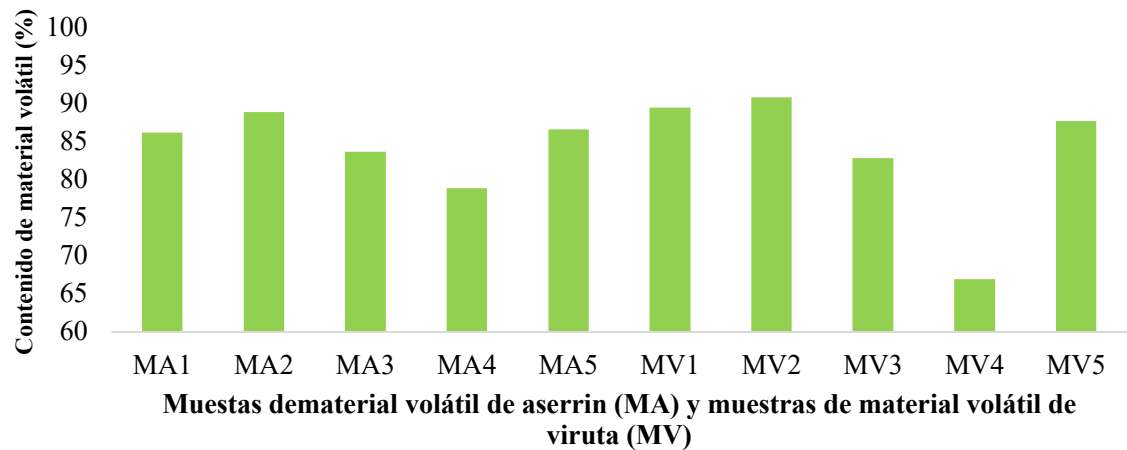


Figura 5.9. Material volátil para aserrín y viruta (%)

El nivel de precisión en la determinación de los porcentajes de materiales volátiles no debe diferir uno de otro en más de 2%. Los resultados obtenidos en esta prueba muestran que ambos residuos (aserrín y viruta) no varían uno de otro más del 2%, los rangos de variación se encuentran entre 1.03% a 1.07%, como se puede observar en la Figura 5.9, por lo tanto, el contenido de material volátil para las muestras de aserrín, se encuentran de 78.86% a 88.99% de volatilidad y para el caso de las muestras de viruta se encuentran entre 66.89% a 91.31%. Los datos encontrados son similares a los reportados previamente (Antwi-Boasiako & Acheampong, 2016) y muestran que el material volátil se encuentra en un rango que va del 80.84% a 81.27% de volatilidad para muestras maderable de pino, otros datos reportan 91.26% a 95.01% de volatilidad para muestras de viruta y 65.3% a 90.29% para muestras de aserrín (Morales-Máximo et al., 2018). Los datos analizados para esta investigación concuerdan con datos reportados por estos estudios realizados.

5.10. Carbono fijo

La Tabla 5.3 muestra los resultados obtenido del carbono fijo de las muestras de aserrín y viruta de la comunidad de Pichátaro.

Tabla 5.3. Carbono fijo de las muestras de <i>Pinus</i> spp. (%)				
Muestra	Aserrín		Viruta	
1	28.825	± 4.08	31.97	± 7.42

2	28.997	± 4.40	31.00	± 6.96
3	28.168	± 4.69	27.73	± 3.65
4	35.927	± 10.05	33.44	± 11.80
5	28.202	± 4.79	27.95	± 3.94

Los datos encontrados muestran que el carbono fijo para las muestras de aserrín y de viruta se encuentran en un rango entre 27.63% a 35.92%, sólo la muestra 4 de aserrín de la Tabla 5.3 presenta un alto contenido de carbono, pero en comparación de trabajos reportados resulta menor ya que se han encontrado valores que van desde 48.80% a 50.30% (Mishra & Mohanty, 2018), para muestras del género *Pinus*. Otros trabajos reportados han encontrado valores de carbono fijo de 12.20% (Mishra & Mohanty, 2019), de 16.76% (Rahman et al., 2020), de 15.96% (Muley et al., 2016) y de 4.49% a 34.35%, de carbono fijo (Morales-Máximo et al., 2020). Los resultados encontrados de carbono fijo en esta investigación, en la mayoría de los datos, están por debajo de los trabajos reportados del género *Pinus*.

5.11. Composición química de las muestras de residuo maderable

En la Tabla 5.4. Se muestra el resultado de los análisis químicos de los residuos maderables celulosa, hemicelulosa y lignina obtenidos de la comunidad de estudio en este caso de San Francisco Pichátaro.

Tabla 5.4. Composición química de los principales componentes estructurales de la madera de *Pinus* spp. (%)

Material	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	Extraíbles
Aserrín 1	17.34	48.16	25.60	8.37
Aserrín 2	12.41	54.87	26.88	5.20
Aserrín 3	11.39	54.54	26.94	6.82
Aserrín 4	12.83	51.69	28.01	7.17
Aserrín 5	10.49	54.17	26.23	8.71
Viruta 1	10.34	51.89	26.01	11.17
Viruta 2	10.51	54.79	25.95	8.40
Viruta 3	9.12	53.86	25.83	10.72
Viruta 4	9.24	53.24	27.46	9.75
Viruta 5	14.19	50.35	24.66	10.41

SD	±2.52	±2.21	±0.97	±1.90
----	-------	-------	-------	-------

El análisis químico realizado a las muestras de *Pinus* spp, para el caso de la hemicelulosa en las muestras de aserrín se obtuvo un promedio de 13.4%, para celulosa fue de 52.6%, para la lignina fue de 26.7%, y 7.6% de otros componentes (extraíbles). Para el caso de las muestras de viruta el contenido de hemicelulosa se obtuvo en promedio 10.6%, para celulosa fue de 52.8%, para lignina fue de 25.9% y 10.5% de otros componentes (extraíbles). Los resultados obtenidos son similares a los reportados en otras investigaciones donde oscilan valores de 14.32% de hemicelulosa y 47.64% de celulosa y de 26-31.4% de lignina en muestras de aserrín de pino (Bernabé-Santiago et al., 2013), (Cavali et al., 2020), (Gong et al., 2016), (Bravo et al., 2017), (Rusanen et al., 2019). Así mismo los resultados concuerdan con datos obtenidos para residuos de *Pinus* spp. donde se obtuvo hemicelulosa en promedio de 14.5%, celulosa 53.3%, y lignina fue de 25.8% (Morales-Máximo et al., 2020).

Otras investigaciones reportan de 68.1% a 74.7% de holocelulosa, y un rango de 24.7% a 28.5% de lignina (Bennici et al., 2019), (Huang et al., 2011). Como la lignina es el elemento estructural fundamental para la generación de energía, en esta investigación se obtuvo un promedio aceptable, y similar a trabajos reportados para la especie del género *Pinus* spp, que se sitúa en un 25.9% a 26.7% de lignina (Zhang et al., 2018), (Rugolo et al., 2020).

5.12. Microanálisis de cenizas

La Tabla 5.5. Muestra el resultado del microanálisis de las cenizas de las 5 muestras de aserrín (MA) y de viruta (MV), en ella se observa la variedad en la presencia de los elementos químicos detectados en las diferentes muestras.

Tabla 5.5. Resultados del microanálisis de las cenizas de las muestras de biomasa (ppm)										
ND=no detectado										
Eleme nto	MA1	MA2	MA3	MA4	AM5	MV1	MV2	MV3	MV4	MV5
Ag	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Al	15883 .66	4770. 21	19198 .40	16808 .97	16211 .77	10390 .06	15397 .57	14295 .14	12238 .74	22787 .87
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B	22.23	148.2 0	69.71	115.3 1	48.15	21.26	85.56	15.76	94.17	88.92
Ba	115.5 8	292.0 5	183.9 6	162.4 0	114.9 6	131.6 6	203.3 3	92.94	158.1 9	200.8 1
Be	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ca	3946. 68	24350 .40	8771. 71	14685 .20	8720. 03	2671. 08	16015 .29	7234. 63	14357 .56	15801 .00
Cd	1.57	1.32	2.25	2.34	1.75	2.01	2.54	1.10	1.82	2.93
Co	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	11.54	ND	9.22	10.66	8.20	15.19	7.27	3.57	6.91	16.98
Cu	70.21	230.3 6	156.3 4	223.8 8	126.5 0	117.0 5	420.0 9	58.18	236.9 6	415.8 5
Fe	5114. 25	2110. 25	7834. 38	8357. 62	7647. 26	4696. 31	7862. 51	6923. 31	6633. 44	11632 .98
K	12776 .78	96001 .30	29193 .39	50875 .25	30390 .46	8301. 61	56352 .52	27200 .89	48529 .56	58896 .15
Li	9.35	105.4 5	31.74	38.03	24.42	32.26	29.15	31.66	33.24	6.32
Mg	1312. 76	8714. 68	3034. 71	5224. 66	3127. 17	819.2 5	5332. 31	2612. 19	4816. 56	5531. 51
Mn	287.6 2	1031. 42	574.8 9	928.1 4	402.6 6	318.7 9	730.3 3	281.3 8	646.3 8	694.2 0
Mo	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Na	2368. 42	3636. 02	2200. 23	2121. 57	1723. 90	1513. 92	2734. 95	2220. 94	2229. 47	2313. 20
Ni	22.60	19.82	64.48	59.41	34.14	40.22	40.92	15.78	23.19	30.74

P	5892.63	8477.57	5159.20	10391.33	4566.17	2625.44	6984.77	2055.79	6442.35	6885.04
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Sb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Se	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Si	287.89	3864.95	234.59	6050.14	338.16	174.93	7548.83	18.01	50.05	1501.70
Sn	2.76	16.96	2.26	20.47	ND	8.12	3.97	ND	ND	2.57
Sr	102.81	452.39	240.41	350.54	178.83	104.16	280.28	97.79	346.09	326.90
Tl	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
V	28.07	6.39	29.08	28.22	27.10	35.02	26.73	21.97	18.87	37.25
Zn	245.44	2557.69	535.13	614.66	340.92	241.61	1058.91	181.06	571.45	696.06

Este resultado, revela la presencia mayoritaria de los elementos químicos más comunes y presentes en la madera (potasio, calcio y magnesio), principales componentes de las sustancias inorgánicas de la madera (Fengel & Wegener, 1983), encontradas hasta en un 80 % en las cenizas (Ulmgren, 1997). La variación en contenido de Ca, Mg y Mn en madera de varias especies de pinos encuentran una disminución del contenido de Mg y Mn y un incremento del contenido de Ca de la madera ya que los compuestos minerales están distribuidos en todas las paredes celulares. Los mayores elementos inorgánicos encontrados en la corteza son Na, K, Mg, Mg, Zn y P. En general los resultados obtenidos coinciden con resultados previos reportados para diferentes maderas (Rutiaga-Quñones et al., 2020)(Pintor-Ibarra, Carrillo-Parra, et al., 2017) (Magdziarz et al., 2016).

5.13. Análisis elemental

Los resultados del análisis elemental de las muestras de aserrín (A) y viruta (V) se pueden observar en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Resultado del análisis elemental de las muestras de biomasa (%)

Muestras	C	H	O	N	S
A1	47.73	6.09	44.93	0.71	< 0.01
A2	47.98	6.13	44.85	0.37	< 0.01
A3	48.79	5.98	44.48	0.41	< 0.01
A4	48.12	6.09	45.07	0.40	< 0.01
A5	48.29	6.00	44.86	0.43	< 0.01
Promedio	48.18	6.06	44.17	0.46	
Desv. Est (SD)	±0.39	±0.06	±0.27	±0.13	
V1	47.78	5.99	45.01	0.60	< 0.01
V2	48.31	6.16	44.77	0.38	< 0.01
V3	47.73	6.04	45.34	0.38	< 0.01
V4	47.96	6.05	45.25	0.41	< 0.01
V5	48.96	6.09	44.11	0.43	< 0.01
Promedio	48.15	6.06	44.32	0.44	
Desv. Est (SD)	±0.50	±0.06	±0.51	±0.09	

Los resultados de la tabla en la Tabla 5.6 en general concuerdan con los valores reportados para diferentes tipos de biomasa (Vassilev et al., 2010). El porcentaje de nitrógeno y azufre en la madera suele ser bajo, como muestran los resultados. El carbón y el oxígeno son los componentes principales de los biocombustibles sólidos y son los que participan en la reacción exotérmica durante la combustión, generando CO₂ y H₂O (Oberberger & Thek, 2010). Para las muestras de biomasa de aserrín, el contenido de carbono osciló entre el 47.73% al 48.29%, las muestras de viruta entre 47.73% al 48.96%, el oxígeno para el aserrín estuvo entre 44.79% al 45.49%, para la viruta entre 44.50% a 45.81% y para el hidrógeno en el aserrín fue de 5.98% a 6.13% y para viruta estuvo entre 5.99% a 6.16%, los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado previamente por investigaciones recientes (Lin et al., 2019) (Rutiaga-Quíñones et al., 2020) (Taylor et al., 2020).

5.14. Análisis Multicriterio

Este análisis consideró parámetros energéticos, físicos-proximal y composición química lo cuales derivan en indicadores cuantificables, que se puede observar en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Parámetros e indicadores utilizados en el análisis multicriterio

Parámetro	Indicador
Energético	Poder Calorífico (MJ/Kg)
Físico-proximal	Contenido de-Humedad (%)
	Contenido de Cenizas (%)
	Contenido de Material volátil (%)
	Contenido de Carbono fijo (%)
Composición química	Contenido de lignina (%)
	Contenido de celulosa (%)
	Contenido de hemicelulosa (%)
	Contenido de extraíbles (%)

Ponderación con valores máximos y mínimos que definen el mejor y peor escenario, los datos del valor máximo son obtenidos de la literatura científica ver Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Valores de los indicadores

Indicador	Valor Máximo	Valor Mínimo
Poder Calorífico (MJ/Kg)	20.92 (Ngangyo-Heya et al., 2016)	0
Contenido de Humedad (%)	56 (Correa-Méndez et al., 2014)	0
Contenido de Cenizas (%)	18.20 (Ngangyo-Heya et al., 2016)	0
Contenido de Material Volátil (%)	86.32 (Reis Portilho et al., 2020)	0
Contenido de Carbono fijo (%)	66.16 (Ang & Sevgi, 2014)	0
Contenido de Lignina (%)	43.37 (Bolzon De Muñiz et al., 2014)	0
Contenido Celulosa (%)	53.3 (M. Morales-Máximo et al., 2020)	0
Contenido de Hemicelulosa (%)	87.11 (Cavali et al., 2020)	0
Contenido de Extraíbles (%)	56.1 (Funda et al., 2020)	0

La metodología multicriterio no es una herramienta *per se*, debe ser siempre comparativa. En este estudio, se analizaron los siguientes residuos maderables para su comparación: (1) residuo de Pino (*Pinus* spp.), (2) residuos de Encino

(*Quercus* spp.). La evaluación real de los indicadores para los dos casos de estudio, se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Evaluación de los indicadores

Indicador	Residuo de <i>Pinus</i> spp.	Residuo de <i>Quercus</i> spp.
Poder Calorífico (MJ/Kg)	18.0	19.5 (Núñez-Retana et al., 2020)
Contenido de Humedad (%)	16.82	25 (Núñez-Retana et al., 2020)
Contenido de Cenizas (%)	0.64	0.95 (Núñez-Retana et al., 2020)
Contenido de Material Volátil (%)	78.92	87.33 (Núñez-Retana et al., 2020)
Contenido de Carbono fijo (%)	8.76	8.88 (Núñez-Retana et al., 2020)
Contenido de Lignina (%)	26.7	24.5 (Ruiz Cuiltly et al., 2018)
Contenido Celulosa (%)	52.6	38.4 (Ruiz Cuiltly et al., 2018)
Contenido de Hemicelulosa (%)	13.14	24 (Ruiz Cuiltly et al., 2018)
Contenido de extraíbles (%)	19.8	6.94 (Herrera-Fernandez et al., 2017)

Nota: Los valores de los residuos maderables de *Quercus* spp. se obtuvieron de la literatura científica.

