



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIDAD DE RESIDUOS DE MADERA Y TECNOLOGÍAS
PROPUESTAS PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS
SUSTENTABLES**

PRESENTA:

JESSICA ITZEL GONZÁLEZ TREJO

DIRIGIDA POR:

**DRA. MARÍA DOLORES DURAN GARCÍA
DRA. MYRIAM ADELA AMEZCUA ALLIERI**

TOLUCA, ESTADO DE MEXICO, FEBRERO 2021

Índice

CAPÍTULO 1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	11
1.2 Objetivos	12
1.3 Hipótesis	12
1.4 Alcances y limitaciones	12
CAPÍTULO 2. Conceptos generales de la biomasa	13
2.1 Definición de biomasa	13
2.2 Clasificación de biomasa	13
2.3 Características químicas y energéticas de la biomasa	17
2.4 Biomasa forestal	19
2.4.1 Biomasa forestal como materia prima	19
2.5 Caracterización de la biomasa forestal en algunas regiones de América.	22
2.5.1 Caracterización de biomasa forestal en Chile.	22
2.5.2 Caracterización de biomasa forestal en Colombia	25
2.5.3 Caracterización de biomasa forestal en México	25
2.6 Ventajas y desventajas del uso de la biomasa forestal	27
CAPITULO 3. Aplicaciones de la biomasa	29
3.1 Aprovechamiento de la biomasa para generación de energía térmica	29
3.1.1 Uso residencial	29
3.1.2 Uso industrial	30
3.2 Aprovechamiento para generación de energía eléctrica	31
3.2.1 Ciclo Rankine	31
3.2.2 Ciclo Brayton	33
3.2.3 Microturbinas	35
3.2.4 Motores de combustión interna recíprocos	36
3.2.5 Motores Stirling	37
3.2.6 Celdas de combustible	38
3.3 Producción de biocombustibles	39
3.3.1 Biocombustibles líquidos	40
3.3.1.1 Bioetanol	40
3.3.1.2 Biodiesel	41

3.3.2 Biocombustibles gaseosos	41
3.3.2.1 Biogás.....	41
CAPITULO 4. Tecnologías termoquímicas para el aprovechamiento energético de residuos de madera.....	43
4.1 Combustión directa.....	45
4.1.1 Tipos de combustión	46
4.1.1.1 Combustión en lecho fijo	46
4.1.1.2 Combustión de lecho fluidizado	50
4.2 Gasificación.....	56
4.2.1 Tipos de Gasificadores.....	57
4.2.1.2 Gasificador de corriente descendente.....	57
4.2.1.3 Gasificador de fuego doble.....	58
4.3 Pirólisis	59
4.3.1 Tipos de pirólisis	59
CAPITULO 5. Resultados	63
5.1 Producción de biomasa.....	63
5.1.1 Resultados para la tala sustentable a 3 km de carretera	64
5.1.2 Resultados de la tala sustentable a 5 km de carretera.	69
5.1.3 Resultados de la biomasa proveniente del aserrío.....	74
5.2 Potencial Energético.....	80
5.3 Emisiones de CO₂.....	92
5.4 Propuesta de especificaciones técnicas para el uso de biomasa forestal	94
5.5 Propuesta de tecnología para el aprovechamiento de los residuos de madera forestal.....	95
Conclusiones.....	96
Bibliografía.....	98
Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Índice de figuras

Figura 2.1: Biomasa leñosa en forma de astillas.	16
Figura 2.2: Biomasa herbácea en forma de cultivo.	16
Figura 2.3: Biomasa frutal en forma del fruto de durazno.	16
Figura 2.4: Biomasa acuática en forma de microalgas.	16
Figura 2.5: Composición química de la madera (Carmona Cerda, 2015).	19
Figura 2.6: Distribución porcentual de los residuos sólidos ANBIO.	20
Figura 3.5: Vista transversal de un horno para cascarilla de arroz (Valverde et al., 2007)	31
Figura 3.6: Ciclo Rankine simple (Cengel, 2012).	32
Figura 3.7: Turbina de gas de ciclo abierto (Cengel, 2012).	33
Figura 3.8: Turbina de gas de ciclo cerrado (Cengel, 2012).	34
Figura 4.1: Diagrama de los procesos termoquímicos para tratamiento de biomasa, así como sus productos finales (adaptado de Urien Toledo, 2013).	43
Figura 4.2: Esquema de la combustión en lecho fijo (Barrera et al., 2018).	47
Figura 4.3: Esquema de una caldera de flujo contracorriente (Barrera et al., 2018).	47
Figura 4.4: Esquema de una caldera de flujo en corriente (Barrera et al., 2018).	48
Figura 4.5: Esquema de una caldera de flujo cruzado (Barrera et al., 2018).	48
Figura 4.6: Esquema representativo de combustión de lecho fluidizado burbujeante y fluidizado circulatorio (Barrera et al., 2018).	50
Figura 4.7: Ejemplos de intercambiadores de calor en lecho fluidizado (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).	51
Figura 4.8: Diseño de una sola etapa de fluidización en lecho fluidizado (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).	52
Figura 4.9: Diseños multietapa y rotatorio de fluidización en procesos de secado (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).	52
Figura 4.10: Diseño para partículas que contienen disolventes (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).	53

Figura 4.11. Diseño para recubrimiento y/o crecimiento de partículas (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).....	54
Figura 4.12: Adsorción en lecho fluidizado desarrollado por Courtaulds Ltd (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).	54
Figura 4.13: Esquema de una caldera para combustible pulverizado (Barrera et al., 2018).....	55
Figura 4.14: Esquema de un gasificador de corriente ascendente (Turare, 2002).....	57
Figura 4.15: Esquema de un gasificador de corriente descendente (Turare, 2002).....	58
Figura 4.16: Esquema de un gasificador de fuego doble (Kramreiter, 2008).....	58
Figura 5.1: Producción de biomasa de bosque de encino por estado a 3Km de carretera. (elaboración propia).....	67
Figura 5.2: Producción de biomasa de bosque de pino por estado a 3Km de carretera. (elaboración propia).....	68
Figura 5.3: Producción de biomasa bosque mixto por estado a 3Km de carretera. (elaboración propia).....	68
Figura 5.4: Producción de biomasa de bosque de encino por estado a 5Km de carreteras. (elaboración propia).	72
Figura 5.5: Producción de biomasa de bosque de pino por estado a 5Km de carretera. (elaboración propia).....	73
Figura 5.6: Producción de biomasa de bosque mixto por estado a 5 km de carretera. (elaboración propia).....	73
Figura 5.7: Distribución de la biomasa de aserradero. (elaboración propia).....	75
Figura 5.8: Biomasa producida Ton/año por el aserradero de coníferas (elaboración propia).	78
Figura 5.9: Biomasa producida Ton/año por el aserradero de hojosas (elaboración propia).	78
Figura 5.10: Biomasa producida Ton/año por el aserradero de Tropicales (elaboración propia).	79
Figura 5.11: Porcentajes del potencial energético de los aserraderos de coníferas, hojosas y tropicales (elaboración propia).....	88
Figura 5.12: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de encino a 3 km (elaboración propia).....	89

Figura 5.13: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de pino a 3 km (elaboración propia).....	89
Figura 5.14: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque Mixto a 3 km (elaboración propia).	90
Figura 5.15: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de encino a 5 km (elaboración propia).....	91
Figura 5.16: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de pino a 5 km (elaboración propia).....	91
Figura 5.17: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque mixto a 5 km (elaboración propia).	92

Índice de tablas

Tabla 2.1: Clasificación de biocombustibles solidos por origen y fuentes adaptación de la ISO 17225-1.....	15
Tabla 2.2: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Pinus radiata</i> , <i>E. globulus</i> y <i>E nitens</i>	23
Tabla 2.3: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Nothofagus dombeyi</i> , <i>N. obliqua</i> y <i>N. alpina</i>	23
Tabla 2.4: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Persea lingue</i> , <i>Lomatia hirsuta</i> y <i>Gevuina avellana</i>	24
Tabla 2.5: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Aextoicon punctatum</i> , <i>Eucryphia cordifolia</i> , <i>Chusquea quila</i> y <i>Laureliopsis philippiana</i>	24
Tabla 2.6: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Tectona grandis</i> y <i>Quercus robur</i>	25
Tabla 2.7: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Pinus moctezumae</i> y <i>Abies religiosa</i>	26
Tabla 2.8: Datos de caracterización para residuos madereros de <i>Pinus pseudostrobus</i> y <i>Pinus leiophylla</i>	26
Tabla 4.1: Ventajas y desventajas de los procesos termoquímicos (adaptada de Steinvorth Álvarez, 2014).....	44
Tabla 4.2: Tecnologías de lecho fijo (Barrera et al., 2018).	49
Tabla 4.3: Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y temperatura y los productos obtenidos (Urien Toledo, 2013).	60
Tabla 5.1: Cantidad de biomasa por estado de tala sustentable a 3 km de carreteras (elaboración propia).....	64
Tabla 5.2: Cantidad de biomasa por estado de tala sustentable a 5 km de carreteras (elaboración propia).....	69
Tabla 5.3: Cantidad de biomasa producida la división de residuos forestales de aserrío (elaboración propia).....	75
Tabla 5.4: Poder calorífico promedio presentado por el ANBIO (elaboración propia). .	80
Tabla 5.5: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de encino a 3 km de carreteras por estado (elaboración propia).....	81

Tabla 5.6: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de pino a 3 km de carreteras por estado (elaboración propia).....	82
Tabla 5.7: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque mixto a 3 km de carreteras por estado (elaboración propia).	83
Tabla 5.8: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de encino a 5 km de carreteras por estado (elaboración propia).....	84
Tabla 5.9: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de pino a 5 km de carreteras por estado (elaboración propia).....	84
Tabla 5.10: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque mixto a 5 km de carreteras por estado (elaboración propia).....	85
Tabla 5.11: Potencial energético y escala de potencia de generación del aserrín de hojosas (elaboración propia).....	86
Tabla 5.12: Potencial energético y escala de potencia de generación del aserrín de coníferas (elaboración propia).....	86
Tabla 5.13: Potencial energético y escala de potencia de generación del aserrín de Tropicales (elaboración propia).....	87
Tabla 5.14: GWh/año generados por la biomasa de la tala sustentable a 3 y 5 km de carreteras (elaboración propia).	92
Tabla 5.15: Emisiones evitables por el uso de biomasa de la tala sustentable a 3 y 5 km de carreteras (elaboración propia).....	93
Tabla 5.16: Emisiones evitables por el uso de biomasa de aserraderos (elaboración propia).	93
Tabla 5.17: Principales formas comerciales de biocombustibles sólidos adaptación de la tabla 2 de la Norma ISO 17225-1.....	95

Resumen

El uso de energía renovable se ha vuelto más importante para disminuir los impactos del calentamiento global. La biomasa es la forma más común de energía renovable, amplia y tradicionalmente utilizada en el tercer mundo y es en las últimas tres décadas que en los países desarrollados se ha renovado el interés en su uso para producir energía con miras a reducir el impacto al medio ambiente derivado de la utilización de combustibles fósiles. Además de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de la biomasa promueve valorizar los residuos y generar bioenergía. El presente trabajo versa sobre el potencial energético que México cuenta gracias a la biomasa forestal que produce.