Estos valores (Tabla 5.9), son normalizados con los valores de la Tabla 5.8, para establecer una escala de 0 a 10. Donde 0 representa el peor escenario posible, mientras que diez el mejor. Los valores normalizados se aprecian en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Valores normalizados para el análisis

Indicador	Residuo de <i>Pinus</i> spp.	Residuo de <i>Quercus</i> spp.
Poder Calorífico (MJ/Kg)	8.60	9.32
Contenido de Humedad (%)	3.00	4.46
Contenido de Cenizas (%)	0.18	0.27
Contenido de Material Volátil (%)	9.14	10.11
Contenido de Carbono fijo (%)	1.32	1.34
Contenido de Lignina (%)	6.15	5.64
Contenido Celulosa (%)	9.86	7.20
Contenido de Hemicelulosa (%)	1.50	2.75
Contenido de Extraíbles (%)	3.52	1.2

El análisis multicriterio y de indicadores de sustentabilidad, que muestra los resultados de forma gráfica, se puede observar en la Figura 5.10.

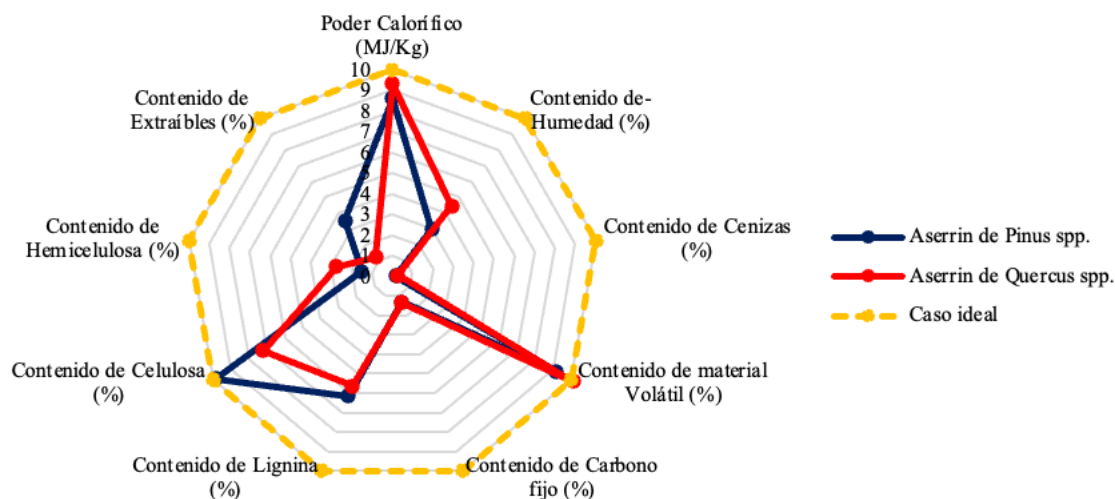


Figura 5.10. Formulación de indicadores con diferentes parámetros

Los diferentes indicadores que intervinieron el respectivo análisis con se muestra en la Figura 9 a través de este se puede identificar el potencial que tiene el residuo maderable de *Pinus* spp. en comparación con los residuos maderables de *Quercus* spp. De forma gráfica pueden apreciarse fortalezas y debilidades en diferentes aspectos, desde un enfoque energético, físico-proximal y composición química. El indicador del poder calorífico muestra que similitud al no presentar una diferencia significativa. En el contenido de humedad, se aprecia que el residuo de *Pinus* spp. es menor, en comparación del contenido de humedad del residuo de *Quercus* spp. por lo cual no se requiere de un secado previo para estabilizar las muestras y producir biocombustibles sólidos. El contenido de cenizas, de los dos residuos involucrados, es bajo; lo cual los hace ideales para su combustión en diferentes tareas domésticas principalmente, aun así, es más bajo el residuo de *Pinus* spp. El contenido de material volátil resulta ser similar hay una mínima diferencia, la cual muestra que el residuo de *Quercus* spp. contiene un mayor contenido de material volátil que puede ser perjudicial para el ambiente. En lo que se refiere al carbono fijo no hay diferencia significativa los dos residuos tiene valores muy similares en promedio de 8.82% de carbono fijo. Para el contenido de lignina, los indicadores involucrados reportan valores similares, aunque con un mayor porcentaje de lignina

contiene el residuo de *Pinus* spp., lo cual influye directamente en el poder calorífico el cual puede ser mayor en este tipo de residuos en comparación de los *Quercus* spp. El caso de la celulosa existe una diferencia por parte del residuo de *Pinus* spp. es mayor en comparación del *Quercus* spp. Pero en el contenido de Hemicelulosa se encuentra en mayor porcentaje en el residuo de *Quercus* spp. En síntesis, los residuos de maderables de *Pinus* spp. representan una materia prima abundante y competitiva con los residuos de maderables de *Quercus* spp. en aspectos energéticos, físico-proximal y composición química, y se vislumbra como una materia prima para la generación de bioenergía con indicadores de sustentabilidad, para este indicador el residuo maderable de *Pinus* spp. es el caso ideal.

5.15. Análisis termogravimétrico (TGA)

La Figura 5.11, muestra la curva termogravimétrica (TGA) y la curva de su derivada, es decir, la curva diferencial (DTG) en atmósfera inerte de argón. Se observa un comportamiento característico de los materiales lignocelulósicos. En este sentido, se puede considerar que la hemicelulosa (primera etapa), se descompone a una temperatura más baja (190 - 380°C) que la celulosa (segunda etapa) que se degrada entre 280 y 400°C. Finalmente la lignina, considerada como un compuesto de mayor complejidad presenta una descomposición entre 170 - 800°C en una tercera etapa, que se descompone a un ritmo más lento debido a la asociación con el grupo hidroxilo fenólico (Brebú & Willfor, 2011; Du et al., 1990). Como puede observarse la zona de mayor degradación se presenta entre 250 y 400°C donde se tiene la máxima pérdida de hemicelulosa y celulosa debido a la liberación de la mayor parte de los volátiles propiciando la formación de carbón al final (Vamvuka et al., 2003). En esta etapa intermedia también se observa la mayor velocidad de degradación (DTG). Al realizar una comparación entre los picos de la hemicelulosa (hombro) aproximadamente a 325°C, y celulosa (≈360°C), se observa que presentan diferente altura y posición, lo cual indica la influencia que tienen la distribución de los compuestos orgánicos e inorgánicos en el proceso de degradación térmica del pino.

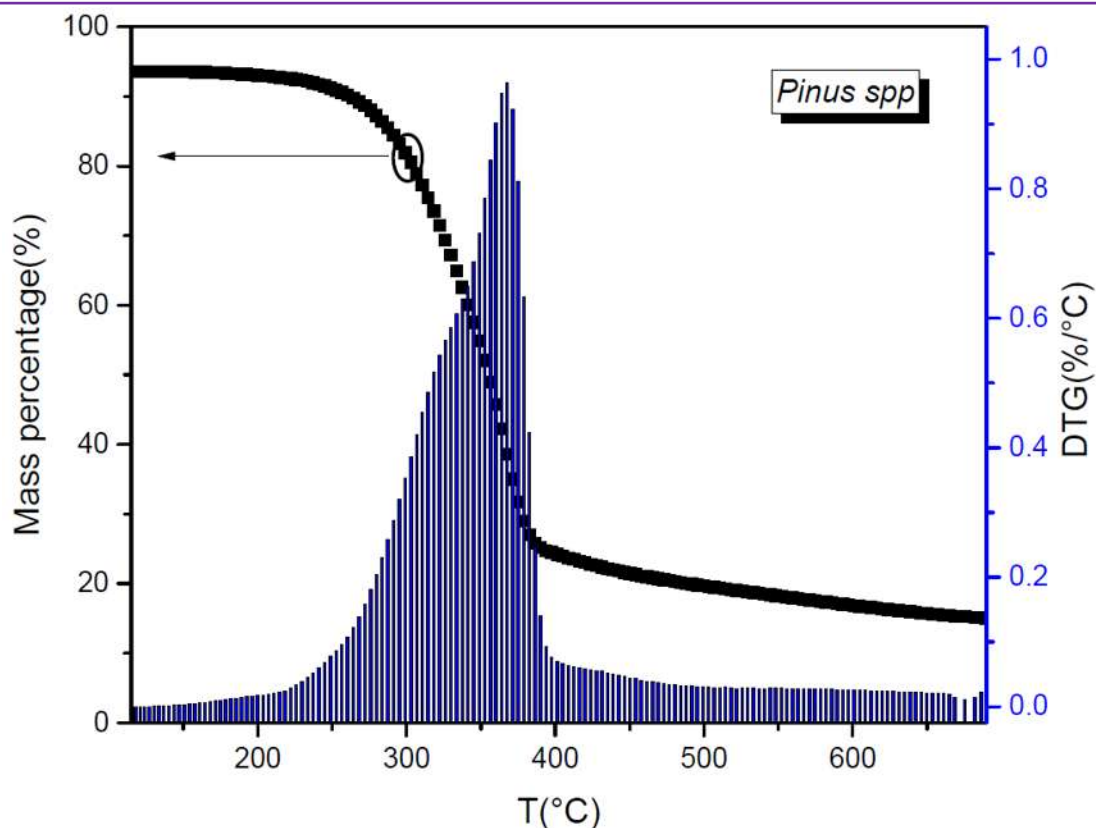


Figura 5.11. Curvas TGA-DTG de *Pinus spp.* en atmósfera de argón y aire

5.16. Fabricación de las briquetas

Considerando una concentración óptima para la fabricación de briquetas reportada en la literatura científica (Morales-Máximo et al., 2020) se pudo realizar la fabricación de briquetas usando los residuos maderables; el resultado por cada extracción de una máquina briqueteadora (Morales-Máximo, 2019) se obtienen 4 briquetas con dimensiones de 7 a 8.3 cm de longitud por 7.2 cm de diámetro [ver Fig. 5.12 (a)]. Para fines de esta investigación produjeron 300 briquetas que comprenden el lote total de estudio (Figura 5.12).





Figura 5.12. a) Dimensiones de las briquetas producidas, b) vista isométrica de las briquetas producidas, c) 300 briquetas producidas

5.17. Cinética de secado solar

En lo que respecta a la cinética de secado se realizaron tres tandas de secado, la primera durante los meses de marzo a abril (21 días), la segunda entre abril mayo (21 días) y la tercera de mayo junio (21 días), sólo utilizando la energía solar para su secado. Estas tres tandas se realizaron la finalidad de conocer el comportamiento en diferentes condiciones climáticas, empleando madera (duela) recién aserrada. Los resultados de las tres tandas de secado se pueden observar en la Figura 5.13.

Con el peso seco de las probetas mostradas en el capítulo de metodología se determinó el contenido de humedad de las diferentes muestras de secado, los cuales fueron los siguientes:

MUESTRA A: 100 %

MUESTRA B: 111.76 %

MUESTRA C: 112.5 %

MUESTRA D: 119.35 %

A partir de conocer el contenido de humedad (%) inicial se empezó con la cinética de secado.

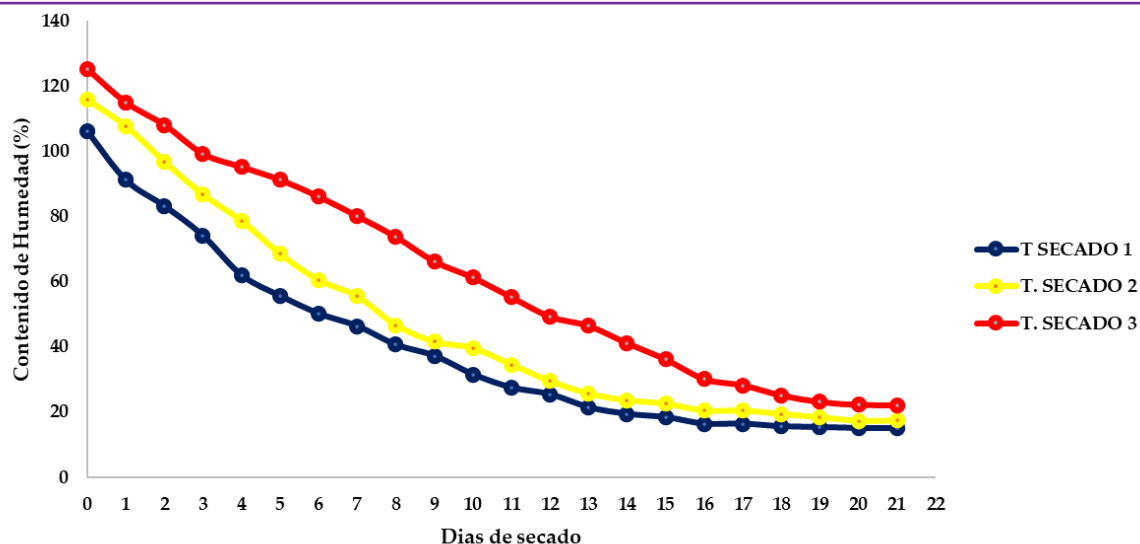


Figura 5.10. Secuela de secado solar

La tanda se secado marcada con la línea azul se llevó entre los meses de marzo y abril cuyo porcentaje de humedad máximo de las probetas (a,b,c,d) en general fue de 106.23% de humedad en el día cero, llegando a una humedad final de 14.95% de humedad en 21 días. La tanda de secado con línea amarilla representa los meses de abril y mayo donde la humedad inicial en promedio de las 4 probetas fue 115.88% de humedad terminando en una humedad final de 17.37% en 21 días. Por último, la línea roja representa la tanda de secado de mayo a junio, iniciando con una humedad de 125.25% de humedad terminado en 21 días con una humedad final de 22.12%. La variación de humedad inicial en cada tanda de secado es alta debido a que se trata de madera (duelas) recién aserrada, así mismo la humedad final y la variación que existe entre las tres tandas se debe a días nublados e incluso lluvias sobre todo en la tanda 3, que es donde existe un mayor contenido de humedad y muy poca pérdida de la misma tal vez por estos factores.

5.18. Simulación térmica

Tomando como base el diseño anterior, se realizó la siguiente simulación para el serpentín de cobre que el secador tiene, cuya finalidad es calentar un fluido (agua) a su punto de ebullición con las briquetas producidas, para ser transportado por este serpentín y por convección de calor transferirlo hacia dentro del secador, y de esta forma secar la madera con calor térmico. La Figura 5.14 muestra el análisis de flujo

de agua que existe dentro del serpentín de cobre, conociendo que el diámetro del cobre es de 1/2 pulgada y la presión de 121325.00 Pa, además la temperatura que se desea conseguir del agua es de 90°C; con estos valores se realizó el análisis.



Figura 5.11. Velocidad del flujo de agua dentro del serpentín

El análisis del flujo de agua de acuerdo con los parámetros establecidos resultó en una velocidad que va desde 0 m/s a 1.261 m/s. En la Figura 5.15 se puede observar más a detalle el flujo de agua.

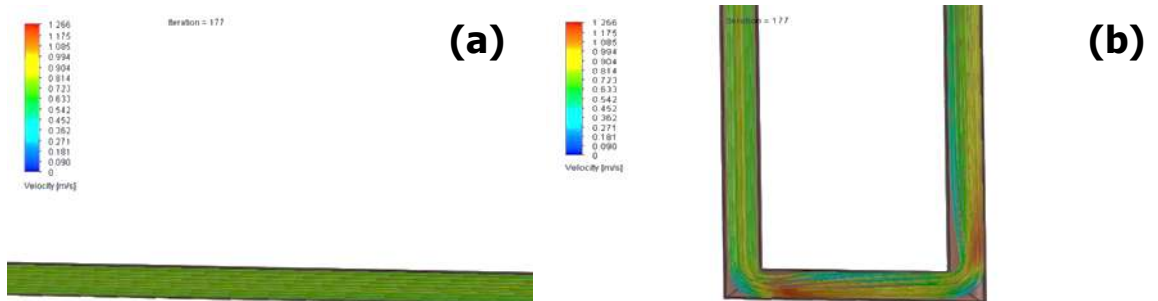


Figura 5.12. a) Vista del fluido en forma lineal, b) Vista del fluido en dos curvaturas del tubo

La Figura 5.15 muestra: a) vista del caudal en forma lineal donde se aprecia a detalle la velocidad en forma lineal, b) muestra la velocidad del caudal en una curvatura donde se genera mayor presión y por lo tanto una mayor velocidad del fluido de acuerdo con la simulación el tiempo estimado de llenado del serpentín es de 3 minutos. Posteriormente se realizó el análisis térmico del fluido, teniendo en cuenta que la temperatura que necesitamos calentar con las briquetas el agua es de 90°C, la temperatura ambiente dentro del secador antes de su funcionamiento de 20°C y teniendo en cuenta la conductividad térmica del tubo de cobre, podremos estimar la

temperatura generada por convección térmica hacia la cara interna del secador y poder conocer la temperatura de secado (Figura 5.16).

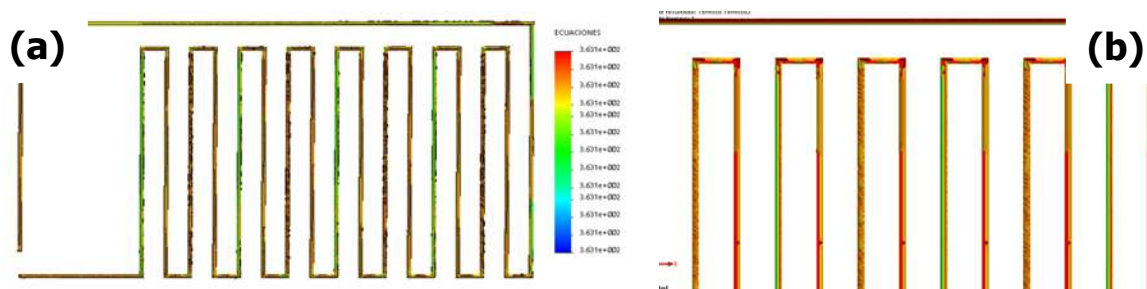


Figura 5.13. a) Vista frontal del serpentín, b) Vista a detalle de la transferencia de temperatura en el tubo

La Figura 5.16 a) muestra la transferencia de calor por todo el serpentín teniendo en cuenta que en su interior lleva un fluido de 90°C y teniendo en cuenta la conductividad térmica del cobre que es de 385.0 (W/mK). La temperatura por convección analizada va de 90°C a 150°C, eso teniendo en cuenta la temperatura ambiente del secador antes de colocar el fluido en el serpentín. La Figura 5.16b) muestra más a detalle la transferencia de calor por todo el serpentín cuando el fluido esta por todo el serpentín. Se utilizaron 4 kilogramos (kg) de briquetas en total para calentar 30 litros de agua, en promedio 5 briquetas suman 1 kg, por lo cual para esta prueba se utilizaron de 20 a 25 briquetas en total. Una vez calentada el agua a una temperatura de 85° C, se procedió a dejarla circular por todo el serpentín del secador que se distribuyó sólo por gravedad en 5 minutos aproximadamente. El agua caliente se dejó por 2 horas y 15 minutos, durante ese tiempo se realizó un registro del secado de la madera.

5.19. Evaluación de la temperatura dentro del secador

La cámara de secado aún con la referencia de temperatura ambiente bajas logró alcanzar temperaturas superiores a 40 °C. Aunque no se tuvo alta irradiancia, por que el objetivo de esta prueba era conocer la temperatura interna alcanzada con el fluido caliente circulando por el serpentín (Figura 5.17).

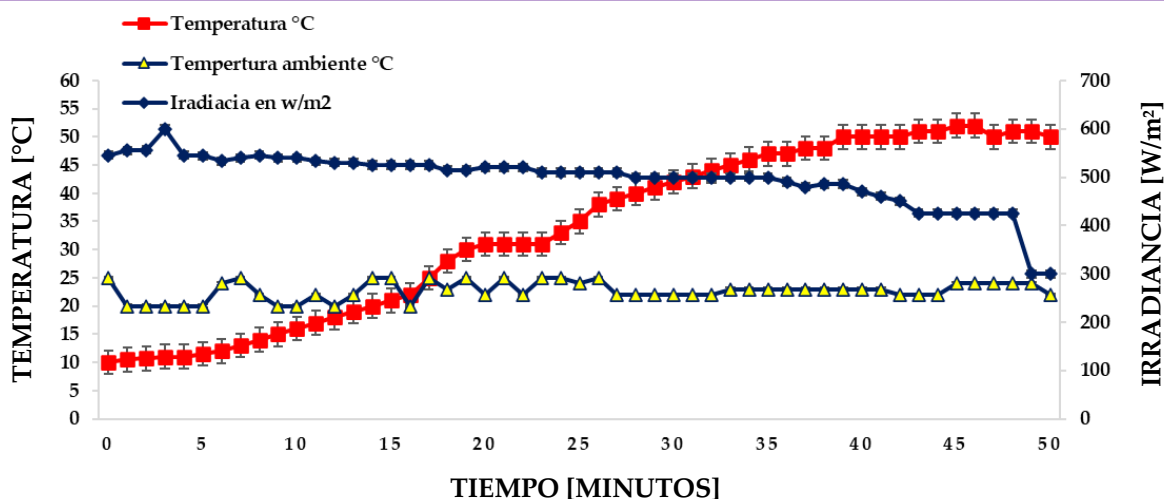


Figura 5.14. Comportamiento térmico de la cámara de secado utilizando briquetas (prueba 1)

La Figura 5.17 muestra que la temperatura interna máxima alcanzada en el secador con el fluido calentado utilizando briquetas fue de 51 °C, durante un tiempo de 45 a 51 minutos, una temperatura ambiente en promedio de 22 °C y una irradiancia de 500 a 300 W/m², ya que las pruebas se realizaron a las a partir de las 18:00 horas. La toma de registro paró en cuanto hubo un descenso de temperatura dentro de la cámara de secado. Para corroborar el experimento se realizó una segunda prueba de precalentamiento de la cámara de secado cuyos resultados se pueden observar en la Figura 5.18.

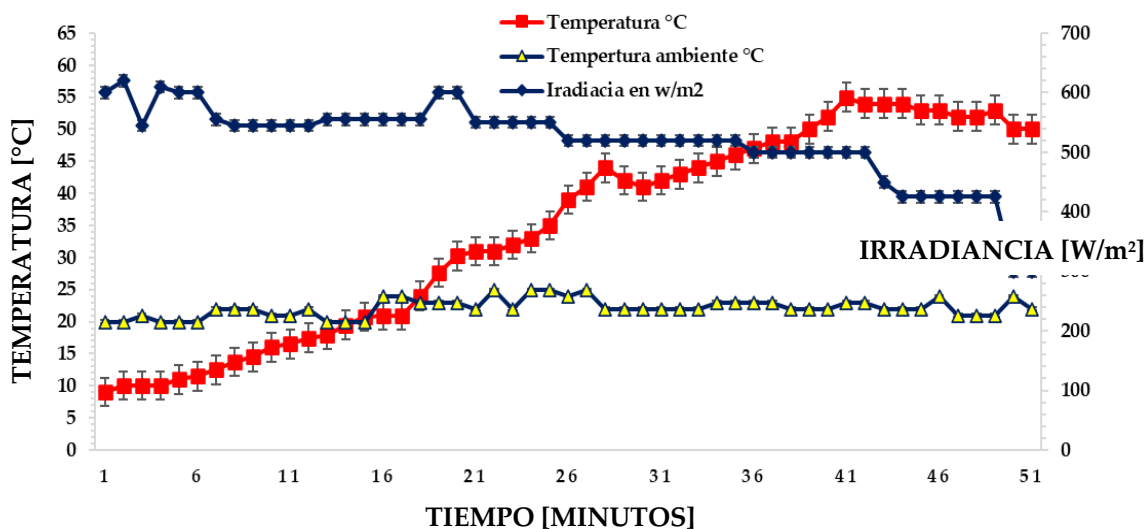


Figura 5.15 Comportamiento térmico de la cámara de secado utilizando briquetas (prueba 2)

Los resultados obtenidos en la en la segunda prueba de calentamiento del secador (Figura 5.18), indican que la temperatura máxima alcanzada fue de 52 °C, en un tiempo de 45 a 50 minutos, con una temperatura ambiente en promedio de 23 °C y una irradiancia de 500 a 300 W/m²; la prueba se realizó a partir de las 18:00 horas. La toma de registro paró en cuanto hubo un descenso de temperatura dentro de la cámara de secado.

5.20. Secado de la madera con briquetas

Las dimensiones aproximadas de la pila fueron de 1.20 m de alto, 1.30 m de ancho y 2 m de largo. La madera permaneció durante 24 días en la estufa de secado, en lo cual se llevó un registro permitiendo obtener la siguiente gráfica (Figura 5.19), que muestra la pérdida de humedad en la pila de madera durante el tiempo que estuvo dentro. De acuerdo a comentarios de los artesanos el secado de la madera al aire libre varía entre los 21 y 24 días. Para este experimento también fue utilizada madera recién aserrada.

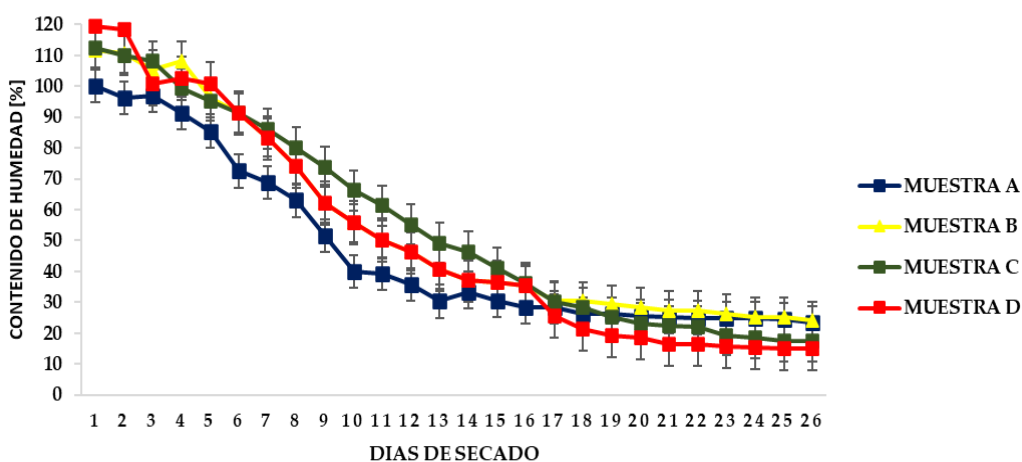


Figura 5.16. Secado de la madera con briquetas

La prueba de secado se llevó a cabo en el mes octubre y parte de noviembre, el análisis de pérdida de peso para registrar la pérdida de humedad se llevó con las probetas colocadas en la pila de madera (Figura 5.19). La probeta marcada con la letra (a) inició con una humedad de 100 % en el tiempo cero (0) y terminó con una humedad final de 23.53%, al concluir la prueba. La probeta (b) inició con una humedad de 111.76% en el tiempo cero (0) y finalizó con una humedad de 24.0 %. La probeta (c) inició con una humedad de 112.5% en el tiempo cero (0) y finalizó

con una humedad de 17.37%. Por último, la probeta (d) inició con una humedad de 119.35% y finalizó con una humedad de 15.95%; esto al final de 24 días de prueba. Posteriormente se realizó una segunda prueba de secado entre los meses de noviembre y diciembre, los resultados obtenidos se pueden mostrar en la Figura 5.20.