Con ayuda de los datos recopilados en el Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO) se abordó el potencial de la biomasa forestal, en la clasificación de tala sustentable y los residuos de biomasa forestal proveniente de aserraderos, para generar energía. Los bosques de encino son los principales productores de biomasa a nivel nacional con 19328476 toneladas al año, seguidos por los bosques mixtos (encino-pino) con 18490994 toneladas al año y por último los bosques de pino con 8185152 toneladas al año. En México se cuenta con un gran potencial energético de 879823 TJ/año para ser exactos del cual el 98% puede ser generado por la tala sustentable, los aserraderos brindarían el 2%.

Con el análisis de los resultados se pudo determinar que las emisiones de CO₂ que se evitarían mandar al ambiente al aprovechar la biomasa forestal del país serían 111078 Mt/año, 41% generadas por el bosque de encino, 18% por el bosque de pino, 39% por el bosque mixto y 2% por los aserraderos.

Las tecnologías para la transformación energética presentadas en este trabajo son las termoquímicas, es decir la gasificación, combustión directa y la pirólisis, las cuales se comparan teóricamente para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

Los parámetros a considerar para el aprovechamiento de biomasa forestal son: poder calorífico inferior, contenido de humedad, compuestos orgánicos volátiles, contenido de cenizas y el tamaño de partícula, ya que estos están ligados directamente al desempeño que tendrá la transformación de la biomasa a energía en forma de calor o electricidad.

Se concluye que la biomasa forestal es una potencial fuente de energía ya que cuenta con las características energéticas necesarias para su aprovechamiento, se produce en

grandes cantidades en estados como Chihuahua, Durango y Oaxaca donde podrían ser implementados para la generación de energía eléctrica, aportando a la diversificación de la matriz energética y a disminuir la emisión de CO₂ a la atmósfera.

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Las necesidades energéticas en el planeta presentan nuevos retos frente a la inminente escasez de petróleo en un futuro no muy lejano, por lo que se ha visto la necesidad de usar otras fuentes para la generación de energía.

El combustóleo es una de las principales fuentes energéticas que se tienen actualmente para la generación de energía eléctrica y térmica en la industria, también es usado como combustible en el transporte. La creciente necesidad de disminuir la dependencia hacia el petróleo ha promovido la búsqueda de fuentes alternas de energía renovable para la generación de combustibles en gran cantidad y que generen menos contaminación atmosférica (Medina et al., 2011). En los últimos años se ha introducido una nueva variable que está siendo sin duda la fuerza impulsora hacia un cambio de la percepción mundial de la cuestión energética: el cambio climático derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero (Mata Sánchez, 2015).

El tema de las energías alternativas ha generado una gran expectativa en cuanto a las oportunidades que se tienen de aprovechar los residuos sólidos orgánicos, generar alto impacto ambiental, económico y social, e impulsar el uso y desarrollo de los biocombustibles (Martínez, et al., 2014).

El uso de la biomasa es una de las posibles soluciones a los problemas del futuro desabasto de los combustibles fósiles al ser parte del conjunto de las fuentes renovables, además de que el uso de estas recientes materias primas ayudara a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cuidado del ambiente.

Dado a que el uso de energías renovables es un tema en desarrollo, el avance de las tecnologías permite obtener beneficios de fuentes energéticas de los cuales no era posible: esto lleva a estudiar la fuente de materia prima con la finalidad de desarrollar lineamientos y estándares de calidad para su aprovechamiento.

Una base normativa para el aprovechamiento de los combustibles sólidos es la norma internacional ISO 17225, la cual habla de las características de los biocombustibles sólidos y las propiedades que debe de cumplir para su uso, los países que deseen implementarla necesitan adecuar los parámetros de acuerdo a la calidad del biocombustible que se desee utilizar.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la calidad de los residuos de madera basándose en su poder calorífico, contenido de humedad, contenido de materia volátil y contenido de cenizas, además de la disponibilidad en toneladas por año por estado de la República Mexicana.

Objetivos particulares

- Determinar las características de calidad de los residuos de madera conforme a los estándares internacionales, como la norma ISO 17225 para el aprovechamiento de biocombustibles sólidos.
- Evaluar la eficiencia de los procedimientos de generación de calor y electricidad con biocombustibles sólidos en México.
- Evaluar la viabilidad del uso de residuos de madera en el sector forestal para generación de electricidad y calor a mediana potencia que abarca de 0.5 a 5 MW y alta potencia de 5 a 50 MW en los estados con mayor disponibilidad de residuos de madera.
- Proponer opciones tecnológicas para el aprovechamiento energético de residuos de madera.
- Desarrollar una propuesta de especificaciones técnicas para los residuos de madera, utilizados en generación de calor y electricidad.

1.3 Hipótesis

La evaluación de la calidad de los residuos de madera mediante la determinación del poder calorífico, contenido de humedad, materia volátil y cantidad de cenizas permitirá proponer opciones tecnológicas adecuadas y viables respecto a su cantidad y ubicación geográfica para su transformación y aprovechamiento energético

1.4 Alcances y limitaciones

Este trabajo de tesis se enfocará en la búsqueda documental de tecnologías adecuadas para el aprovechamiento energético de los residuos de madera, así mismo se formulará una propuesta para el uso de estos en base a su disponibilidad y calidad en base a la información obtenida.

CAPÍTULO 2. Conceptos generales de la biomasa

La biomasa fue la fuente de energía más utilizada por la humanidad hasta la Revolución Industrial, cuando fue sustituyéndose por el uso de combustibles fósiles. Actualmente, es considerada una de las posibles alternativas energéticas frente a la inminente crisis petrolera (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019).

2.1 Definición de biomasa

De acuerdo la SEMARNAT la formación de la biomasa se da a partir de la energía solar mediante la fotosíntesis de las plantas, ya que estas transforman el dióxido de carbono y el agua en productos orgánicos con alto contenido energético; la energía solar almacenada por la fotosíntesis puede ser transformada en energía térmica, eléctrica o como carburante (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

En el contexto energético se utiliza el término biomasa para denominar a una fuente de energía de tipo renovable que comprende la utilización de toda gama de productos derivados (biocombustibles) de diversa naturaleza (sólidos, líquidos o gaseosos) que pueden tener aplicación en todos los campos de utilización de los combustibles tradicionales (electricidad, transporte, usos térmicos y como materias primas para la industria química) (Heras Celemín, 2008).

2.2 Clasificación de biomasa

Según Ballesteros Mercedes la biomasa para su aprovechamiento energético se puede clasificar de acuerdo a su origen (Heras Celemín, 2008):

Biomasa natural: como su nombre lo indica es la que podemos encontrar de forma natural, dentro de esta clasificación encontramos bosques, arbustos, matorrales, entre otros.

Biomasa residual: en esta clasificación podemos encontrar los residuos de procesos antropogénicos como basura, residuos de mataderos, residuos sólidos urbanos, etc. Dentro de la biomasa residual podemos encontrar una subclasificación, que es biomasa seca o húmeda de acuerdo con su contenido de humedad.

- La biomasa seca es aquella que se encuentra con un contenido de humedad menor del 60%, ejemplos de esta son la leña, paja entre otros; se emplean principalmente en procesos termoquímicos o fisicoquímicos obteniendo

biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos como productos (Heras Celemín, 2008).

- La biomasa húmeda contiene más de un 60% de humedad, algunos ejemplos son residuos de vegetales, lodos de depuración y residuos animales; que mediante procesos químicos y físicos obtenemos biocombustibles líquidos y gaseosos como productos (Heras Celemín, 2008).

De igual forma se pueden clasificar por sus propiedades físicas de la siguiente forma (Aguirre, 2012):

- Biomasa líquida: Existen varios biocombustibles líquidos con un enorme potencial, todos ellos basados en lo que conocemos como “cultivos energéticos”.
- Biomasa gaseosa: Se encuentra principalmente en los vertederos RSU (residuos sólidos urbanos), estos residuos son el resultado de la degradación biológica anaeróbica de la materia orgánica, y se componen de una mezcla de metano y dióxido de carbono. Estos materiales se someten a combustión para la generación de electricidad.
- Biomasa sólida: Se obtiene de subproductos y residuos procedentes de la agricultura, residuos forestales y de una pequeña fracción de residuos industriales o municipales, es decir, de la basura que se genera.

Los biocombustibles sólidos son aquellos productos derivados de la biomasa sólida que son susceptibles de utilización directa en los procesos de conversión energética y que se obtienen mediante transformaciones, generalmente de naturaleza física, tales como astillado, molienda y secado. Dentro del grupo de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza (Tojes Pacheco, 2015).