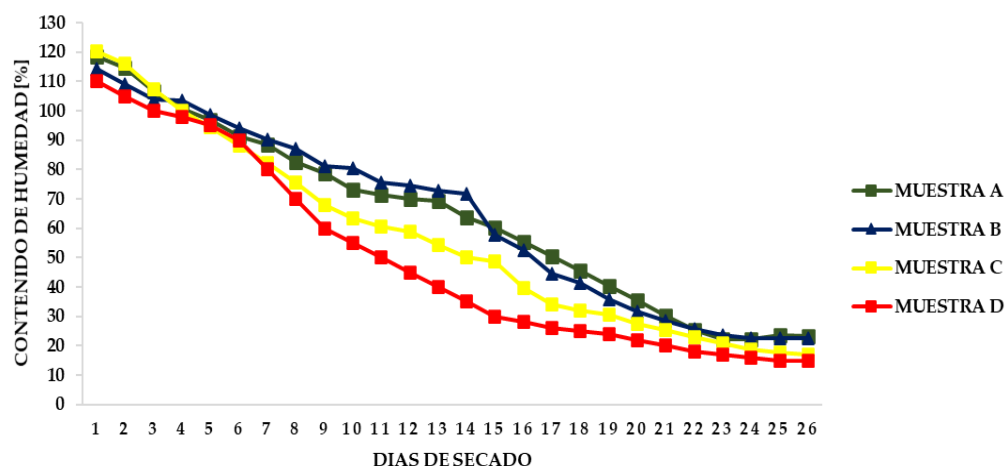


Figura 5.17. Secado de la madera con briquetas

El análisis de pérdida de peso para registrar la pérdida de humedad se llevó con las probetas colocadas en la pila de madera (Figura 5.20). La probeta marcada con la letra (a) inició con una humedad de 118.47% en el tiempo cero (0) y terminó con una humedad final de 24.43% al final de la prueba. La probeta (b) inició con una humedad de 114.38% en el tiempo cero (0) y finalizó con una humedad de 22.42 %. La probeta (c) inició con una humedad de 120.31% en el tiempo cero (0) y finalizó con una humedad de 16.86%. Por último, la probeta (d) inició con una humedad de 110% y finalizó con una humedad de 15.0%; esto al final de 26 días de prueba.

5.21. Secado de madera híbrido (solar y briquetas)

Para el secado de madera también recién aserrada se utilizaron las dos fuentes de energía alternativa; este análisis se llevó a cabo durante los meses de diciembre y enero del año 2022 y 2023, respectivamente, en condiciones donde el periodo de prueba era de 6 horas, iniciando de 5:00 pm de la tarde a 11:00 pm de la noche. El análisis de pérdida de peso para registrar la pérdida de humedad se llevó con las probetas colocadas en la pila de madera. La madera permaneció durante 25 días

en la estufa de secado, en lo cual se llevó un registro permitiendo obtener la siguiente gráfica (Figura 5.21) que muestra la pérdida de humedad en la pila de madera durante el tiempo que estuvo dentro.

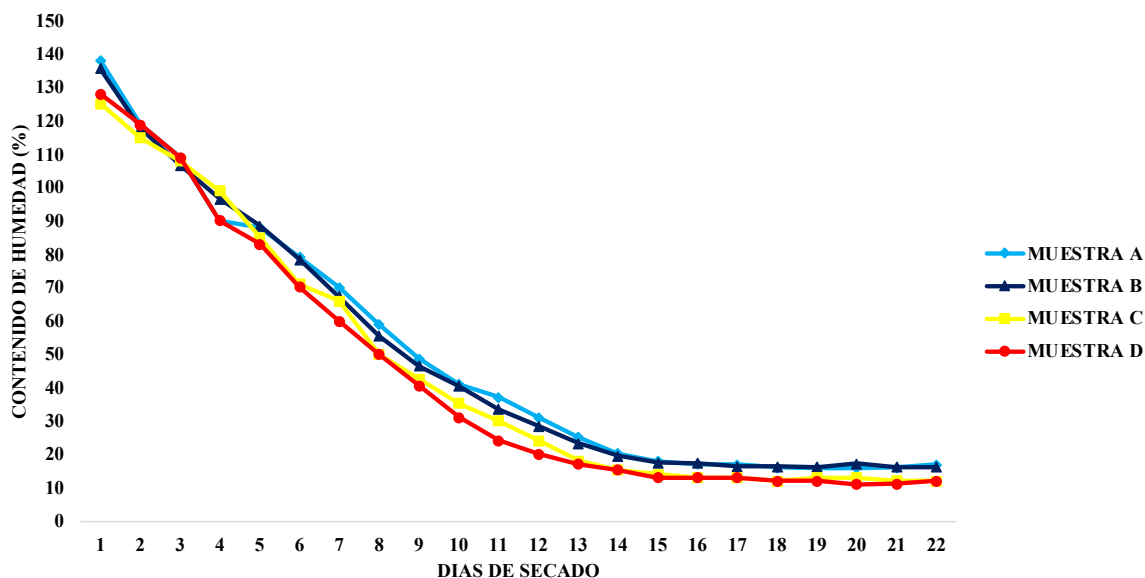


Figura 5.18. Cinética de secado de madera híbrido (solar y briquetas)

Como se muestra en la Figura 5.21, la pérdida de humedad en la madera se llevó a cabo en las distintas probetas de registro, para ello se llevó un debido registro para la probeta marcada con la letra (a) inició con una humedad de 138.25% en el tiempo cero (0) y terminó con una humedad final de 17.12% al final de la prueba. La probeta (b) inició con una humedad de 135.88% en el tiempo cero (0) y finalizó con una humedad de 16.37%. La probeta (c) inició con una humedad de 125.25% en el tiempo cero (0) y finalizó con una humedad de 12.12%. Por último, la probeta (d) inició con una humedad de 128.25% y finalizó con una humedad de 12.24%; esto al final de 25 días de prueba. En este caso las probetas marcadas con la letra (c) y la letra (d) en la gráfica se puede mostrar que tienden a bajar de manera más rápida la humedad, esto se supone a la cercanía y contacto directo con el serpentín de agua que tiene integrado la cámara de secado, al estar estas probetas más cerca de ese serpentín tienden a perder mayormente su contenido de humedad, en cambio las otras dos probetas no bajan tan rápido su contenido de humedad, pero hacen el mismo efecto en la mañana al contrario de las dos probetas (c) y (d), las probetas (a) y (b) su pérdida de humedad es más rápida durante la mañana cuando

se exponen más al sol, en ambos casos dos probetas pierden humedad más rápido por la radiación y otras dos pierden más rápido humedad por la cercanía al serpentín.

5.22. Comparativo de los tres tipos de secado

Por último, la Figura 5.22 muestra una gráfica comparativa donde se muestran los tres tipos de secado que se analizaron en esta investigación.

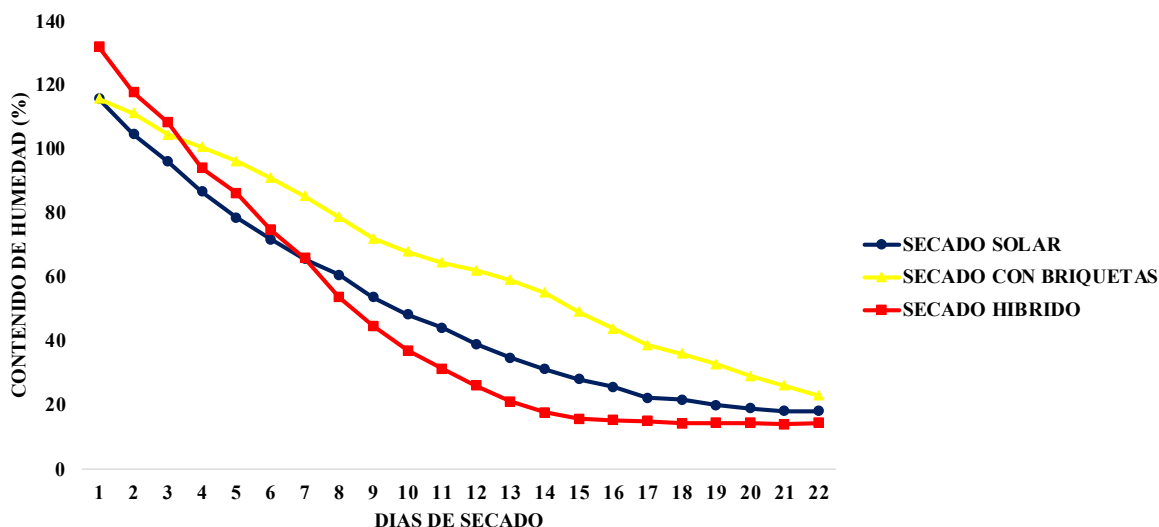


Figura 5.22. Comparación del secado de madera con los tres tipos (solar, briquetas e híbrido)

De este análisis comparativo resultó que el secado con energía solar es favorable y cumple con las expectativas que se tenía del prototipo, por lo cual se da garantía que, si sólo se utiliza la energía solar para secar la madera, sin ningún problema puede secar la madera en este caso madera denominada duela, el tiempo de secado que se lleva es de 22 a 25 días aproximadamente teniendo una humedad final promedio de 18.14% de contenido de humedad.

Posteriormente el secado de madera con la utilización de un biocombustible sólido como lo son las briquetas, en este caso el secado con este biocombustible es adecuado y funciona, ya que el secado de la madera en un periodo de 22 a 24 días, lo cual lo hacen similar al secado con energía solar, la desventaja en este secado es la manipulación de las briquetas para su funcionamiento, además de que se tuvo que realizar a partir de que la radiación disminuyera para poder tener unos

resultados favorables, en este caso el secado tuvo una humedad final promedio de 22.95% de humedad, aun para reducir más la humedad se requiere de más tiempo, así como de la producción y aplicación de briquetas.

Por último la Figura 5.22 muestra el secado de madera de forma híbrida, es decir con la utilización de energía solar y energía de la biomasa (briquetas), para esta prueba de secado se logró mostrar que el secado de forma híbrida acelera el proceso de secado en menor tiempo en comparación del secado con energía solar y del secado con briquetas, para este secado híbrido el contenido de humedad en promedio fue de 14.43% (debido al contenido de humedad final se considera estaríamos un pre-secado, ya que aún está por encima del 12 % de humedad el cual se considera apto para la utilización de la madera para interior) (Alvarez, 2021) de humedad final, tomando en cuenta un tiempo de 20 a 21 días, por lo cual incluso se reduce el tiempo de secado al utilizar esta combinación. Así mismo la producción y utilización de briquetas se reduce a la mitad en comparación si fuese sólo el secado con briquetas (una utilización en un rango de 650 a 700 briquetas por tanda de secado).

Con esto se cumple con el objetivo planteado con respecto al secado de madera, así como se demuestra que el secado con esta combinación resulta ser la indicada ya que acelera el secado de madera de forma más rápida, se reduce el tiempo de secado, se utiliza menos briquetas, el contenido de humedad final es menor con una diferencia de 4% de humedad, así pues, es recomendable utilizar el secado híbrido.

5.23. Discusión de los tipos de secado

Con respecto a otras cámaras de secado muestran resultados de una temperatura interna de hasta 40.6 °C máximo (Herrera-Bolaños et al., 2015) en este caso el secador construido detecto una temperatura interna de 52 °C con energía solar, mientras que con briquetas alcanzó una temperatura máxima de 51 °C, resultando superior por 11.5° C en promedio. Otras investigaciones han demostrado que la temperatura interna de un secador solar de madera ha sido de 32.4 °C (Fuentes-

Salinas et al., 2003a), otros han alcanzado temperaturas internas de 39.4 °C (Martínez-Pinillos Cueto, 1997), por lo que este secador diseñado y construido ha superado la temperatura interna, tanto con energía solar como con briquetas.

Con respecto al contenido de humedad final en la madera (pre-secada) ciertas investigaciones reportan que el promedio de las muestras de madera del contenido de humedad fue de 11.76%, en un periodo de 18 días (Quintanar Olguín et al., 2011). Otros reportan 12.3% de contenido de humedad en 17 días (Fuentes-Salinas et al., 2003b). Otros reportan el secado de madera con 2.5 cm de espesor de 35 días (Solís Rodríguez et al., 2003).

En sí, los resultados del secado en la madera aquí logrados son similares a los reportados en investigaciones previas, aunque se considera que para esta investigación hay factores del clima, la radiación intermitente y la manipulación del secado que hacen que el contenido como tal no se refleje por debajo de un 14.43% de humedad. Pero cabe recalcar que las condiciones de operación del secado de esta investigación fueron en condiciones drásticas, como bajas temperaturas, radiación intermitente, lluvias entre otros factores que aun así hicieron que el secador pudiera operar de la mejor manera y obtener datos favorables.

5.24. Estimación de la producción y aplicación de briquetas para el secado de madera

Para el secado de madera con briquetas fue necesario calentar aproximadamente 30 litros de agua para que ésta alcanzara una temperatura de 50°C, y para ello se utilizó un total de 10 kg de briquetas, que representan en unidad un total de 50 briquetas por día, es decir, por cada calentamiento de agua. Este proceso se llevó a cabo paulatinamente, es decir que se colocaban los 30 litros de agua y enseguida se colocaban 2 kg de briquetas, que es lo que permitía el espacio de la caldera. Posteriormente, conforme aumentaba la temperatura y se quemaban las briquetas y existía un espacio en la caldera, se colocaban otras briquetas. El periodo de calentamiento de estos 30 litros fue de aproximadamente de 90 minutos, posteriormente al calentarse el agua a una temperatura entre 50 °C a 60 °C, se

vaciaba por todo el serpentín para que este recorriera durante 45 minutos. Luego se recirculaba el agua, que regresaba a una temperatura de 25 °C a 30 °C, para lo cual se mezclaba con el agua previamente calentada y nuevamente se volvía a vaciar por el serpentín. Hay que destacar que las segundas fases de calentamiento de agua, el tiempo de calentamiento ya fue menos, esto se intuye a que la caldera ya estaba previamente caliente y las cenizas del remanente de la briqueta ayudaba a mantener caliente la caldera y el agua que iba entrando poco a poco al tanque de almacenamiento se mezclaba con el precalentado, por lo que ya no se requería de más energía.

Para las pruebas de secado con briquetas durante un periodo de 22 días se utilizaron un total de 700 briquetas, que representa el aprovechamiento de diez costales de 7kg de aserrín y viruta. Se puede decir que en promedio 700 kg de viruta y aserrín generados en la comunidad se pueden utilizar sin problema para la generación de briquetas y realizar una tanda de secado sólo con briquetas. 10 costales es lo que en promedio un artesano produce del trabajo de la transformación de la madera a muebles en un tiempo estimado de 15 días, lo que resulta viable en el aprovechamiento de este residuo para las tareas de secado de madera.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La presente investigación se llevó a cabo en la Comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México, perteneciente al municipio de Tingambato y a la subregión de la meseta purhépecha. Forma parte de la Cuenca de Pátzcuaro y se localiza a 19° 34" N y 101° 40" O, a una altitud de 2350 m. De esta respectiva investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones: De acuerdo con Francisco-Arriaga, y la dependencia CONAFOR la comunidad de Pichátaro cuenta con una superficie total de 8,484.25 ha, de las cuales 4,033.90 ha se encuentran reforestadas, de estas, 3488 ha son arboladas y el resto, es decir 6031 ha corresponde a área no arbolada. Por lo cual la comunidad de estudio aun cuenta con recurso forestal maderable, para satisfacer su demanda de muebles rústicos, mismos que siguen siendo la actividad económica principal de Pichátaro.
- Los datos obtenidos en el diagnóstico, muestran que la madera más utilizada para obtener el recurso maderable corresponde al género *Pinus*. Las cantidades de residuo maderable por semana son alrededor de 2,324 kg de aserrín (± 15.08) y 5,532 kg de viruta (± 17.65) por taller cuantificado, representado que el 33.40% corresponde al aserrín y 66.59% la viruta.
- Se estima que el aserrín de los 2,268 kg generados a la semana se traduce que al año la generación es de 108,864 kg (108.86 toneladas/año), en lo que corresponde a la generación de viruta se estima que al año se genera 260,064 kg (260.06 toneladas/año). Si estimamos en términos de energía el potencial energético del residuo cuantificado puede ser para el aserrín de 1,948.59 TJ/tonelas equivalente a 1.94 PJ, para el caso de la viruta puede ser de 4,655.07 TJ/toneladas, equivalente a 4.65 PJ, lo cual representa un potencial energético considerable para la generación de bioenergía.
- En lo que respecta consumo de madera y gasto económico representativo, la cantidad de madera (duelas) utilizadas a la semana por los 50 artesanos diagnosticados es de 2,540 duelas (± 14.70), lo que representa en promedio por artesano 50.8 maderas (duelas) a la semana; el costo económico que representa este consumo maderable a la semana, fijando un precio de \$16.00 pesos (MXN)

o \$0.80 USD correspondiente al año 2020, es de \$40,640.00 (MXN) = \$2,044.64 USD, es decir, en promedio un artesano gasta a la semana \$812.8 (MXN) = \$40.89 USD, en el consumo de dula para sus diferentes muebles.

- Para el análisis del contenido de humedad inicial de las muestras recolectadas en la comunidad de estudio (Aserrín y viruta) osciló entre 9.54% a 33.33% de humedad, siguiendo la norma de estabilización de la humedad, el parámetro encontrado osciló entre 15.30% para aserrín al 16.82% para la viruta, lo cual lo hacen un material apto para la generación de biocombustibles densificados.
- El análisis granulométrico muestran que para las muestras de viruta el tamaño de partícula sólo el 25% puede ser aprovechado para la fabricación de briquetas, el 52% puede ser utilizado para la fabricación de pellets, y el 25% se sugiere el aprovechamiento mediante dos opciones: primero volver a moler y obtener un nuevo porcentaje; y segundo, integrarlo a otro lote de biomasa para otra tamización. Para el caso del aserrín muestra que el 61%, puede ser aprovechado para fabricar briquetas. El 29%, se puede utilizar para otro tipo de biocombustible (Pellets). El 10%, pueden derivarse en dos opciones, el primero volver a moler y obtener un nuevo porcentaje, el segundo integrarlo a otro lote de biomasa para otra tamización.
- La densidad a granel, para las muestras de viruta oscilan entre 40.49 a 57.88 kg/m³, mientras que para las muestras de aserrín, presentan valores de 143.89 a 196.91 kg/m³.
- En lo que se refiere al poder calorífico, se determinó que se encuentra en un rango entre 17.8 MJ/kg y 18.0 MJ/kg, el cual es un valor aceptable para las especies de residuos maderables de *Pinus* spp., con el cual se infiere que el residuo maderable puede ser utilizado para la generación de briquetas
- En lo que respecta a los análisis proximal, para el contenido de cenizas se encuentra en un rango de 0.30% a 0.64% para las muestras de aserrín mientras que para las muestras de viruta se encuentran entre 0.31% a 0.62% por lo cual cumplen con este parámetro. Para el caso del material volátil, muestran que ambos residuos (aserrín y viruta) no varían uno de otro más del 2%, los rangos de variación se encuentran entre 1.03% a 1.07%, por lo tanto el contenido de

material volátil para las muestras de aserrín se encuentran 78.86% a 88.99% de volatilidad y para el caso de las muestras de viruta se encuentran entre 66.89% a 91.31%. Por último, el carbono fijo para las muestras de aserrín y de viruta se encuentran en un rango entre 27.63% a 35.92%, sólo la muestra 4 de aserrín presenta un alto contenido de carbono, pero en comparación de trabajos reportados resulta menor ya que se han encontrado valores que van desde 48.80% a 50.30%, para muestras del género *Pinus*.

- El análisis químico realizado a las muestras de *Pinus* spp, para el caso de la hemicelulosa en las muestras de aserrín se obtuvo un promedio de 13.4%, para celulosa fue de 52.6%, para la lignina fue de 26.7%, y 7.6% de otros componentes (extraíbles). Para el caso de las muestras de viruta el contenido de hemicelulosa se obtuvo en promedio 10.6%, para celulosa fue de 52.8%, para lignina fue de 25.9% y 10.5% de otros componentes (extraíbles).
- El microanálisis de cenizas, reveló la presencia mayoritaria de los elementos químicos más comunes y presentes en la madera (potasio, calcio y magnesio), principales componentes de las sustancias inorgánicas de la madera encontradas hasta en un 80 % en las cenizas.
- En lo que respecta a el análisis elemental, las muestras de biomasa de aserrín, el contenido de carbono osciló entre 47.73% y 48.29%, las muestras de viruta entre 47.73% y 48.96%, el oxígeno para el aserrín estuvo entre 44.79% y 45.49%, para la viruta entre 44.50% y 45.81% y para el hidrógeno en el aserrín fue de 5.98% a 6.13% y para viruta estuvo entre 5.99% y 6.16%.
- En lo que respecta al análisis termogravimétrico, se observa la mayor velocidad de degradación (DTG). Al realizar una comparación entre los picos de la hemicelulosa (hombro) aproximadamente a 325°C, y celulosa ($\approx$ 360°C), se observa que presentan diferente altura y posición, lo cual indica la influencia que tienen la distribución de los compuestos orgánicos e inorgánicos en el proceso de degradación térmica del pino.
- Con la caracterización y análisis descritos con anterioridad se pudo realizar la producción de briquetas con dimensiones de 7 a 8.3 cm de longitud por 7.2 cm de diámetro.

- En lo que respecta al secado de madera la primera fase de secado se realizó con energía solar, las dimensiones aproximadas de la pila fueron de 1.20 m de alto, 1.30 m de ancho y 2 m de largo, para lo cual se utilizaron probetas para determinar la curva de secado, en este sentido se realizaron tres tandas de secado: la primera con energía solar, la segunda utilizando las briquetas producidas y la tercera utilizando la energía solar y la energía de la biomasa (briquetas). De estos tres análisis se puede concluir que el comparativo del secado con energía solar es favorable y cumple con las expectativas que se tenía del prototipo, por lo cual se da garantía que, si sólo se utiliza la energía solar para secar la madera, el tiempo de secado que se lleva es de 22 a 25 días aproximadamente teniendo una humeada final promedio de 18.14% de contenido de humedad. El secado de madera con la utilización de un biocombustible sólido como lo son las briquetas, el secado de la madera tarda en un periodo de 22 a 24 días, lo cual lo hacen similar al secado con energía solar, la desventaja en este secado es la manipulación de las briquetas para su funcionamiento, además de que se tuvo que realizar a partir de que la radiación del lugar bajara su intensidad para poder tener unos resultados favorables, en este caso el secado tuvo una humeada final promedio de 22.95% de humedad, aun para reducir más la humedad se requiere de más tiempo, así como de la producción y aplicación de briquetas. Por último el secado de madera de forma híbrida, esta prueba de secado se logró mostrar que el secado de forma híbrida acelera el proceso de secado en menor tiempo en comparación del secado con energía solar y del secado con briquetas, ya que el contenido de humedad final en la madera en promedio fue de 14.43%, tomando en cuenta un tiempo de 20 a 21 días, y la utilización de briquetas se reduce a la mitad en comparación si fuese solo el secado con briquetas (una utilización en un rango de 650 a 700 briquetas por tanda de secado). Finalmente, en esta investigación se logró demostrar que la reutilización y/o aprovechamiento biomásico, como es el residuo de *Pinus* spp., de una comunidad con vocación maderable, puede ser un material apto para la generación de biocombustibles sólidos, y estos a su vez pueden ser densificados en biocombustibles de tipo sólido como fueron las briquetas para esta

investigación, y posteriormente ser utilizados en un secador para madera, para secar la madera de una cierta especie y tamaño, que los habitantes de la comunidad requieren para la elaboración de sus muebles, por ello si la madera llega a un secado óptimo y no sufre defectos físicos (hongos, grietas, torceduras) la madera tendrá un contenido de humedad estable y óptimo para ser utilizados en los muebles de esta comunidad, y tal vez darle un valor agregado más al mueble producido, y al cliente final una seguridad en lo que está comprando en este caso un mueble.

RECOMENDACIONES

- Con respecto al material o residuo de *Pinus* spp., un constante diagnóstico y monitoreo de los residuos generados, ya que se ha detectado que en el último año la reducción de los residuos maderables ha disminuido por la cuestión de que distintos artesanos han migrado a otro país o han buscado otra alternativa de trabajo.
- Realizar la evaluación del secado de madera de forma híbrida, pero con un pre-secado al aire libre de la madera a secar, esto para evitar el gasto de energía del secador.
- Se sugiere intercambiar en distintas posiciones el radiador (serpentín de cobre) que tiene el secador para, analizar la emisión de temperatura en distintas posiciones y ver si este intercambio puede aumentar el proceso de secado de la madera.
- Se sugiere colocar al menos otros dos ventiladores uno en la parte superior del secador, y otro en la parte de abajo donde está el radiador, para circular a un más el aire caliente acumulado.
- También se sugiere optimizar la producción de briquetas a través de un dispositivo más funcional, ya que se requiere un constante uso de las briquetas para el secado. Se sugiere realizar ajustes al diseño de la briqueteadora para facilitar la introducción de los materiales a los moldes de las briquetas, pudiéndosele adaptar una especie de tolva, así como algunos mecanismos de

engranaje para incrementar la producción, y disminuir el costo por unidad de cada briqueta.

- Se recomienda otro quemador o cámara de combustión para las briquetas y calentar el agua, esto porque la cámara es muy pequeña y no se logra combustionar de manera adecuada las briquetas.
- Se sugiere realizar una evaluación del impacto ambiental del dispositivo en función y de las briquetas utilizadas, para determinar su viabilidad en términos ambientales.
- Desarrollar e implementar protocolos para producir, evaluar y transferir el uso de briquetas en dispositivos de uso final en condiciones de campo como es este caso de estudio del secador.
- Realizar un análisis económico de costo de recuperación del secador y todas las etapas involucradas.
- Impulsar acciones estratégicas para generar el aprovechamiento, producción y consumo de los biocombustibles sólidos, derivados de residuos maderables en las comunidades rurales a través de un estudio de mercado detallado para el consumo de briquetas, y determinar la viabilidad económica de este combustible, así como también evaluar sus distintas formas de aprovechamiento y aplicación.
- Generar talleres de información en materia de biocombustibles sólidos ya que el éxito de las briquetas y la utilización del secador dependerá de su uso, partiendo desde la misma comunidad. Llevar a cabo relaciones estratégicas con el gobierno autónomo local de la comunidad de Pichátaro para generar proyectos de investigación que promuevan el aprovechamiento y desarrollo de biocombustibles sólidos a partir del residuo maderable generado en la misma comunidad y su aplicación en distintas áreas donde se requiera.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

- Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mählknecht, J., Dallemand, J. F., & Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>
- Álvarez-Castañón, L. D. C., & Tagle-Zamora, D. (2019). Transferencia de ecotecnologías y su adopción social en localidades vulnerables: una metodología para valorar su viabilidad. *CienciaUAT*, 13(2), 83. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i2.1121>
- Alvarez. (2021). *Humedad De La Madera En La Construcción*. file:///C:/Users/USER/Downloads/p_humedad (1).pdf
- Ang, D., & Sevgi, Ş. (2014). International Journal of Phytoremediation Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L .). *International Journal of Phytoremediation*, 16(December 2014), 37–41. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.856842>
- Angulo-Mosquera, L. S., Alvarado-Alvarado, A. A., Rivas-Arrieta, M. J., Cattaneo, C. R., Rene, E. R., & García-Depraect, O. (2021). Production of solid biofuels from organic waste in developing countries: A review from sustainability and economic feasibility perspectives. *Science of the Total Environment*, 795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148816>
- 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>
- Arcibar-Orozco, J. A., Josue, D. B., Rios-Hurtado, J. C., & Rangel-Mendez, J. R. (2014). Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. *Chemical Engineering Journal*, 249, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.096>
- Arévalo, J., Quispe, G., & Raymundo, C. (2017). Sustainable Energy Model for the production of biomass briquettes based on rice husk in low-income agricultural areas in Peru. *Energy Procedia*, 141, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.026>
- Arneth, A., Shin, Y. J., Leadley, P., Rondinini, C., Bukvareva, E., Kolb, M., Midgley, G. F., Oberdorff, T., Palomo, I., & Saito, O. (2020). Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(49), 30882–30891. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009584117>
- Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergy from forest and wood residues. *Madera y Bosques*, 24(Special Issue), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernández-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles

- aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido. *Polo Del Conocimiento*, 3(7), 420. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.565>
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(25), 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>
- Bennici, S., Jeguirim, M., Limousy, L., Haddad, K., Vaulot, C., Michelin, L., Josien, L., & Zorpas, A. A. (2019). Influence of CO₂ Concentration and Inorganic Species on the Gasification of Lignocellulosic Biomass Derived Chars. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3745–3752. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00658-1>
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E. A., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera Bosques*, 19(2), 21–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>
- Bolzon De Muñiz, G. I., Lengowski, E. C., Nisgoski, S., De Magalhães, W. L. E., Tanaboe De Oliveira, V., & Hansel, F. (2014). Characterization of Pinus spp needles and evaluation of their potential use for energy. *CERNE*, 20, 245–250. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/01047760.201420021358>
- Boyzo Correa, J. M. (2019). *Construcción, caracterización e implementación piloto de un secador solar de biomasa considerando criterios de sostenibilidad* [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7934
- Bravo, C., Garcés, D., Faba, L., Sastre, H., & Ordóñez, S. (2017). Selective arabinose extraction from Pinus sp. sawdust by two-step soft acid hydrolysis. *Industrial Crops & Products*, 104(May), 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.027>
- Brebu, M., & Willfor, S. (2011). *Cellulose Chemistry and Technology Thermal Behaviour / Treatment of Some Vegetable Residues . Iv . Thermal Decomposition of Eucalyptus*. 45, 29–42.
- Bridgwater, A. V. (2011). *Upgrading Fast Pyrolysis Liquids. Thermochemical Processing of Biomass Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. Brown R C.
- Brundtland, G. H. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. In *Asamblea General de las Naciones Unidas* (Vol. 4, Issue 1). <https://doi.org/10.18268/bsgm1908v4n1x1>
- Caliano, M., Bianco, N., Graditi, G., & Mongibello, L. (2017). Design optimization and sensitivity analysis of a biomass-fired combined cooling, heating and power system with thermal energy storage systems. *Energy Conversion and Management*, 149(April), 631–645. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.048>
- Carrillo-Parra, A., & Rutiaga, J. (2020). *BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS* (A. Carrillo-Parra & J. Rutiaga (Eds.)). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Carrington, G., & Stephenson, J. (2018). The politics of energy scenarios: Are International