Una clasificación propuesta por la norma ISO17225 de los biocombustibles sólidos es la que se muestra en la Tabla 2.1, dividida por 4 ejes principales, mezclas y combinaciones; estas son: Biomasa leñosa, biomasa herbácea, biomasa frutal, biomasa acuática y mezclas entre esos.

Tabla 2.1: Clasificación de biocombustibles sólidos por origen y fuentes adaptación de la ISO 17225-1.

Biomasa Leñosa	Bosque, plantío y otras maderas vírgenes	Árboles enteros sin raíz Árboles enteros con raíz Tallos Residuos de extracción Tocones y raíces Corteza Madera segregada de jardines, parques, mantenimiento de carreteras, etc. Combinaciones y mezclas	Biomasa Herbácea	Biomasa herbácea de agricultura y horticultura	Cultivos de cereales Pastizales Cultivos de semillas oleaginosas Cultivos de tubérculos Cultivos de leguminosas Flores Biomasa segregada de jardines, parques, mantenimiento de carreteras, etc. Mezclas y combinaciones	Biomasa Frutal	Huertas frutales y horticultura	Bayas Huesos de frutas Nueces y bellotas Mezclas y combinaciones
	Subproductos y residuos de la industria maderera	Subproductos y residuos de madera sin tratamiento químico Subproductos, residuos, fibras y componentes de la madera tratada químicamente Mezclas y combinaciones					Subproductos y residuos de la industria de procesamiento alimenticio	Residuos frutales sin tratamiento químico Residuos frutales con tratamiento químico Mezclas y combinaciones
	Madera usada	Madera usada tratada químicamente Madera usada sin tratamiento químico Mezclas y combinaciones	Subproductos y residuos de comida e industria herbácea	Residuos de biomasa herbácea sin tratamiento químico Residuos de biomasa herbácea con tratamiento químico Mezclas y combinaciones	Mezclas y combinaciones			
	Mezclas y combinaciones	Mezclas y combinaciones			Biomasa acuática		Algas	Microalga Macroalga Mezclas y combinaciones
		Jacinto de agua		Alga de mar y lago		Alga de mar Alga de lago Mezclas y combinaciones		
				Carrizo		Carrizo común Otros carrizos Mezclas y combinaciones		
				Mezclas y combinaciones				

En las imágenes se pueden observar ejemplos de biomasa forestal (figura 2.1), biomasa herbácea (figura 2.2), biomasa frutal (figura 2.3) y biomasa acuática (figura 2.4).



Figura 2.1: Biomasa leñosa en forma de astillas.



Figura 2.2: Biomasa herbácea en forma de cultivo.



Figura 2.3: Biomasa frutal en forma del fruto de durazno.



Figura 2.4: Biomasa acuática en forma de microalgas.

2.3 Características químicas y energéticas de la biomasa

Los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido. La composición química de la biomasa original se puede conocer realizando análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), y en algunos casos cloro (Cl). También contiene oxígeno (O), pero este elemento no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de elementos más las cenizas (Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario, 2012).

Entre sus características más importantes se tiene:

- Contenido de humedad: Denominado como el contenido de agua que posee la biomasa, expresada en porcentaje. El rango usual se encuentra entre 8 – 65 % (Zermeño Egia Liz et al., 2020).
- Poder calorífico neto: Anteriormente llamado poder calorífico inferior, se define como absoluto, al valor del calor específico de la combustión, en julios, por unidad de masa del biocombustible quemado con oxígeno a presión constante o a volumen constante bajo condiciones tales que toda el agua de los productos de reacción permanece como vapor de agua. El valor calorífico de biocombustibles sólidos secos está entre 16.5 y 19.2 MJ/kg (Zermeño Egia Liz et al., 2020).
- Poder calorífico superior: También llamado poder calorífico bruto es la energía liberada menos el calor de evaporación del vapor de agua generado durante la combustión a 25°C, en relación con la cantidad de combustible aportada (Zermeño Egia Liz et al., 2020).
- Materia volátil: Es un parámetro útil para caracterizar la capacidad del combustible para desintegrarse en combustibles gaseosos bajo el impacto de la combustión. Para combustibles de madera es alrededor del 82%, para combustibles lignocelulósicos entre el 74 y 83%, para pastizales, esquejes y paja de grano es entre 74 y 76% (Hartmann, 2017).
- Contenido de cenizas: Es el residuo inorgánico después de la combustión de un sólido. Puede originarse directamente del combustible, o puede ser causado por un mineral contaminante que han sido atrapados durante la cadena de

suministro (Zermeño Egia Liz et al., 2020). Las cantidades típicas de ceniza son 1-4% del combustible seco. Están compuestas por materia inorgánica, principalmente por Ca, Mg, K, P y Na. Los cultivos anuales pueden contener altas concentraciones de metales pesados como Cd, Pb y Zn (COWI & INECC, 2017).

- Densidad aparente: Se define como el cociente de la masa de un material relleno en un contenedor y el volumen de llenado del contenedor (Zermeño Egia Liz et al., 2020).
- Resistencia a la abrasión. La resistencia a la abrasión describe la coherencia de partículas de combustible en un material comprimido (gránulos, pellets o briquetas). Esta propiedad es principalmente importante para todos los procesos de carga y transbordo, donde el material está expuesto a desgaste mecánico y donde se eliminan las partículas pequeñas y así pueden contribuir a la liberación de polvo fino (Zermeño Egia Liz et al., 2020).
- Celulosa: Es el polímero natural más abundante en la naturaleza y componente principal de las células vegetales, que comprende aproximadamente del 10 al 20% del peso seco de las hojas, entre un 43 y un 47% de la madera de coníferas, entre un 42 y un 44% de la madera de frondosas y el 90% del peso de las fibras de algodón (Fonseca Prieto, 2013).
- Hemicelulosa: La hemicelulosa constituye del 20-35% en masa de la biomasa leñosa, es la composición menos estable de los componentes de la madera, la cual se compone principalmente de xilosa y manosa. La hemicelulosa presenta una estructura amorfa y ésta depende del tipo de planta y varía aún más entre las partes de las mismas plantas (Fonseca Prieto, 2013).
- Lignina: El biopolímero consiste en una red compleja de moléculas aromáticas, que sirve para inhibir la absorción de agua a través de las paredes celulares. La lignina representa casi el 30 % del carbono orgánico terrestre y proporciona la rigidez y el marco estructural para las plantas (Fonseca Prieto, 2013).

El conocimiento de la composición química de biomasa es muy valioso en el desarrollo de procesos para producir biocombustibles y productos químicos en general. En particular, para la producción de etanol de segunda generación serán de interés los contenidos de celulosa, hemicelulosas y lignina, en tanto que para la producción de biodiésel de segunda generación son importantes los contenidos de lignina, cantidad y

composición de las cenizas, porcentajes de C, H y O y la presencia de elementos contaminantes o indeseados para el proceso, como azufre, cloro y nitrógeno (Carmona Cerda, 2015).

2.4 Biomasa forestal

La madera se compone esencialmente de carbono, hidrógeno y oxígeno formando sus constituyentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, en proporción variable según las especies (Bueno Zarate, 1987); tiene también sustancias minerales, que luego de la combustión quedan como cenizas y pequeñas cantidades de nitrógeno. La figura 2.5 describe la composición química de la madera.

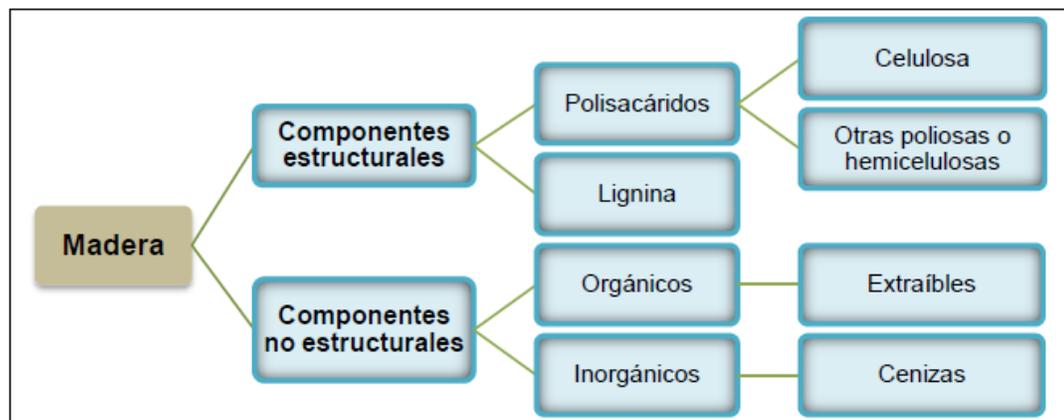


Figura 2.5: Composición química de la madera (Carmona Cerda, 2015).

Durante el aprovechamiento de madera existe una gran generación de residuos, los cuales se dividen en dos clases (Ayala y Sandoval, 2018):

- Los que proceden de operaciones forestales como recolección y extracción
- Los que se generan en la industria durante el proceso de fabricación de productos de madera.

2.4.1 Biomasa forestal como materia prima

Los residuos de la madera se aprovechan para producir energía. De la misma manera, se utilizan como combustible los restos de las industrias de transformación de la madera, como los aserraderos, carpinterías o fábricas de muebles y otros materiales más (Tojes Pacheco, 2015).

En México existe un enorme potencial para la creación de industrias de bioenergéticos a partir de residuos de biomasa forestal, ya que la industria forestal es una actividad de relevancia económica en el país. Sin embargo, es necesario un análisis de las

alternativas sobre el manejo y uso de los recursos forestales, así como de los coproductos para lograr una producción forestal sustentable y el aprovechamiento integral de la biomasa (Ayala y Sandoval, 2018).

El Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO) es un compendio de información detallada de las fuentes de residuos sólidos de la República Mexicana elaborado por la Secretaría de Energía (SENER) en colaboración de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La biomasa se estimó en aproximadamente 278 millones de toneladas de residuos sólidos, siendo el 58.1% del potencial proveniente de los bosques y el 26.7% de los residuos agrícolas y forestales y el 0.5% de aserradero como se ilustra en la figura 4.2.

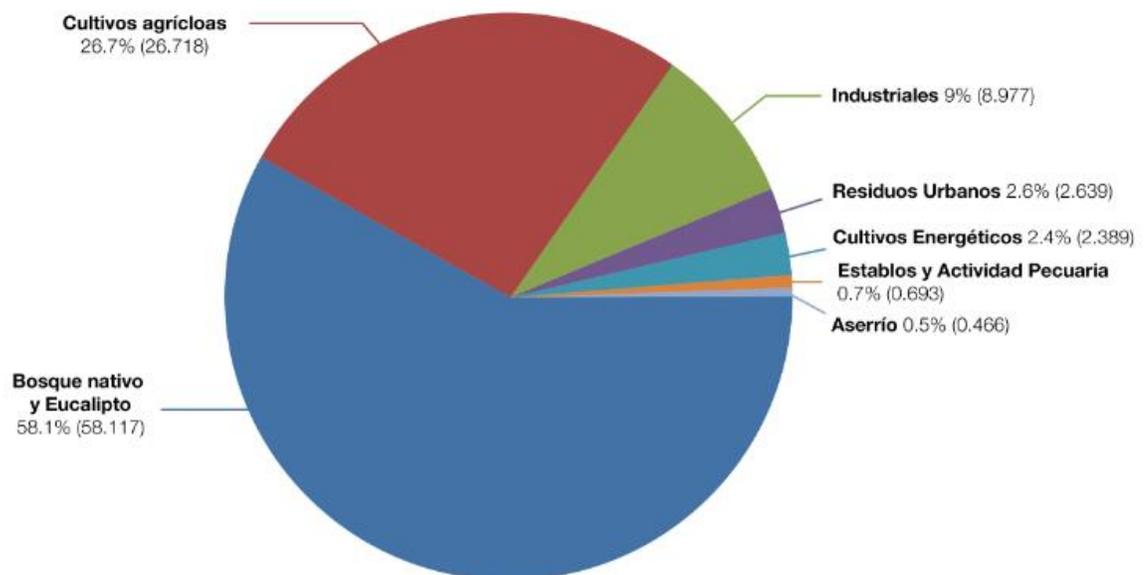


Figura 2.6: Distribución porcentual de los residuos sólidos ANBIO.

Las principales fuentes de información para determinar la cantidad de biomasa residual fueron: el Sistema de Información Agrícola y Pecuario (SIAP), el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), la base de datos de los Centros de Almacenamiento y Transformación de la Dirección General de Gestión Forestal y Suelos de la SEMARNAT, bases de datos de algunas empresas, cámaras y asociaciones industriales, artículos científicos del INIFAP, COLPOS, etc.

Existen 2 clasificaciones en el atlas de biomasa, primeramente, se encontró con la biomasa residual, la cual se describen los tipos de residuos agrícolas, forestales, pecuarios, urbanos e industriales, posteriormente se encuentra el grupo de la biomasa

producida para energía la cual engloba la producción agrícola especializada para biocombustible y la tala sustentable.

Para la subclasificación de residuos agrícolas y forestales el punto de interés para este trabajo es la biomasa generada por la serrería, los aserraderos trabajan con una gran variedad de maderas, que de forma general se clasificaron en 3 tipos: coníferas, tropicales y hojosas.

Los árboles de coníferas comprenden especies como pino (*Pinus spp*), cedro blanco (*Cupressus luistanica*), oyamel (*Abies religiosa*), pinabete (*Picea chihuahuana*) y sabino o táscate (*Juniperus deppeana*), entre otras.

Para los árboles de hojosas se encuentran el encino (*Quercus spp*), aliso (*Alnus jorullensis*), alamo (*Populus tremuloides*), higuera (*Ficus spp*), ocozote (*Liquidambar macrophylla*), y madroño (*Arbutus xalapensis*), entre otras (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2020).

Las especies que entran en la clasificación de árboles tropicales ceiba (*Ceiba pentandra*), caoba (*Swietenia macrophylla*) y el hule (*Ficus elástica*), por mencionar algunos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017).

Dentro de la subclasificación de tala sustentable (corte de árboles de un bosque o una selva, en donde se conservan la estructura y funciones del ecosistema) es donde se encuentra la información acerca del bosque nativo y selvas que es potencialmente aprovechado para generación de energía.

El bosque nativo comprende plantaciones de pino, encino y combinaciones de ambos, la selva dentro de este trabajo de investigación no tomara lugar debido a que las especies que la comprenden son consideradas maderas preciosas y su uso no es contemplado dentro para generación de energía.

Un aspecto importante para el aprovechamiento de los potenciales energéticos es el traslado hacia el lugar en donde se llevará a cabo la transformación que mejor se adapte sus características, esto con la finalidad de que este producto resulte sostenible a largo plazo en el Atlas de Biomasa elaborado por la SENER en conjunto con otras dependencias gubernamentales, para el bosque nativo se aplican los criterios de 3 y 5 kilómetros de carreteras o caminos, de encontrarse a más de 3 o 5 km de carreteras.

2.5 Caracterización de la biomasa forestal en algunas regiones de América.

La biomasa forestal, es atractiva por su bajo costo y alta disponibilidad en diversos climas y localidades del país, sin embargo, el principal impedimento para su utilización es la falta de una tecnología de bajo costo para una adecuada conversión energética, que de valor agregado adicional a la simple combustión que se utiliza hoy, mediante mayores niveles de eficiencia en el aprovechamiento del recurso (Loaiza Navarro, 2015).

Para determinar las principales características energéticas de los residuos forestales se deben considerar las variables físicas y químicas que los definen. Las características químicas de la madera que más influyen en su comportamiento como biocombustible son la composición química elemental, la composición química por compuestos y el poder calorífico. Por lo anterior, conocer las principales variables que condicionan el uso de la madera y corteza como combustibles como son; el contenido de humedad, densidad y las propiedades químicas de las especies maderables con carácter residual, es el primer paso para determinar su potencial como biocombustibles (Lima Rojas, 2013).

2.5.1 Caracterización de biomasa forestal en Chile.

El sector forestal chileno productivo se basa en la existencia de recursos forestales artificiales constituidos por plantaciones de especies exóticas de rápido crecimiento como principal proveedor de materias primas para una moderna industria forestal-maderera asociada; y por el bosque nativo que suministra una variedad de productos y servicios.

El material usado en la caracterización de la biomasa residual de la cosecha forestal fue obtenido directamente en lugares donde se realizó está; valores típicos de las características físicas químicas y energéticas de los residuos de biomasa leñosa por especie de los residuos madereros existentes en Chile (Carmona Cerda, 2015), se muestran en las tablas 2.2, 2.3, 2.4, y 2.5 y tienen la finalidad de caracterizar los residuos y así poder ocuparlos como combustible.

Tabla 1.2: Datos de caracterización para residuos madereros de *Pinus radiata*, *E. globulus* y *E nitens*

Especie		<i>Pinus radiata</i>		<i>Eucalyptus globulus</i>		<i>Eucalyptus nitens</i>	
Tipo de biomasa		Corteza	Madera	Corteza	Madera	Corteza	Madera
Análisis físico	Densidad básica [g/m ³]	0.40-0.46	0.36-0.41	-	0.53	-	0.51
	% Extraíbles	23.4-25.8	4.2-4.6	6.6	5.7	1.5	1.2
Análisis químico	% Lignina	42.4-55.5	26.9-28.8	21.3	23.9	23.7	19.2
	% α-celulosa	28.6-44.5	43.9-48	49.8	55.4	52.5	39
Análisis energético	% Cenizas	3.6-4.8	0.3-0.7	0.3	0.2	0.3	0.2
	PCS [Cal/g]	4.954-5.136	4.834-4.912	4.925	4.478	4.765	4.53
Composición elemental	% C	48.5-49.5	46.4-48.7	50	48.1	50.1	48.9
	% H	5.6-5.7	5.9-6	6	6	6	6.1
	% O	40.1-43.7	43.7-43.9	43.3	45.2	43.3	44.4
	% N	-	-	0.5	0.59	0.53	0.62
	% S	0.0004-0.0005	0.0002-0.0005	0.05	0.01	0.08	0.01
	% Cl	0.0059	0.0060-0.0061	0.13	0.03	0.08	0.03

Tabla 2.2: Datos de caracterización para residuos madereros de *Nothofagus dombeyi*, *N. obliqua* y *N. alpina*

Especie		<i>Nothofagus dombeyi</i> (Coigüe)		<i>Nothofagus obliqua</i> (Roble)		<i>Nothofagus alpina</i> (Raulí)	
Tipo de biomasa		Corteza	Madera	Corteza	Madera	Corteza	Madera
Análisis físico	Densidad básica [g/m ³]	-	0.49	-	0.6	-	0.43
	% Extraíbles	19.1	4.8	16	10	19.7	4.7
Análisis químico	% Lignina	29	18.7	29.2	18.3	14.7	22.6
	% α-celulosa	49.1	38.7	40.3	42.7	25.2	42.8
Análisis energético	% Cenizas	1	0.06	1.4	0.2	3.5	0.9
	PCS [Cal/g]	4.904	4.738	4.994	4.736	5.274	4.859
Composición elemental	% C	49.2	48.2	49.8	48.6	48.7	51.9
	% H	6	6.1	6	6	5.7	5.8
	% O	44.1	45.1	43.5	44.7	41.4	40.8
	% N	0.54	0.36	0.57	0.37	-	-
	% S	0.016	0.13	0.03	0.02	-	-
	% Cl	0.15	0.15	0.1	0.16	-	-

Tabla 2.3: Datos de caracterización para residuos madereros de *Persea lingue*, *Lomatia hirsuta* y *Gevuina avellana*