- Energy Agency and other conservative projections hampering the renewable energy transition? *Energy Research and Social Science*, 46(July), 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.011>
- Cavali, M., Soccol, C. R., Tavares, D., Zevallos Torres, L. A., De Andrade Tanabe, V. O., Zandoná Filho, A., & Lorenci Woiciechowski, A. (2020). Bioresource Technology Effect of sequential acid-alkaline treatment on physical and chemical characteristics of lignin and cellulose from pine (*Pinus* spp .) residual sawdust. *Bioresource Technology*, 316(July), 123884. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123884>
- Chang, A., García, C., López, B., Nuñez, J., Beltrán, A., & Morales-Máximo, M. (2017). Análisis Del Ciclo De Vida De Un Secador De Biomasa Forestal Maderable. *Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 12(6), 1–6.
- Chavan, B. R., Yakupitiyage, A., & Kumar, S. (2011). Drying performance, quality characteristics, and financial evaluation of Indian Mackerel (*Rastrilliger kangurta*) dried by a solar tunnel dryer. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 16(2), 11–25.
- Chávez-Rosales, J. S., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Lujan-Álvarez, C., & Rutiaga-Quñones, J. G. (2021). Basic Chemical Composition of *Pinus* spp. Sawdust from Five Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources*, 16(1930–2126), 816–824. <https://doi.org/DOI:10.15376/biores.16.1.816-824>
- Christoforou, E., & Fokaides, P. A. (2019). Advances in solid biofuels. In *Green Energy and Technology* (Vol. PartF1). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00862-8>
- Conte Grand, M., & D'Elia, V. (2017). Desarrollo sostenible y conceptos “verdes.” *Problemas Del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 49(192). <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2018.192.59312>
- Cordera Campos, R. (2017). Globalización en crisis; por un desarrollo sostenible. *Economía UNAM*, 14(40), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.eunam.2017.01.001>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 20(1), 77–88. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.012>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2018). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 52–63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i25.303>
- CREFAL. (2000). *Monografía de Pichátaro Centro de Cooperación Regional para la Educación de Adultos en América Latina Pátzcuaro, Mich. México*.
- Cuencas, E. N., Prioritarias, H., Diana, P., Ascencio, M., Calderas, S. G., Luna, E., Alcocer,

- G., Patricia, D., & García, Á. (2014). *Evaluación Social Regional "SISTEMA DE MICROCUENCAS PRIORITARIAS " PÁTZCUARO - ZIRAHUÉN "* (Issue 443).
- Da Silva, D. (2013). *pdf-tesis-final-derlis-da-silva_compress*. Universidad Tecnológica Intercontinental.
- De Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S., & Olsson, B. A. (2017). Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? *Forest Ecology and Management*, 383, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.028>
- Determinación del Poder Calorífico; UNE-EN 14918:2011. (2016). Asociación Española de Normalización y Certificación. In *Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)*.
- Determinación del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno* (2008)., U.-C. 15104 E. (2008). *Métodos instrumentales [Determination of the content of carbon, hydrogen and nitrogen. Instrumental methods]*.
- Du, Z., Sarofim, A. F., & Longwell, J. P. (1990). Activation Energy Distribution in Temperature-Programmed Desorption: Modeling and Application to the Soot–Oxygen System. *Energy and Fuels*, 4(3), 296–302. <https://doi.org/10.1021/ef00021a014>
- Energy Information Administration (EIA). (2022). Annual Energy Outlook 2022. In *Annual Energy Outlook* (Vol. 2022). <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=48-AEO2022®ion=1-0&cases=ref2022&start=2020&end=2050&f=A&sourcekey=0>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1983). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. de Gruyter.
- Fernández, F., Boluda, C. J., Olivera, J., Guillermo, L. A., Gómez, B., Echavarria, E., & Mendis Gómez, A. (2017). Análisis Elemental Prospectivo De La Biomasa Algal Acumulada En Las Costas De La República Dominicana. *Revista Centro Azúcar*, 44(1), 11–22.
- Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A., & Ferrandez-Garcia, M. T. (2019). Evaluation of fruit and vegetable containers made from Mulberry wood (*Morus Alba L.*) waste. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/app9091806>
- Flores Hernandez, U., Jaeger, D., & Islas Samperio, J. (2020). Modeling Forest Woody Biomass Availability for Energy Use Based on Short-Term Forecasting Scenarios. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2137–2151. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0511-7>
- Francisco Arriaga, F., Guerrero García Rojas, H., Kido Cruz, A., & Cortés Zavala, M. (2011). Ingreso generado por la recolección de recursos forestales en Pichátaro, Michoacán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 8(1), 107–117.
- Fuentes-Salinas, M., Luna-Sánchez, D., Osorio-Suárez, J., & Corona-Islas, J. (2003a). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 9(2), 171–176.

- Fuentes-Salinas, M., Luna-Sánchez, D., Osorio-Suárez, J., & Corona-Islas, J. (2003b). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 9, 171–176.
- Funda, T., Fundova, I., Gorzsás, A., Fries, A., & Wu, H. X. (2020). Predicting the chemical composition of juvenile and mature woods in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using FTIR spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 54(2), 289–311. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01159-4>
- García-Bustamante, C. A., López-Sosa, L. B., Nuñez-Gonzalez, J., & Morales-Máximo, M. (2018). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN SECADOR SOLAR DE BIOMASA CON RESPALDO TÉRMICO DE COMBUSTIÓN DE RESIDUOS FORESTALES. *XVLII Semana Nacional de Energía Solar*, 42(8701), 149–154.
- García, C., & Masera, O. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México*.
- García, R., González-Vázquez, M. P., Rubiera, F., Pevida, C., & Gil, M. V. (2021). Co-pelletization of pine sawdust and refused derived fuel (RDF) to high-quality waste-derived pellets. *Journal of Cleaner Production*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129635>
- Gastón, J., Cedillo, G., Xanat, D., & Némiga, A. (2017). *Evaluación de sustentabilidad para el diseño y gestión de una propuesta agroecológica y ecotecnológica*.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24(January), 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Goche, J. ., Domínguez, P. ., Montiel, E., & Palacio, C. (2016). Capítulo 1. Biocombustibles sólidos una opción sustentable para la producción de energía. In A. Carrillo-Parra & J. G. Rutiaga-Quñones (Eds.), *In: Biocombustibles sólidos*. ((1nd ed.), pp. 9–30).
- Goering HK, V. S. P. (1970). *Forage fiber analyses (appa- ratus, reagents, procedures and some applications)*. (US Government Printing Office (Ed.); USDA-ARS). agricultural handbook.
- Gollakota, A. R. K., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(August 2016), 1378–1392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>
- Gomez Gil, C. (2016). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). *Revista de La Universidad de La Salle*, 2016(70), 141.
- Gong, C., Huang, J., Feng, C., Wang, G., Tabil, L., & Wang, D. (2016). Bioresource Technology Effects and mechanism of ball milling on torrefaction of pine sawdust. *Bioresource Technology*, 214, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.062>
- Gonzalez-Salazar, M. A., Morini, M., Pinelli, M., Ruggero, P., Venturini, M., Finkenrath, M., & Witold-roger, P. (2014). Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia. *Applied Energy*, xxx, 1–16.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.004>

- Guilhermino, A., Lourinho, G., Brito, P., & Almeida, N. (2018). Assessment of the Use of Forest Biomass Residues for Bioenergy in Alto Alentejo, Portugal: Logistics, Economic and Financial Perspectives. *Waste and Biomass Valorization*, 9(5), 739–753. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9830-3>
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Hansen, K., Breyer, C., & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*, 175, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>
- Harjanne, A., & Korhonen, J. M. (2019). Abandoning the concept of renewable energy. *Energy Policy*, 127(September 2018), 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.029>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2017). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, 1–1216. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Healy, N., & Barry, J. (2017). Politicizing energy justice and energy system transitions: Fossil fuel divestment and a “just transition.” *Energy Policy*, 108(May), 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.014>
- Hernández, U. F., Jaeger, D., & Samperio, J. I. (2017). Bioenergy potential and utilization costs for the supply of forest woody biomass for energetic use at a regional scale in Mexico. *Energies*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/en10081192>
- Herrera-Arroyo, M. L., Rico, Y., & Pascual-Cortes, M. (2021). The quiensabe, *Hedeoma piperita* (Lamiaceae), a species with cultural importance in the indigenous community of San Francisco Pichataro, Michoacan, Mexico: bases for its conservation management. *Acta Botanica Mexicana*, 128, 1–16. <https://doi.org/10.21829/ABM128.2021.1863>
- Herrera-Bolaños, O., Ruiz-Aquino, F., Santiago-García, W., & Sarmiento-Bustos, D. (2015). Secado solar: una alternativa de bajo costo para secar madera aserrada en la sierra de Juárez, Oaxaca. *Agro Productividad*, 4(1), 88–100.
- Herrera-Fernandez, A., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F. E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarran, P., & Rutiaga-Quñones, J. G. (2017). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encino (*Quercus Candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, 72, 136–154.
- Huang, F., Singh, P. M., & Ragauskas, A. J. (2011). Characterization of milled wood lignin (MWL) in Loblolly pine stem wood, residue, and bark. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(24), 12910–12916. <https://doi.org/10.1021/jf202701b>
- INEGI. (2020). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. <https://www.inegi.org.mx>

- IPCC. (2014). *Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability* (C. U. Press (Ed.)). Cambridge University Press.
- Jackson, R. W., Neto, A. B. F., & Erfanian, E. (2018). Woody biomass processing: Potential economic impacts on rural regions. *Energy Policy*, 115, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.001>
- Jouravlev, A., & Matus, S. S. (2020). *Reflexiones sobre la gestión del agua en América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL*.
- Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). Production and characterization of hybrid briquettes from corncobs and oil palm trunk bark under a low pressure densification technique. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062468>
- Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2021). Evaluation of hybrid briquettes from corncob and oil palm trunk bark in a domestic cooking application for rural communities in Nigeria. *Journal of Cleaner Production*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124745>
- Kylli, A., Christoforou, E., & Fokaides, P. A. (2016). Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 84, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.018>
- Lin, B., Silveira, E. A., Colin, B., Chen, W., & Lin, Y. (2019). Modeling and prediction of devolatilization and elemental composition of wood during mild pyrolysis in a pilot-scale reactor. *Industrial Crops & Products*, 131(January), 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.065>
- Lopez-Ridaura, S., Masera, O., & Astier, M. (2000). Evaluating the sustainability of integrated peasantry systems the MESMIS framework. *LEISA Magazine*, 16(4), 28–30.
- López-Sosa, L. B., & Morales-Máximo, M. (2022). *Manual de principios sobre vinculación, innovación y diseño para el desarrollo de proyectos ecotecnológicos* (A. Millán-Ramírez (Ed.); 1a ed). Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. <https://repositoriouiim.mx/xmlui/handle/123456789/133>
- López-Sosa, L. B., Núñez-González, J., Beltrán, A., Morales-Máximo, M., Morales-Sánchez, M., Serrano-Medrano, M., & García, C. A. (2019). A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205620>
- López, I., Arriaga, A., & Pardo, M. (2018). The social dimension of sustainable development: The everlasting forgotten? *Revista Espanola de Sociologia*, 21(25–41). <https://doi.org/https://doi.org/10.22325/fes/res.2018.2>
- Magdziarz, A., Dalai, A. K., & Koziński, J. A. (2016). Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes. *Fuel*, 176, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.069>
- Mandley, S. J., Daioglou, V., Junginger, H. M., van Vuuren, D. P., & Wicke, B. (2020). EU

- bioenergy development to 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127(April), 109858. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109858>
- Manrique, S. M., Salvo, A., Villafañe, F., Martín, N., & Honorato, M. (2020). *Una mirada desde múltiples perspectivas y dimensiones a los Sistemas de Bioenergía en Iberoamérica II. 1. Panorama de tecnologías de bioenergía en Argentina*.
- Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F. G., Zapata-Sierra, A., & Gil, C. (2013). Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.020>
- Mario, J., Fandiño, M., Enrique, Y., Doria, G., David, R., & Vasquez, G. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz , bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25, 643–653. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643>
- Martínez-Pinillos Cueto, E. (1997). Diseño y ensayo de un secador solar para madera. *Madera y Bosques*, 3(2), 13–28. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.321370>
- Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Vega, J., Díaz, R., Guerrero, G., & Cecotti, L. (2011). *MESA DIRECTIVA REMBIO 2011*.
- Meng, F., Ibbett, R., de Vrije, T., Metcalf, P., Tucker, G., & McKechnie, J. (2019). Process simulation and life cycle assessment of converting autoclaved municipal solid waste into butanol and ethanol as transport fuels. *Waste Management*, 89(2019), 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.003>
- Messina, D., & Contreras Lisperguer, R. (2019). *Sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe*.
- Meza Lopez, Castillo, Z. C., Villareyna, L. O. R., & Peralta, L. L. F. (2018). Solar dryer by forced convection with addition of heat through thermal boiler for the treatment of wood drying in FAREM. *Discusión. FAREM*.
- Milota, M. R., & Wengert, E. M. (1995). Applied drying technology, 1988 to 1993. *Forest Products Journal*, 45(5), 33.
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2018). Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 251, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.029>
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2019). Thermal and catalytic pyrolysis of pine sawdust (*Pinus ponderosa*) and Gulmohar seed (*Delonix regia*) towards production of fuel and chemicals. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(2), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.12.004>
- Modi, Y. D., Patel, J., Nagababu, G., & Jani, H. K. (2020). Wind Farm Layout Optimization Using Teaching Learning Based Optimization Technique Considering Power and Cost. In *Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 161). https://doi.org/10.1007/978-981-32-9578-0_2

- Moosmann, D., Majer, S., Ugarte, S., Ladu, L., Wurster, S., & Thrän, D. (2020). Strengths and gaps of the EU frameworks for the sustainability assessment of bio-based products and bioenergy. *Energy, Sustainability and Society*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00251-8>
- Morales-Máximo, M., Castro Sánchez F.J., & Rutiaga-Quiñones, J. . (2019). Estudio socioeconómico para la evaluación de biocombustibles sólidos: eficiencia energética y alterna en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. *INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE: IEC*, 2(2448–5624), 577–582. https://www.researchgate.net/publication/341725718_Estudio_socioeconomico_para_la_evaluacion_de_biocombustibles_solidos_eficiencia_energetica_y_alterna_en_la_comunidad_de_San_Francisco_Pichataro_Michoacan_Mexico
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. . (2020). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production : A Case Study in the Community of San Francisco Pich á taro , Michoac á n , Mexico. *Applied Sciences*, 10(8), 2933. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Morales-Máximo, M, Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Pintor-Ibarra, L. ., & Rutiaga-Quiñones, J. . (2018). Materiales densificados con biomasa forestal como alternativa energética en la comunidad de san francisco Pichátaro, Michoacán, México. *Red Mexicana de Bioenergía*, XIV, 168–169. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Morales-Máximo, Mario. (2019). Aprovechamiento del aserrín y viruta de pino (Pinus spp) para la producción y evaluación de briquetas, como energía alterna en la comunidad de San francisco Pichátaro, Michoacán [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. In *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58151>
- Morales-Máximo, Mario, García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of pinus spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in mexico. *Forests*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/f12080977>
- Morales-Máximo, Mario, López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Evaluación termográfica de la combustión de briquetas con aglomerante variable de residuos maderables de pino : Análisis comparativo en fogones tradicionales del estado de Michoacán. *Semana Nacional de Energía Solar*, XVLL(2448–5543), 439–444. https://www.researchgate.net/publication/333561438_
- Morales-Máximo, Mario, & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Aprovechamiento del aserrín de pino para la producción de briquetas como energía alterna: caracterización térmica y análisis de durabilidad por masa presente en la combustión. *Semana Nacional de Energía*, XVLL(2448–5543), 420–425. https://www.researchgate.net/publication/340570084_
- Morales-Máximo, Mario, Rutiaga-Quiñones, J. G., Masera, O., & Ruiz-García, V. M. (2022). Briquettes from Pinus spp . Residues : Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies*, 15(9), 3419.

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15093419>

- Morales M., C. N., López-Sosa, L. B., Rutiaga-Quiñones, J. G., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Pintor-Ibarra, L. F., López-Miranda, A., Delgado-Domínguez, S. N., Rodríguez-Magallón, M. del C., & Morales-Máximo, M. (2022). Characterization of Agricultural Residues of Zea mays for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/en15196870>
- Muley, P. D., Henkel, C., Abdollahi, K. K., Marculescu, C., & Boldor, D. (2016). A critical comparison of pyrolysis of cellulose, lignin, and pine sawdust using an induction heating reactor. *Energy Conversion and Management*, 117, 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.041>
- Muller, A. (2014). Sustainable Farming of Bioenergy Crops. In *Bioenergy Research: Advances and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59561-4.00023-1>
- Musule, R., Alarcón-Gutiérrez, E., Houbbron, E. P., Bárcenas-Pazos, G. M., del Rosario Pineda-López, M., Domínguez, Z., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Chemical composition of lignocellulosic biomass in the wood of Abies religiosa across an altitudinal gradient. *Journal of Wood Science*, 62(6), 537–547. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1585-0>
- Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchik-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Zelinski, V., & Pintor-Ibarra, L. F. (2016). Calorific value and chemical composition of five semi-arid Mexican tree species. *Forests*, 7(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/f7030058>
- Nie, Y., & Bi, X. (2018). Life-cycle assessment of transportation biofuels from hydrothermal liquefaction of forest residues in British Columbia. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1019-x>
- Nordell, E., Björn, A., Waern, S., Shakeri Yekta, S., Sundgren, I., & Moestedt, J. (2022). Thermal post-treatment of digestate in order to increase biogas production with simultaneous pasteurization. *Journal of Biotechnology*, 344, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.12.007>
- Nska, M. D. zy, Nski, S. O., Piekut, J., & Yildiz, G. (2020). The utilization of plum stones for pellet production and investigation of post-combustion flue gas emissions. *Energies*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/en13195107>
- Núñez-Retana, V. D., Rosales-Serna, R., Prieto-Ruiz, J. Á., Wehenkel, C., & Carrillo-Parra, A. (2020). Improving the physical, mechanical and energetic properties of Quercus spp. wood pellets by adding pine sawdust. *PeerJ*, 8, 1–20. <https://doi.org/10.7717/peerj.9766>
- Núñez-Retana, V. D., Wehenkel, C., Vega-Nieva, D. J., García-Quezada, J., & Carrillo-Parra, A. (2019). The bioenergetic potential of four oak species from northeastern Mexico. *Forests*, 10(10), 869. <https://doi.org/10.3390/f10100869>

- Núñez, C. E. (2004). ULTRAESTRUCTURA Y TOPOQUÍMICA DE LA PARED CELULAR. *PROCYP*, 53(3), 1–17. <http://www.unam.edu.ar/procyp.html>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook: the production and thermal utilisation of pellets*. Routledge.
- Orihuela, R., Reyes, L. A., Rangel, J. R., Chávez, M. C., Márquez, F., Correa, F., Carrillo, A., & Rutiaga, J. G. (2016). Elaboración de briquetas con residuos maderables de pino. In Rutiaga y Carrillo (Ed.), *Química de los materiales lignocelulósicos y su potencial bionergético* (1nd ed., p. Capítulo 11).
- Ortiz, L; Tejeda, A; Vázquez, A. P. (2003). Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria II: Producción de elementos densificados. *Revista Del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de La Madera de Galicia CIS-Madera*, 11.
- Ortiz Moreno, A. J., Masera, O., & Fuentes Gutierrez, A. (2014). *La ecotecnología en México*.
- Patel, M., Zhang, X., & Kumar, A. (2016). Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1486–1499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.070>
- Patiño Martínez PE. (2014). PE Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. *Innovaciencia*, 2(1), 45–52.
- Pearce-Higgins, J. W., Antão, L. H., Bates, R. E., Bowgen, K. M., Bradshaw, C. D., Duffield, S. J., Ffoulkes, C., Franco, A. M. A., Geschke, J., Gregory, R. D., Harley, M. J., Hodgson, J. A., Jenkins, R. L. M., Kapos, V., Maltby, K. M., Watts, O., Willis, S. G., & Morecroft, M. D. (2022). A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. *Ecological Indicators*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690>
- Pérez-Denicia, E., Fernández-Luqueño, F., Vilariño-Ayala, D., Manuel Montaña-Zetina, L., & Alfonso Maldonado-López, L. (2017). Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(January), 597–613. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.009>
- Pintor-Ibarra, L. F., Carrilho-Parra, A., Herrera-Bucio, R., & López-Albarrán, P. (2017). By-Products From Pinus Leiophylla , P . Montezumae and P . Pseudostrobus for a Bioenergetics Use. *Wood Research*, 62(6), 849–862.
- Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quíñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber by-products from pinus leiophylla, P. Montezumae and P. Pseudostrobus for a bioenergetics use. *Wood Research*, 62(6), 849–861.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., & Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133–

148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.052>

- Quintanar Olguín, J., Fuentes López, M. E., & Tamarit Urías, J. C. (2011). Evaluación Económica De Un Secador Solar Para Madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7), 97–104. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.561>
- Rahman, M. M., Chai, M., Sarker, M., Nishu, & Liu, R. (2020). Catalytic pyrolysis of pinewood over ZSM-5 and CaO for aromatic hydrocarbon: Analytical Py-GC/MS study. *Journal of the Energy Institute*, 93(1), 425–435. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.014>
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Hernández-Solís, J. J., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Evaluation of Selected Physical and Thermal Properties of Briquette Hardwood Biomass Biofuel. *BioEnergy Research*, 15(0123456789), 1407–1414. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Rather, R. A., Wani, A. W., Mumtaz, S., Padder, S. A., Khan, A. H., Almohana, A. I., Almojil, S. F., Alam, S. S., & Baba, T. R. (2022). Bioenergy: a foundation to environmental sustainability in a changing global climate scenario. *Journal of King Saud University - Science*, 34(1), 101734. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101734>
- Reid, W. V., Ali, M. K., & Field, C. B. (2020). The future of bioenergy. In *Global Change Biology* (Vol. 26, Issue 1). <https://doi.org/10.1111/gcb.14883>
- Reis Portilho, G., Resende De Castro, V., Oliveira Carneiro, A. D. C., Cola Zanuncio, J., Vinha Zanuncio, A. J., Gabriella Surdi, P., Gominho, J., & De Oliveira Araújo, S. (2020). Potential of Briquette Produced with Torrefied Agroforestry Biomass to Generate Energy. *Forests*, 11(November), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f11121272>
- Reyes, L. ., Orihuela, R., Aviña, L. ., Carrillo, A., Pérez, E., & Rutiaga, J. . (2016). Capítulo 2. Generalidades sobre los biocombustibles. In: In A. Carrillo-Parra & J. G. Rutiaga-Quiñones (Eds.), *Biocombustibles sólidos* ((1nd ed.), pp. 33–62).
- Rios, M., & Kaltschmitt, M. (2013). Bioenergy potential in Mexico-status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), 239–254. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0085-3>
- Rugolo, M., Lechner, B., Mansilla, R., Mata, G., & Rajchenberg, M. (2020). EVALUATION OF *Pleurotus ostreatus* BASIDIOMES PRODUCTION ON Pinus SAWDUST AND OTHER AGRICULTURAL AND FORESTRY WASTES FROM PATAGONIA , ARGENTINA. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 22(4), 517–526. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000410>
- Ruiz Culty, K., Ballinas-Casarrubias, L., Rodríguez de San Miguel, E., de Gyves, J., Robles-Venzor, J. C., & González-Sánchez, G. (2018). Cellulose recovery from Quercus sp. sawdust using Ethanosolv pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 111(May 2017), 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.004>
- Rusanen, A., Lappalainen, K., Kärkkäinen, J., Tuuttila, T., Mikola, M., & Lassi, U. (2019). Selective hemicellulose hydrolysis of Scots pine sawdust. *Biomass Conversion and*

- Biorefinery*, 9(December), 283–291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13399-018-0357-z>
- Rutiaga-Quiñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-Aquino, F., Rangel-Mendez, J. os. R., Hernández-Solís, J. J., & Lujaán-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources*, 15(4), 8529–8553. <https://doi.org/DOI: 10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- Saba, S., El Bachawati, M., & Malek, M. (2020). Cradle to grave Life Cycle Assessment of Lebanese biomass briquettes. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119851. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119851>
- Sanahuja, J. A., & Vázquez, S. T. (2017). Del milenio a la sostenibilidad: Retos y perspectivas de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. *Política y Sociedad*, 54(2), 521–543. <https://doi.org/10.5209/POSO.51926>
- SENER. (2019). *BALANCE NACIONAL DE ENERGIA*.
- SENER. (2021). *Balance Nacional de Energía* (Secretaria de Energía (Ed.); Dirección). <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Serrato Monroy, C. C., & Lesmes Cepeda, V. (2016). Metodología Para El Cálculo De Energía Extraída a Partir De La Biomasa En El Departamento De Cundinamarca [UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS]. In *Tesis*. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3687>
- Shuma, R., & Madyira, D. M. (2017). Production of Loose Biomass Briquettes from Agricultural and Forestry Residues. *Procedia Manufacturing*, 7, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.026>
- Sierra, C. A. S., Bustamante, E. M. G., & Morales, J. del C. J. (2016). La educación ambiental como base cultural y estrategia para el desarrollo sostenible. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 18(2), 266–281.
- Simo-Tagne, M., Ndukwu, M. C., Zoulalian, A., Bennamoun, L., Kifani-Sahban, F., & Rogaume, Y. (2020). Numerical analysis and validation of a natural convection mix-mode solar dryer for drying red chilli under variable conditions. *Renewable Energy*, 151, 659–673. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.055>
- Simo-Tagne, M., Zoulalian, A., Rémond, R., & Rogaume, Y. (2018). Mathematical modelling and numerical simulation of a simple solar dryer for tropical wood using a collector. *Applied Thermal Engineering*, 131, 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.014>
- Simpson, W. T. (1991). Dry Kiln Operators Manual. United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, Madison, USA. *Agriculture Handbook*, 188, 133–149.
- Solís Rodríguez, L. E., Cerón Cardeña, M. A., & González Ahumada, I. (2003). Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. *Ingeniería*, 7(3), 35–48.

- Song, S., Liu, P., Xu, J., Chong, C., Huang, X., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. (2017). Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province. *Energy*, 130, 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.068>
- Stolarski, M. J., Krzyzaniak, M., Warmiński, K., & Niksa, D. (2016). Energy consumption and costs of heating a detached house with wood briquettes in comparison to other fuels. *Energy Conversion and Management*, 121, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.031>
- Takeda, S., Nam, H., & Chapman, A. (2021). Low-carbon energy transition with the sun and forest: Solar-driven hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.203>
- Tao, J., Zhang, Z., Zhang, L., Huang, D., & Wu, Y. (2021). Quantifying the relative importance of major tracers for fine particles released from biofuel combustion in households in the rural North China Plain. *Environmental Pollution*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115764>
- Tauro, R. et al., Ghilardi, García, A., A, C., & Masera, O. (2016). Recursos Biomásicos. In *Estado del arte de la bioenergía en México*.
- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., & Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(June 2017), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- Taylor, M. J., Alabdrabalameer, H. A., Michopoulos, A. K., Volpe, R., & Skoulou, V. (2020). Augmented Leaching Pretreatments for Forest Wood Waste and Their Effect on Ash Composition and the Lignocellulosic Network. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(14), 5674–5682. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00351>
- Trubetskaya, A., Leahy, J. J., Yazhenskikh, E., Müller, M., Layden, P., Johnson, R., Ståhl, K., & Monaghan, R. F. D. (2019). Characterization of woodstove briquettes from torrefied biomass and coal. *Energy*, 171, 853–865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.064>
- Ulmgren, P. (1997). Non-process elements in a bleached kraft pulp mill with a high degree of system closure-state of the art. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 12(1), 32–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.3183/npprj-1997-12-01-p032-041>
- UNE-EN 14774-1. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. In *Parte 1: Humedad total* (AENOR, p. 10).
- UNE-EN 14775. (2010). Biocombustibles sólidos. In Asociación Española de Normalización y Certificación (Ed.), *Método para la determinación del contenido de cenizas* (AENOR, p. 10).
- UNE-EN 15103. (2010). Biocombustibles sólidos. In *Determinación de la densidad a granel* (AENOR, p. 13).