Especie		<i>Persea lingue</i> Lingue		<i>Lomatia hirsuta</i> Radal		<i>Gevuina avellana</i> Mol Avellano	
Tipo de biomasa		Corteza	Madera	Corteza	Madera	Corteza	Madera
Análisis físico	Densidad básica [g/m ³]	-	0.45	-	0.49	-	0.5
Análisis químico	% Extraíbles	24.4	7.6	12.4	5.2	12.4	8
	% Lignina	35.9	16.7	28.2	20.7	28.2	20.1
	% α -celulosa	42.5	50	44	48	44	43.3
Análisis energético	% Cenizas	2.8	0.5	2	0.5	2	0.7
	PCS [Cal/g]	5.085	4.579	4.733	4.663	4.836	4.793
Composición elemental	% C	50.2	48.8	49.8	48	49	48.4
	% H	6	6	6	6.1	6	6
	% O	43.1	44.5	43.5	45.3	44.3	44.9
	% N	0.54	0.55	0.7	0.4	0.5	0.4
	% S	0.1	0.03	0.03	0.2	0.09	0.05
	% Cl	0.1	0.09	0.02	0.04	0.06	0.3

Tabla 2.4: Datos de caracterización para residuos madereros de *Aextoxicon punctatum*, *Eucryphia cordifolia*, *Chusquea quila* y *Laureliopsis philippiana*

Especie		<i>Aextoxicon punctatum</i> (Olivillo)		<i>Eucryphia cordifolia</i> (Ulmo)		<i>Chusquea quila</i> (Quila)	<i>Laureliopsis philippiana</i> . (Tepa)	
Tipo de biomasa		Corteza	Madera	Corteza	Madera	Mezcla	Corteza	Madera
Análisis físico	Densidad básica [g/m ³]	-	0.33	-	0.51	0.33	-	0.44
Análisis químico	% Extraíbles	21.2	5.9	9.4	6.9	4.6	25.5	17.4
	% Lignina	31.2	19.3	31	21.1	20.7	29.2	18.4
	% α -celulosa	42.7	51	46.5	44.2	52.2	40.3	42.7
Análisis energético	% Cenizas	4.9	2.3	2.6	0.6	0.5	1.1	0.1
	PCS [Cal/g]	5.215	4.409	5.182	4.718	4.566	5.241	5.087
Composición elemental	% C	48.3	-	48	48.8	49.5	50	48.9
	% H	6	-	5.7	6	6	5.95	6
	% O	44.9	-	41.1	44.5	43.8	43.4	44.4
	% N	0.5	-	-	0.45	0.49	0.43	0.63
	% S	0.1	-	-	0.0002	0.03	0.06	0.02
	% Cl	0.2	0.329	0.09	0.3	0.19	0.16	0.13

2.5.2 Caracterización de biomasa forestal en Colombia

Teniendo en cuenta la evaluación e inspección física que se realiza al proyecto la Gloria; la materia prima de biomasa que se usa será de las especies Teca (*Tectona Grandis*) y Roble (*Quercus Robur*), estas dos variedades de maderas son las que más procesan diariamente los aserraderos y son las dos variedades más sembradas (Acuña, 2014).

A continuación, en la tabla 2.6 se muestran los datos obtenidos por Acuña para el proyecto de aserraderos de La Gloria en el municipio de Sabanas de San Ángel en Colombia, caracterización de los residuos madereros que se realizan en dicho país basándose en la norma CEN/TS 335.

Tabla 2.5: Datos de caracterización para residuos madereros de *Tectona grandis* y *Quercus robur*

Especie		<i>Tectona grandis</i>	<i>Quercus robur</i>
Análisis energético	Humedad %	7.23	8.6
	Contenido de cenizas	10.87	1.26
		11.35	15.96
	Carbón fijo %	70.55	74.18
	PCS [Kcal/Kg]	4117	4356
PCI [Kcal/Kg]	3827	4034	
Análisis químico	Contenido de azufre %	0.12	0.09
	Contenido de lignina %	23.6	26.4

2.5.3 Caracterización de biomasa forestal en México

Para categorizar las propiedades físicas y la composición química de la madera y corteza que determinan el potencial como biocombustible se recolectó una rodaja de 30 cm de espesor a 1.30 m de altura de cada una de las especies. A continuación, se muestran los datos obtenidos por Lima en las muestras provienen de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Estado de Michoacán; este bosque se clasificó como pino-encino de manejo forestal con las especies que se encuentran descritas en las tablas 2.7 y 2.8 a continuación (Lima Rojas, 2013).

Tabla 2.6: Datos de caracterización para residuos madereros de *Pinus moctezumae* y *Abies religiosa*

Especie		<i>Pinus montezumae</i>			<i>Abies religiosa</i>		
Tipo de biomasa		Corteza	Duramen	Albura	Corteza	Duramen	Albura
Análisis físico	Densidad básica [g/cm ³]	-	0.422	0.478	-	0.335	0.357
Análisis energético	Humedad %	-	118	86	-	153	141
	Contenido de cenizas %	0.51	0.15	0.25	1.84	1.33	0.26
	Poder calorífico J/g	19,743	18,341	18,331	17,200	18,344	18,888
Análisis químico	α -celulosa %	73.82	83.22	81.35	81.76	80.62	80.28
	Lignina %	59.81	28.44	28.33	37.48	31.51	28.39
Composición elemental	% S	2.69	2.04	2.9	2.69	0.31	1.34

Tabla 2.7: Datos de caracterización para residuos madereros de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus leiophylla*

Especie		<i>Pinus pseudostrobus</i>			<i>Pinus leiophylla</i>		
Tipo de biomasa		Corteza	Duramen	Albura	Corteza	Duramen	Albura
Análisis físico	Densidad básica [g/cm ³]	-	0.362	0.422	-	0.294	0.371
Análisis energético	Humedad %	-	29	62	-	53	74
	Contenido de cenizas %	0.46	0.28	0.43	1.41	0.39	0.23
	Poder calorífico J/g	18,888	21,726	18,273	19,086	18,601	18,110
Análisis químico	α -celulosa %	71.93	78.52	81.23	72.22	75.4	78.12
	Lignina %	54.92	29.16	26.98	65.78	29.84	29.05
Composición elemental	% S	1.68	1.69	2.53	2.23	1.77	2.34

2.6 Ventajas y desventajas del uso de la biomasa forestal

Como todo combustible la biomasa presenta ventajas y desventajas en cuanto a su uso según Membrillera estas son las que encuentra (Membrillera Serrano, 2018).

Ventajas

- Es una fuente de energía renovable, al tiempo que se les da una utilidad.
- Neutral respecto a las emisiones de carbono, porque el carbono de la atmósfera es captado por las plantas durante la fotosíntesis y pasa a formar parte de sus estructuras.
- Produce una menor cantidad de dióxido de carbono y de gases nocivos de efecto invernadero que los combustibles fósiles.
- Produce niveles más bajos de dióxido de azufre, que es un componente principal de la lluvia ácida.
- Puede ser utilizada para una serie de diferentes propósitos, incluyendo la producción de calor, el combustible para coches y la producción de electricidad.
- El aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa resulta muy económico comparado con el petróleo o el carbón. Suele costar alrededor de un tercio de los combustibles fósiles para obtener el mismo resultado y además las cenizas son poco agresivas para el medio ambiente.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.
- Genera poca corrosión en los equipos que se utilizan. Por lo que su vida útil es larga.
- Su operación y mantenimiento son sencillos ya que suelen incorporar sistemas de control electrónico.
- Poseen un alto rendimiento energético, entre el 85-92%.
- Crea empleo en zonas rurales.
- La biomasa permite limpiar los bosques, evitando así la degradación y los incendios forestales.

Desventajas

- El producto requiere una gran cantidad de espacio de almacenamiento antes de ser convertido en energía.
- Todavía existen dificultades para llevar a cabo el transporte y almacenamiento.

- En ciertas zonas y en ciertas condiciones, la extracción de la biomasa puede llegar a ser cara. Esto además suele ocurrir en proyectos de aprovechamiento que impliquen recolección, procesado y almacenamiento de algunos tipos de biomasa.
- En ocasiones se destruyen hábitats de gran valor ecológico y provocando la desaparición o el movimiento de especies animales al destruir sus refugios y fuentes de alimento.
- La incineración puede resultar peligrosa, por ello se deben utilizar filtros y realizar la combustión a temperaturas mayores a 900 °C

CAPITULO 3. Aplicaciones de la biomasa

La energía que se genera mediante la transformación de la biomasa tiene varias aplicaciones dentro de los sectores domésticos e industriales, entre las más comunes son la energía eléctrica y la térmica.

3.1 Aprovechamiento de la biomasa para generación de energía térmica

Dentro de las principales aplicaciones de los combustibles de cualquier origen la capacidad de generar energía térmica es una de las principales; para realizar dicha acción es necesario el uso de equipos que permitan el tránsito de la energía calorífica que el combustible brinda para su posterior aprovechamiento.

Las aplicaciones térmicas y agua caliente sanitaria son las más comunes dentro del sector de la biomasa. Sigue una escala de usos que comienza en las calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares (Membrillera Serrano, 2018).

Una clasificación de calderas de acuerdo a su tecnología es la siguiente (Serrano Yuste, 2016):

- Calderas convencionales adaptadas a biomasa: estas calderas están adaptadas para recibir biomasa, cuentan con una eficiencia de entre el 75 y 85%.
- Calderas de biomasa: estas funcionan con un tipo específico de biomasa, tiene rendimiento de hasta 92%.
- Calderas mixtas: tiene la dualidad de uso de combustible fósil como de biomasa, alcanza un rendimiento de hasta el 92%, dependiendo del combustible.
- Caldera de pellets o condensación: estas emplean pellets como combustible, son capaces de recuperar el calor de condensación ahorrando un 15% en el consumo de combustible.
- En el mercado existen calderas de biomasa de pellets de potencias entre 10 y 35 kW, además por su alto poder calorífico es posible alcanzar un rendimiento del 90%.

3.1.1 Uso residencial

Calefacción de ambientes y agua caliente sanitaria

La calefacción de ambientes se realiza mediante calderas de biomasa, cuya fuente combustible son biocombustibles solidos como: pellets de madera, huesos de aceituna, residuos forestales, cáscaras de frutos secos, entre otros; la energía térmica generada

por el combustible es empleada mediante radiadores, aire, tuberías de suelo radiante y calefacción de agua para vivienda. Estas calderas funcionan como las convencionales de gas o carbón, con la pequeña diferencia que necesita de un sistema de almacenamiento de biomasa (Arnabat, 2015).

Cocción de alimentos

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII (Secretaría de energía, 2008).

A pesar de los avances tecnológicos y el uso de productos derivados del petróleo, la biomasa sigue siendo uno de los combustibles utilizados para la cocción de alimentos en comunidades no muy desarrolladas o rurales por su fácil acceso y aprovechamiento.

3.1.2 Uso industrial

La utilización más común de la biomasa de combustible sólido es la combustión directa con los gases de combustión calientes resultantes que producen vapor en una caldera, una tecnología que se remonta al siglo XIX. Hoy en día, las calderas queman una variedad de combustibles y continúan desempeñando un papel importante en la calefacción de procesos industriales, la calefacción comercial e institucional y la generación de electricidad. Las calderas se diferencian por su configuración, tamaño y calidad del vapor o agua caliente producida (EPA,2007).

Hornos para secado

Los hornos de secado se emplean para retirar el contenido de humedad del material en cuestión. La biomasa que emplea es variada, cascarilla de arroz, pellets de madera, aserrín, cascara de cacahuete, hueso de aceituna por mencionar algunos.

En el caso de hornos que queman cascarilla de arroz (Figura 3.5) Valverde, et al. (2007) reporta que la eficiencia térmica será de un 51% y la eficiencia de combustión rondará en el 96.8%.

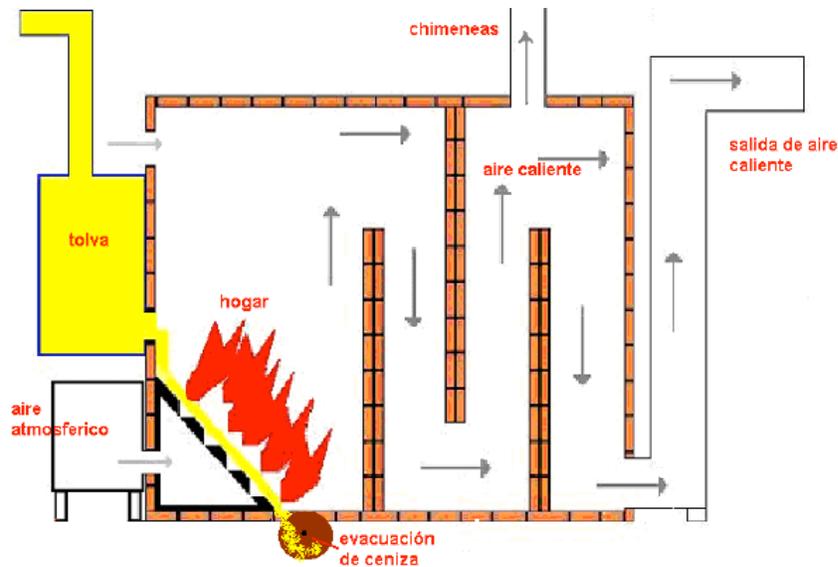


Figura 3.5: Vista transversal de un horno para cascarilla de arroz (Valverde et al.,2007)

3.2 Aprovechamiento para generación de energía eléctrica

La generación de electricidad a partir de biomasa se hace mayoritariamente con tecnología convencional, donde los equipos principales: caldera y turbina de vapor, son bien conocidos y existe una amplia oferta de ellos en el mercado; las plantas de generación de electricidad con biomasa utilizan un esquema clásico de las centrales termoeléctricas: generación de vapor para alimentar una turbina donde se expande hasta alcanzar una baja presión, la turbina acciona un alternador que transforma la energía mecánica en electricidad (Heras Celemín, 2008).

Además, las tecnologías anteriormente mencionadas dentro de la industria existen, la turbina de gas, la microturbina, el motor de combustión interna recíprocante, la celda de combustible y el motor Stirling.

3.2.1 Ciclo Rankine

Una turbina de vapor es un dispositivo termodinámico que convierte la energía del vapor a alta presión y temperatura en energía de eje que, a su vez, puede usarse para hacer girar un generador y producir energía eléctrica. A diferencia de los sistemas de cogeneración de turbinas de gas y motores alternativos donde el calor es un subproducto de la generación de energía, los sistemas de cogeneración de turbinas de vapor normalmente generan electricidad como subproducto de la generación de calor (vapor). Una turbina de vapor requiere una fuente de calor separada y no convierte directamente el combustible en energía eléctrica. La energía se transfiere de la caldera

a la turbina a través de vapor a alta presión, que a su vez alimenta la turbina y el generador. Esta separación de funciones permite a las turbinas de vapor operar con una enorme variedad de combustibles, desde gas natural hasta residuos sólidos, todo tipo de carbón, madera, residuos de madera y subproductos agrícolas (bagazo de caña de azúcar, huesos de frutas y cascarillas de arroz) (Environmental Protection Agency EPA, 2007).

El ciclo Rankine (Figura 3.6) es un ciclo termodinámico que hace uso de estas turbinas, este ciclo comprende los siguientes procesos (Cengel y Boles, 2012):

1-2 Compresión isotrópica en una bomba

2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera

3-4 Expansión isotrópica en una turbina

4-1 Extracción de calor a presión constante en un condensador

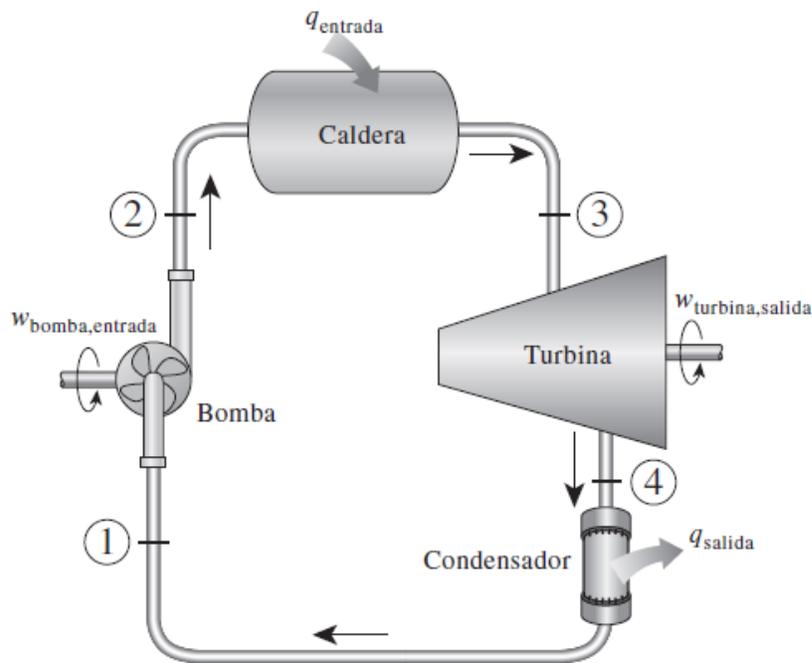


Figura 3.6: Ciclo Rankine simple (Cengel, 2012).

El ciclo Rankine cuenta con las siguientes configuraciones: Ciclo Rankine regenerativo, con recalentamiento y regenerativo con recalentamiento.

3.2.2 Ciclo Brayton

Las turbinas de gas son una de las tecnologías más utilizadas en el mundo desde hace varios años ya que necesitan un bajo costo de inversión al igual que de mantenimiento, además de sus bajas emisiones (EPA, 2007).

La turbina de gas es un motor de combustión interna que opera con un movimiento de rotación en lugar de alternativo, se pueden alimentar con gas natural o biogás y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluida la generación de energía eléctrica, compresores de gasoductos y diversas aplicaciones industriales que requieren potencia de eje (EPA, 2007).

El ciclo termodinámico que hace uso de estas turbinas es el Brayton, puede ser descrito como un ciclo abierto o cerrado como se muestra en las figuras 3.7 y 3.8, que comprenden los siguientes procesos:

1-2 Compresión isotrópica (en un compresor)

2-3 Adición de calor a presión constante

3-4 Expansión isotrópica (en una turbina)

4-1 Extracción de calor a presión constante

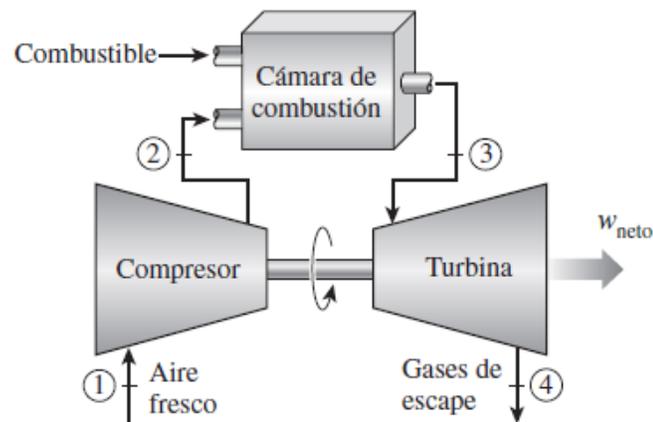


Figura 3.7: Turbina de gas de ciclo abierto (Cengel, 2012).