- UNE-EN 15148. (2010). Biocombustibles sólidos. In *Determinación del contenido de materias volátiles* (AENOR, p. 13).
- UNE-EN 15149-1. (2011). Biocombustibles sólidos. Determinación del tamaño de partícula. In Asociación Española de normalización y certificación (Ed.), *Parte 2: método del tamiz vibrante con abertura de malla inferior o igual a 3.15mm* (AENOR, p. 15).
- Usmani, R. A. (2020). Advanced Biofuels: Review of Effects on Environment and Socioeconomic Development. *European Journal of Sustainable Development Research*, 4(4), em0129. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/8245>
- Vamvuka, D., Kakaras, E., Kastanaki, E., & Grammelis, P. (2003). Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. *Fuel*, 82(15–17), 1949–1960. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00153-4)
- Van Meerbeek, K., Muys, B., & Hermy, M. (2019). Lignocellulosic biomass for bioenergy beyond intensive cropland and forests. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102(November 2018), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.009>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash . Part 1 . Phase – mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>
- Vega-nieva, D. J., Torres, L. O., Luis, J., & Mora, J. (2015). *Measuring and Predicting the Slagging of Woody and Herbaceous Mediterranean Biomass Fuels on a Domestic Pellet Boiler*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02495>
- Vera, Y. E. G., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L. (2019). Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(18). <https://doi.org/10.3390/app9183854>
- Vidal-Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable (RINDERESU)*, 3(1–2), 41–58. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/32/38>
- Wang, Z., Lei, T., Yang, M., Li, Z., Qi, T., Xin, X., He, X., Ajayebi, A., & Yan, X. (2017). Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China. *Applied Energy*, 192, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.071>
- Woo, H., Acuna, M., Cho, S., & Park, J. (2019). Assessment techniques in forest biomass along the timber supply chain. *Forests*, 10(11), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f10111018>
- Zhang, Y., Yang, L., Wang, D., & Li, D. (2018). Structure elucidation and properties of different lignins isolated from acorn shell of *Quercus variabilis* Bl. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(PartA), 1193–1202. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.099>

ANEXOS

ANEXOS**ANEXO 1. Residuo maderable en la comunidad de Pichátaro**

No.	Encuestado	Núm. Costales de aserrín/semana	Núm. Costales de viruta/semana	Aserrín (kg)	Viruta (kg)
1	Mario Morales	4	20	56	120
2	Martin Morales	3	15	42	90
3	Ricardo Felipe	5	18	70	108
4	Armando González	3	22	42	132
5	Macedonio Mendoza	3	25	42	150
6	Issac Paulino	4	18	56	108
7	Vitelio González	5	15	70	90
8	Raúl Paulino	3	15	42	90
9	David Ortega	5	16	70	96
10	José Goche	2	21	28	126
11	Fidel Gómez	4	20	56	120
12	Noe Alcantar	5	20	70	120
13	José Pascual	3	15	42	90
14	Mario García	4	14	56	84
15	Isidro Pérez	3	15	42	90
16	Antonio Nieves	4	10	56	60
17	Maurilio Morales	5	18	70	108
18	Herminio Morales	4	19	56	114
19	Juan Goche	2	22	28	132
20	Antonio Morales	3	23	42	138
21	Aristeo Morales	4	24	56	144
22	Arquímedes Matías	2	20	28	120
23	Armando Matías	2	20	28	120
24	José Ángel Rodríguez	3	19	42	114
25	Dionisio Márquez	5	17	70	102
26	Cesar Urbina	3	12	42	72
27	Ernesto Borja	5	15	70	90
28	José Luis boti	3	16	42	96
29	Enmanuel Méndez	2	21	28	126
30	Martin Martínez	2	20	28	120
31	Aurelio Martínez	4	21	56	126
32	Eduardo González	3	16	42	96
33	Andrés Bartolo	3	18	42	108
34	Noel Nicolas	3	20	42	120
35	Federico Máximo	2	18	28	108

36	BenjamínMáximo	4	17	56	102
37	Julio Cesar	2	19	28	114
38	Reinoldes Sánchez	4	20	56	120
39	Reinaldo Sánchez	2	21	28	126
40	Ricardo Juárez	2	22	28	132
41	Francisco Máximo	5	18	70	108
42	José Juan Arriaga	3	17	42	102
43	Mario Hernández	2	22	28	132
44	SimónMéndez	3	18	42	108
45	Israel Alejandre	2	17	28	102
46	Leovigildo Felipe	4	18	56	108
47	Leopoldo Nicolas	2	19	28	114
48	AndrésMartínez	5	19	70	114
49	AndrésGarcía	4	19	56	114
50	Pascual Arriaga	2	18	28	108
			Total Kg/semana	2324	5532
			SD	15.0837661	17.6563107

ANEXO 2.Madera (duela) utilizada a la semana y costo que representa esta

No.	Encuestado	Número de duelas consumidas a la semana	Gasto económico a la semana en la compra de las duelas
1	Mario Morales	60	960
2	Martin Morales	40	640
3	Ricardo Felipe	50	800
4	Armando González	50	800
5	Macedonio Mendoza	50	800
6	Issac Paulino	40	640
7	Vitelio González	40	640
8	Raúl Paulino	30	480
9	David Ortega	50	800
10	José Goche	40	640
11	Fidel Gómez	35	560
12	Noe Alcantar	50	800
13	José Pascual	60	960
14	Mario García	80	1280
15	Isidro Pérez	40	640
16	Antonio Nieves	30	480
17	Maurilio Morales	50	800

18	Herminio Morales	25	400
19	Juan Goche	50	800
20	Antonio Morales	90	1440
21	Aristeo Morales	30	480
22	Arquímedes Matías	60	960
23	Armando Matías	40	640
24	José Ángel Rodríguez	50	800
25	Dionisio Márquez	100	1600
26	Cesar Urbina	40	640
27	Ernesto Borja	50	800
28	José Luis boti	50	800
29	Enmanuel Méndez	50	800
30	Martin Martínez	50	800
31	Aurelio Martínez	40	640
32	Eduardo González	60	960
33	Andrés Bartolo	40	640
34	Noel Nicolas	50	800
35	Federico Máximo	80	1280
36	Benjamín Máximo	50	800
37	Julio Cesar	60	960
38	Reinoldes Sánchez	50	800
39	Reinaldo Sánchez	50	800
40	Ricardo Juárez	50	800
41	Francisco Máximo	50	800
42	José Juan Arriaga	50	800
43	Mario Hernández	40	640
44	Simón Méndez	60	960
45	Israel Alejandre	40	640
46	Leovigildo Felipe	50	800
47	Leopoldo Nicolas	60	960
48	Andrés Martínez	40	640
49	Andrés García	60	960
50	Pascual Arriaga	80	1280
Total de duelas		2540	
Promedio		50.8	
SD		14.70918081	
		Precio	40640
		Promedio	812.8
		SD	235.3468929

ANEXO 3. Asistencia y participación en congresos, estatales, nacionales e internacionales, asistencia a eventos, exposición del tema de investigación, capacitación en herramientas tecnológicas entre otros







El Gobierno del Estado de Michoacán a través del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación, con la colaboración de la Universidad Vasco de Quiroga, otorgan la presente

CONSTANCIA

A: MARIO MORALES MÁXIMO, FRANCISCO JAVIER CASTRO SÁNCHEZ
Por su ponencia en la "Mesa 7 - Recursos Forestales e Hídricos, Salud, Medio Ambiente, Cambio Climático y Ecosistemas", titulada: ANÁLISIS Y SIMULACIÓN SOBRE EL DISEÑO DE UNA VIVIENDA GEODÉSICA CON CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD
En el marco de las actividades académicas del 14º Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación y el 8º Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán.

Morelia, Michoacán, a 30 de Octubre de 2019

Dr. José Luis Montañez Espinosa

Director General del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán

Ing. José Antonio Herrera Jiménez

Rector de la Universidad Vasco de Quiroga Campus Sta. María.



LA RED MEXICANA DE BIOENERGÍA



OTORGA LA PRESENTE
CONSTANCIA A

José Guadalupe Rutiaga Quiñones

por su participación en la XV Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía con el cartel:

"Evaluación socioeconómica y energética de un estudio local para la generación de biocombustibles sólidos" realizada en Morelia, Michoacán, el 22 de noviembre de 2019.

Rui F. Barahona

DR. LUIS F. BARAHONA PEREZ
Presidente
Red mexicana de bioenergía



DEL 22 AL 26 DE NOVIEMBRE 2021

CONSTANCIA

A: **Mario Morales Máximo**

Por su asistencia al 2do Congreso Nacional de Secado y Cocción Solar de Alimentos.

Dra. Beatriz Castillo Téllez
Presidenta del Congreso 2021



DEL 22 AL 26 DE NOVIEMBRE 2021

DIPLOMA

A: **Mario Morales Máximo**

Por su destacada participación como ponente oral en el trabajo titulado:

Diseño, construcción y evaluación térmica de un secador solar de biomasa con respaldo térmico de combustión de residuos forestales

Dra. Beatriz Castillo Téllez
Presidenta del Congreso 2021



TÍTULO DE MODELO DE UTILIDAD No. 4962

Titular(es):	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		
Domicilio:	9º Piso de la Torre de Rectoría S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, MÉXICO		
Denominación:	SECADOR SOLAR PARA MADERA QUE OPERA CON CALENTAMIENTO DE AIRE MIXTO UTILIZANDO BIOMASA COMO COMBUSTIBLE.		
Clasificación:	CIP:	F26B21/02	
	CPC:	F26B21/001	
Inventor(es):	CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE; ALBERTO BELTRÁN MORALES; JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ; MARIO MORALES MÁXIMO; LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA		
SOLICITUD			
Número:	Fecha de Presentación:	Hora:	
MX/u/2020/000452	30 de Septiembre de 2020	10:25	
Vigencia:	Diez años		
Fecha de Vencimiento:	30 de septiembre de 2030		
Fecha de Expedición:	13 de mayo de 2022		

El registro de referencia se otorga con fundamento en los artículos 1º, 2º fracción I, 6º fracción II, y 58 de la Ley de la Propiedad Industrial.

De conformidad con el artículo 29 de la Ley de la Propiedad Industrial, el presente registro tiene una vigencia de diez años improrrogables, contada a partir de la fecha de presentación de la solicitud y estará sujeta al pago de la tarifa para mantener vigentes los derechos.

Quien suscribe el presente título lo hace con fundamento en lo dispuesto por los artículos 3º fracción I, 5, 10 y 110 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, artículos 1º, 3º, 4º, 5º fracción V inciso a), sub inciso ii), 4º y 12º fracciones I y II del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, artículos 1º, 3º, 4º, 5º fracción V inciso a), sub inciso ii), 16 fracciones I y II y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, 1º, 2º y 3º fracción I y anteproyectos para el Acuerdo Delegatorio de Facultades del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparado por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento. Su integridad y autenticidad, se podrá comprobar en sigadoc.tramite.gob.mx.

Asimismo, se emitió conforme lo previsto por los artículos 1º fracción I, 2º fracción VI, 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.



ANEXO 4. Participación como autor, autor de correspondencia y colaborar en distintas investigaciones Indexadas y JCR

5140
doi:10.1017/S1431927621010874

Microsc. Microanal. 27 (Suppl 1), 2021
© Microscopy Society of America 2021

Electron Microscopy Characterization of *Sargassum* Spp. from the Mexican Caribbean for Application as a Bioconstruction Material

Luis Bernardo López-Sosa¹, Mario Morales-Máximo², Rogelio Anastacio-Paulino¹, Abraham Custodio-Hernández¹, Juan Carlos Corral-Huacuz¹ and Arturo Aguilera-Mandujano³

¹UIIM, United States, ²UVAQ, United States, ³UMSNH, United States

Introduction

In recent years, the influx of *Sargassum* spp. on the coasts of the Mexican Caribbean has increased considerably [1–3], generating effects on the marine ecosystem and the tourism sector. Recently, various applications of these algae have been explored, for example energy production, biofertilizers and as a bio-construction material [1,4]. The thermal conductivity of *Sargassum* spp. is low, so it can be used as a bio-construction material for conventional houses, and increase energy efficiency in these constructions [4,5]. The characterization of *Sargassum* spp. by means of scanning electron microscopy is shown below, to show the identification of some compounds that justify their use as bio-construction material for houses.

3rd International Conference on Natural Resources and Technology IOP Publishing
IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 912 (2021) 012010 doi:10.1088/1755-1315/912/1/012010

Assessment of the energy potential as a solid biofuel of *Sargassum* spp. considering sustainability indicator

C A Ávalos-Betancourt¹, L B López-Sosa^{1*}, M Morales-Máximo^{1,2}, A Aguilera-Mandujano³, J C Corral-Huacuz¹ and R E Rodríguez-Martínez²

¹Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecario Km3, Pátzcuaro C.P. 61614, Michoacán, México.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica SN, Ciudad Universitaria, C.P. 58040, Morelia, Michoacán, México.

³Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Puerto Morelos. C.P. 77580, Quintana Roo, México.

*Email: lberardo.lopez@uiim.edu.mx

International Conference on Alternative Fuels and Electric Vehicles 2021 IOP Publishing
IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1042 (2022) 012019 doi:10.1088/1755-1315/1042/1/012019

Economic-environmental impacts on reduction of energy consumption in technical high schools during the COVID-19 pandemic: case of Manzanillo, Mexico

V D Cuevas-Rodríguez¹, G M Rodríguez-Torres², M Morales-Máximo¹, L B López-Sosa^{1*}

¹Programas Académicos de Posgrado, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecario Km3, Pátzcuaro C.P. 61614, México

²Universidad Tecnológica de la Construcción, Nicolás Ballesteros 1200, Ciudad Industrial 4a Etapa 58200, Morelia, Michoacán

*Email: lberardo.lopez@uiim.edu.mx

Informes de la Construcción
Vol. 74, 567, 2022
julio-septiembre 2022
ISSN-L: 0013-088X
<https://doi.org/10.3934/ic.2022.74.567>

Análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos considerando indicadores de sustentabilidad: ambientales, económicos y energético-funcionales

Multiparametric analysis of three construction systems considering sustainability indicators: environmental, economic and energy-functional

Carla Pineda-Ríos^{1*}, Luis Bernardo López-Sosa^{1,2*}, Mario Morales-Máximo^{1,3,4,5}

RESUMEN

El presente estudio muestra un análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos elaborados de tabique y block de cemento. El análisis se realizó considerando como unidad funcional un metro cuadrado de muro de construcción para cada tabique y block e incluyendo indicadores de sustentabilidad: (a) ambientales, a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), evaluando categorías de impacto como calentamiento global, acidificación y eutrofización; (b) económicos, estimando el costo de materias primas y costo de construcción para la unidad funcional; y (c) energético-funcionales, mediante la resistencia mecánica, la resistencia térmica y resistencia acústica de los materiales de construcción analizados. También se realizó una simulación térmica con los edificios estudiados. El análisis resultante es herramienta comparativa que muestra las diferencias entre los materiales estudiados y representa una metodología para la toma de decisiones con base en la importancia de cada uno de los indicadores propuestos.

Palabras clave: ACV, Construcción, Sustentabilidad, Ecológico, Sistema constructivo

3rd International Conference on Natural Resources and Technology IOP Publishing
IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 912 (2021) 012011 doi:10.1088/1755-1315/912/1/012011

Life cycle analysis (LCA) of the production of wood waste briquettes from *Pinus* spp.: Case study San Francisco Pichátaro, México.

E Medina-Ríos¹, M Morales-Máximo^{1,2*}, L B López-Sosa¹, A Aguilera-Mandujano³ and J C Corral-Huacuz¹

¹Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecario Km3, Pátzcuaro C.P. 61614, Michoacán, México.

²Faculty of Wood Engineering and Technology, University Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. D, University Cd. Morelia C.P. 58060, Michoacán, México.

³Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica SN, Ciudad Universitaria, Morelia C.P. 58040, Michoacán, México.

*E-mail: mmoralesmaximo@gmail.com