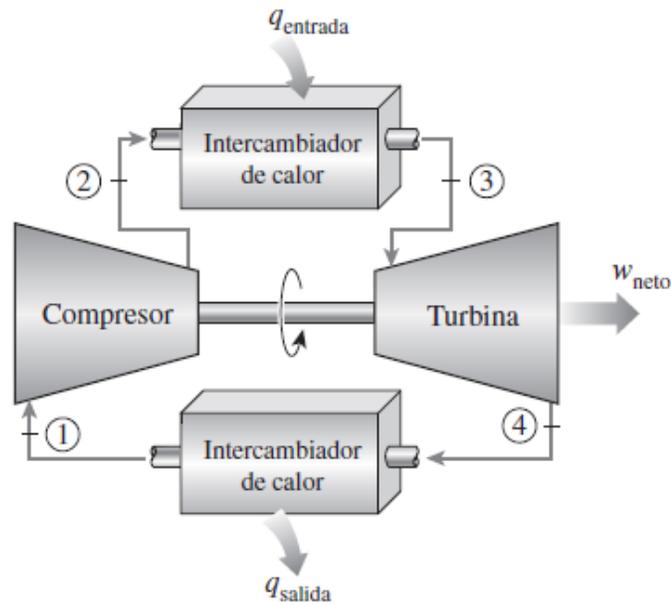


Figura 3.8: Turbina de gas de ciclo cerrado (Cengel, 2012).

Se cuenta con las configuraciones Brayton simple, regenerativo y combinado con el ciclo Rankine.

Un sistema de turbina de gas proveniente de aguas residuales necesita de un biodigestor anaerobio o un gasificador de biomasa para producir el biogás para la turbina. Este biogás debe filtrarse cuidadosamente de partículas suspendidas para evitar dañar las palas de la turbina de gas. Además, debido a que un gasificador de biomasa típico produce un biogás de baja energía calorífica, el compresor de combustible debe estar dimensionado para manejar aproximadamente 10 veces el flujo de gas en comparación con el gas natural para proporcionar la misma energía calorífica a la cámara de combustión. Estas necesidades de flujo hacen que la potencia del eje del compresor de combustible sea comparable a la potencia del compresor de aire, lo que reduce la eficiencia de la turbina. En una turbina de gas convencional, la turbina está diseñada para manejar aproximadamente un 10 por ciento más de flujo que el compresor de aire. En una turbina de gas de baja energía calorífica, la turbina debe estar diseñada para manejar aproximadamente el doble del flujo del compresor de aire. Además, la relación aire-combustible es menor para el biogás que para el gas natural, por lo que no se necesita todo el aire comprimido. Parte de este aire comprimido se puede redirigir para proporcionar energía a los compresores de aire para gasificadores directos presurizados o para ayudar a comprimir el biogás en gasificadores

atmosféricos. Sin la eliminación del exceso de aire, la capacidad de la turbina se reduciría significativamente (EPA, 2007).

Debido a todas las modificaciones requeridas, las turbinas de gas natural existentes no se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás de baja energía calorífica. Las turbinas de gas diseñadas para biogás de baja energía calorífica generalmente cuestan al menos un 50 por ciento más que las turbinas de gas natural por kW. Muchos fabricantes de turbinas de gas ofrecen productos de turbinas que operan en rellenos sanitarios de energía calorífica media y gas de tratamiento de aguas residuales a costos de equipo que son ligeramente más altos que las turbinas de gas natural, asumiendo que el gas se trata y limpia adecuadamente (EPA, 2007).

3.2.3 Microturbinas

Las microturbinas son pequeñas turbinas de gas que queman combustibles líquidos y gaseosos limpios para crear energía mecánica que hace girar un generador eléctrico u otra carga (EPA, 2007).

Las microturbinas, al igual que las turbinas de gas más grandes, se pueden utilizar en la generación de solo energía o en los sistemas de cogeneración. Pueden operar con una amplia variedad de combustibles, incluido el gas natural; gases ácidos (alto contenido de azufre); biogás y gases de energía calorífica media, como biogás y gas digestor; biocombustibles; y combustibles líquidos tales como gasolina, queroseno y diesel (EPA, 2007).

Las microturbinas suelen tener un intercambiador de calor de recuperación de calor interno llamado recuperador. En las microturbinas típicas, el aire de entrada se comprime en un compresor radial y luego se precalienta en el recuperador utilizando el calor del escape de la turbina. El aire caliente del recuperador se mezcla con combustible en la cámara de combustión y se enciende. El gas de combustión caliente se expande luego en una o más secciones de la turbina, produciendo energía mecánica giratoria para impulsar el compresor y el generador eléctrico. En los modelos de un solo eje, una sola turbina de expansión hace girar tanto el compresor como el generador. Los modelos de dos ejes utilizan una turbina para impulsar el compresor y una segunda turbina para impulsar el generador, con el escape de la turbina del compresor que alimenta la turbina del generador. Luego, el escape de la turbina de potencia se usa en el recuperador para precalentar el aire del compresor (EPA, 2007).

Las microturbinas han demostrado que pueden manejar gas de tratamiento de aguas residuales y de vertederos, y en algunos casos biogás de baja energía calorífica, razonablemente bien debido a su diseño simple. No se necesitan modificaciones importantes, pero además de la potencia requerida por el compresor de gas combustible, hay una pequeña reducción en la potencia de salida (10 a 15 por ciento) cuando funciona con gas de vertedero o digestor (EPA, 2007).

3.2.4 Motores de combustión interna recíprocos

Los motores de combustión interna son una de las tecnologías ampliamente estudiada y probada en todo el mundo, una de las aplicaciones más comunes de dicha tecnología son los motores de los automóviles y camiones, ya sea como motores de ignición por chispa descritos termodinámicamente por el ciclo Otto, o como motores de ignición por compresión descritos por el ciclo Diesel; estos motores también son utilizados para la generación de energía eléctrica (EPA, 2007).

Los motores de ignición por chispa para la generación de energía usan principalmente gas natural como combustible, aunque pueden configurarse para funcionar con propano, gasolina o biogás. Los motores de ignición por compresión funcionan con combustible diésel o aceite pesado, o pueden configurarse para funcionar en una configuración de combustible dual que quema principalmente gas natural o biogás con una pequeña cantidad de combustible piloto diésel (EPA, 2007).

Un sistema de motor alternativo a biogás tendrá de los mismos problemas operativos que una turbina de gas a biogás:

Se necesita un digestor anaeróbico o un gasificador de biomasa para producir el combustible de biogás para el motor.

El biogás debe filtrarse cuidadosamente para evitar dañar el motor.

Los motores requerirán modificaciones para adaptarse a tasas de flujo e impurezas más altas. Sin embargo, las modificaciones necesarias a los motores alternativos se logran más fácilmente. En la mayoría de los casos, más dispositivos de filtración y nuevos colectores se requieren para utilizar gases de capacidad calorífica media, como el gas de vertedero y biodigestor, que generalmente agregan alrededor del 5 por ciento al costo de un motor de gas natural. Además, los valores de calentamiento más bajos del biogás dan como resultado una disminución de aproximadamente un 15 por ciento en la

producción de energía en comparación con un motor de gas natural, lo que aumenta aún más el costo general del equipo por kilovatio (EPA, 2007).

Hay una gran cantidad de motores de ignición por compresión de gas que funcionan con gas de capacidad calorífica media procedente de vertederos, plantas de tratamiento de aguas residuales y algunas instalaciones en los corrales de engorde de animales. Los principales fabricantes de motores ofrecen paquetes de configuración de motores y clasificaciones específicamente para gas de capacidad calorífica media (EPA, 2007).

3.2.5 Motores Stirling

Como los motores de combustión interna, el motor Stirling es un motor alternativo. Sin embargo, el motor Stirling es un motor calentado externamente, y si ese calor es suministrado por un proceso de combustión, es un motor de combustión externa. El calor se transfiere al gas de trabajo y luego se convierte en trabajo a través del ciclo termodinámico de Stirling. El motor de combustión interna, en comparación, requiere un cambio de presión, generado por la quema de combustible en el cilindro, para funcionar. Debido a que el calor del motor Stirling se suministra externamente, se puede utilizar una amplia variedad de fuentes de calor (como combustibles fósiles, energía solar, nuclear y calor residual), pero el motor Stirling es particularmente adecuado para combustibles de biomasa (EPA, 2007).

Como motor de combustión externa, el combustible se quema de manera continua fuera de los cilindros del motor Stirling. Esto es diferente a un motor de combustión interna, donde el combustible se inyecta en los cilindros de manera intermitente y luego explota. Por lo tanto, la combustión externa permite una quema más completa del combustible, lo que resulta en menores emisiones. La combustión externa también proporciona el beneficio adicional de reducir el ruido y la vibración en comparación con los motores de combustión interna (EPA, 2007).

Para completar el ciclo termodinámico, un motor Stirling también debe enfriarse externamente. Esto se puede lograr de varias formas:

- Refrigeración por convección forzada o libre (por ejemplo, aire que fluye sobre las aletas).
- Agua, etilenglicol o una mezcla de ambos circulan a través de una camisa de enfriamiento que rodea el extremo frío del motor. El refrigerante se mantiene frío

mediante un intercambiador de calor similar o idéntico a un radiador en un automóvil.

Los sistemas de motor Stirling no están disponibles comercialmente en la actualidad para aplicaciones de energía estacionarias. Se están desarrollando varios sistemas de generación Stirling y se están probando sistemas prototipo en el campo para el tratamiento de aguas residuales y otras aplicaciones de biomasa.

3.2.6 Celdas de combustible

Las pilas de combustible son una tecnología emergente de generación de energía a pequeña escala con alta eficiencia eléctrica y muy bajas emisiones. En las pilas de combustible, el combustible se combina químicamente con oxígeno para generar electricidad, con calor útil como subproducto. Debido a que no hay combustión, las celdas de combustible son silenciosas, no tienen partes móviles y pueden lograr eficiencias eléctricas hasta dos veces mayores que los motores de combustión interna. Las celdas de combustible se pueden dimensionar para una amplia variedad de aplicaciones, desde computadoras portátiles (50 a 100 W) hasta vehículos (50 a 85 kW) y generación de energía central (0,2 a 2 MW) (EPA, 2007).

El costo y la durabilidad son los principales desafíos para la comercialización de pilas de combustible. Las pilas de combustible son actualmente más caras que los motores de combustión interna y tienen dificultades para mantener el rendimiento durante toda la vida útil de la carga servida. El tamaño, el peso, la gestión térmica y la gestión del agua de las pilas de combustible también son barreras (EPA, 2007).

Un sistema de energía de pila de combustible tiene muchos componentes, pero su corazón es una "pila" de pila de combustible. En realidad, la pila está formada por muchas celdas de combustible planas y delgadas superpuestas.

Una sola celda de combustible consta de un electrolito y dos electrodos recubiertos de catalizador (un ánodo y un cátodo porosos). Actualmente se están desarrollando varios tipos diferentes de pilas de combustible, cada una clasificada principalmente por el tipo de electrolito que utiliza. El electrolito determina el tipo de reacciones químicas que tienen lugar en la celda, el rango de temperatura en el que opera la celda y otros factores que afectan las aplicaciones para las cuales la celda de combustible es más adecuada, así como sus ventajas y limitaciones (EPA, 2007).

Las pilas de combustible requieren hidrógeno para su funcionamiento. Sin embargo, generalmente no es práctico usar hidrógeno directamente como fuente de combustible; en cambio, se extrae de combustibles de hidrocarburos o alimentación de biogás mediante un reformador. Los reformadores producen y / o aumentan la concentración de hidrógeno y disminuyen la concentración de especies gaseosas tóxicas para la pila de combustible. En los tres tipos de reformadores (oxidación parcial, reformación autotérmica y oxidación preferencial), las técnicas de procesamiento de combustible utilizan parte de la energía contenida en el combustible para convertir los hidrocarburos en hidrógeno y CO. El proceso de reformado a menudo se realiza a presión elevada para permitir una huella de equipo más pequeña.

Cuatro tipos principales de pilas de combustible se encuentran en varias fases de desarrollo para aplicaciones estacionarias: pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC), pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), pila de combustible de carbonato fundido (MCFC) y pila de combustible de óxido sólido (SOFC). Hasta la fecha, solo el PAFC y el MCFC han operado con biogás (EPA, 2007).

Dado que las pilas de combustible se encuentran en las primeras etapas de la introducción comercial, la experiencia a largo plazo tanto con gas natural como con biogás ha sido limitada, lo que dificulta estimar qué impactos tendría el uso de biogás en los costos generales de equipo y mantenimiento. Las unidades que funcionan con biogás probablemente costarían un poco más que las versiones de gas natural y tendrían una pequeña disminución en la producción. El mantenimiento probablemente también sería mayor ya que el biogás con más impurezas podría requerir una mayor limpieza y mantenimiento del reformador de gas combustible. Es probable que los costos de equipo y mantenimiento de una celda de combustible alimentada con biogás sean al menos un 10 por ciento más altos que los de un sistema comparable alimentado por gas natural (EPA, 2007).

3.3 Producción de biocombustibles

Para la producción de biocombustibles líquidos y gaseosos existen métodos biológicos y químicos para la transformación de la biomasa, mediante las fermentaciones alcohólicas de los hidratos de carbono provenientes de la biomasa, se obtiene como producto bioetanol; en las digestiones anaerobias por medio de bacterias metanogénicas, se transforman la biomasa húmeda en biogás o biometano dependiendo de sus propiedades (Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario, 2012).

Además, poseen ventajas medioambientales ya que no contienen azufre y su utilización como combustibles suponen reducciones importantes en las emisiones de los vehículos (Heras Celemín, 2008).

3.3.1 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos se han perfilado como candidatos potenciales para sustituir a los combustibles derivados del petróleo, principalmente en el sector transporte. Sin embargo, existe controversia porque las tecnologías establecidas actualmente para la fabricación de biocombustibles (también llamadas “de primera generación”), implican el uso de alimentos o tierras e insumos (agua, fertilizantes, etc.), que eventualmente pudieran dedicarse a cultivos alimenticios o que, en muchos casos, no producen ganancias significativas por ahorro de petróleo o mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, se ha propuesto el uso de biocombustibles de segunda generación, los cuales utilizan materias primas que no compiten con los alimentos y que pueden tener mejores indicadores ambientales (Sandoval, 2010).

3.3.1.1 Bioetanol

Para la obtención de alcoholes como el etanol a partir de materia prima vegetal es la transformación de los polisacáridos que la constituyen mediante un proceso de fermentación que dará lugar a la obtención del alcohol. La conversión de los hidratos de carbono en etanol debería ocurrir por el simple agregado de levaduras, pero el proceso necesita en muchos casos de un par de etapas previas: la delignificación y la hidrólisis (Romanelli et al., 2016).

La delignificación consiste en la eliminación de los materiales sólidos insolubles llamados ligninas, estos polímeros cumplen la función de proteger el interior de la célula de la acción de las diversas enzimas de los microorganismos que puedan intentar atacarla (Romanelli et al., 2016).

La hidrólisis tiene la finalidad de romper químicamente las uniones glicosídicas entre las moléculas de glucosa mediante la acción del agua, catalizándola por medio de las enzimas adecuadas, para de esta forma obtener una solución rica en azúcares más sencillos y, por ende, resultan más fáciles de ser transformados en el producto.

Recién obtenida la mezcla rica en azúcares sencillos, se procede al agregado de levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, finalmente, una vez obtenido el mosto rico en etanol, se procede a su purificación (Romanelli et al., 2016).

Existen otros bioalcoholes que pueden obtenerse por la misma vía, como el biometanol, biopropanol y biobutanol. Otros derivados de estos son algunos éteres que suelen usarse como aditivos para mejorar el índice de octanos de las naftas como son el etil-terbutil éter (ETBE) y el MTBE (metil-terbutil éter) (Romanelli et al., 2016).

3.3.1.2 Biodiesel

El biodiesel es una mezcla de ésteres alquílicos de ácidos grasos obtenida a partir de la transesterificación de glicéridos presentes en aceites vegetales y grasas animales. Tanto las grasas animales como los aceites vegetales son ricos en una mezcla de lípidos entre los que se incluyen los glicéridos (acilglicerol), conformados por ésteres entre ácidos grasos y el glicerol, existiendo pues varias posibilidades como los monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos.

Los más utilizados a nivel mundial son el aceite de girasol o el de soja aunque también se utilizan en menor cantidad otros aceites vegetales como la *Jathropha*, o incluso los que tienen otros orígenes como los de pescado o los extraídos a partir de algas (Romanelli et al., 2016).

La reacción involucrada en la transformación de los glicéridos presentes en los aceites en el biodiesel es la transesterificación, una reacción que involucra el intercambio de grupos alquilo esterificados en presencia de metanol. La misma puede llevarse a cabo tanto en medio ácido como alcalino. El proceso finaliza con la separación del glicerol por decantación y con etapas de lavado y secado del biodiesel crudo obtenido (Romanelli et al., 2016).

3.3.2 Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos son aquellos combustibles de origen no fósil obtenidos a partir de la descomposición de materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno, el más conocido es el biogás (Membrillera Serrano, 2018).

3.3.2.1 Biogás

La obtención del biogás se logra mediante la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno (anaeróbica), un proceso denominado biodigestión mediante la acción de microorganismos, así como de otros factores en ausencia de aire. El gas resultante de estas reacciones está formado por dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y otros gases en menores cantidades. Las principales

fuentes son los residuos ganaderos y agroindustriales, los lodos de las depuradoras y la fracción orgánica de los residuos domésticos (Membrillera Serrano, 2018).

En general puede emplearse una variada gama de desechos orgánicos, tanto de origen animal como vegetal diluidos en agua para producir la mezcla adecuada. Entre la materia prima de origen animal se utilizan los diferentes estiércoles de origen vacuno, porcino, avícola y a veces humano; en este último caso debe eliminarse la posible presencia de jabones y detergentes que puedan estar presentes debido al aseo, que interfieren con el desarrollo de las bacterias, atentando contra el proceso de digestión.

Para que el proceso de digestión sea efectivo en la preparación de una proporción importante de metano, deben cuidarse varios factores como la temperatura, el tiempo, la materia orgánica de partida y la acidez, a fin de llegar a obtener un producto de calidad (Romanelli et al., 2016).

Para favorecer una buena producción de metano, es necesaria una buena relación entre la cantidad de átomos de carbono y de nitrógeno presentes en el sustrato (C/N). Tanto el carbono como el nitrógeno resultan indispensables para la descomposición, pero se necesita de una proporción adecuada para que el digestor funcione adecuadamente y no se formen mayores proporciones de gases que atenten con la cantidad de metano que se genera; suele trabajarse con valores para la relación C/N entre 9 y 25 (Romanelli et al., 2016).

Otro factor que debe cuidarse en el sustrato es el pH, pues las bacterias involucradas en el proceso son extremadamente sensibles al mismo. En general se aconseja trabajar en el rango de la neutralidad, con valores de pH entre 6 y 8. De tratarse de valores fuera de ese rango debe acidificarse o alcalinizarse el sustrato para adecuarlo a dicho rango y de esta forma permitir el proceso de digestión (Romanelli et al., 2016).

CAPITULO 4. Tecnologías termoquímicas para el aprovechamiento energético de residuos de madera

La biomasa puede ser convertida en formas de energía útiles mediante el uso de diferentes tecnologías. Los factores que influyen en el tipo de proceso de conversión que se va a utilizar son: el tipo y la cantidad de materia prima, la energía requerida para la transformación y los requerimientos legales y económicos (Urien Toledo, 2013).

Existen un gran número de procesos de conversión termoquímica que producen combustibles y productos químicos de interés a partir de materias primas bio-renovables (Urien Toledo, 2013). Estos procesos han sido ampliamente estudiados y se pueden dividir en tres subcategorías en función de los parámetros de operación: combustión, pirólisis y gasificación como lo muestra la figura 4.1. En la Tabla 4.1 se muestran las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de dichos procesos.

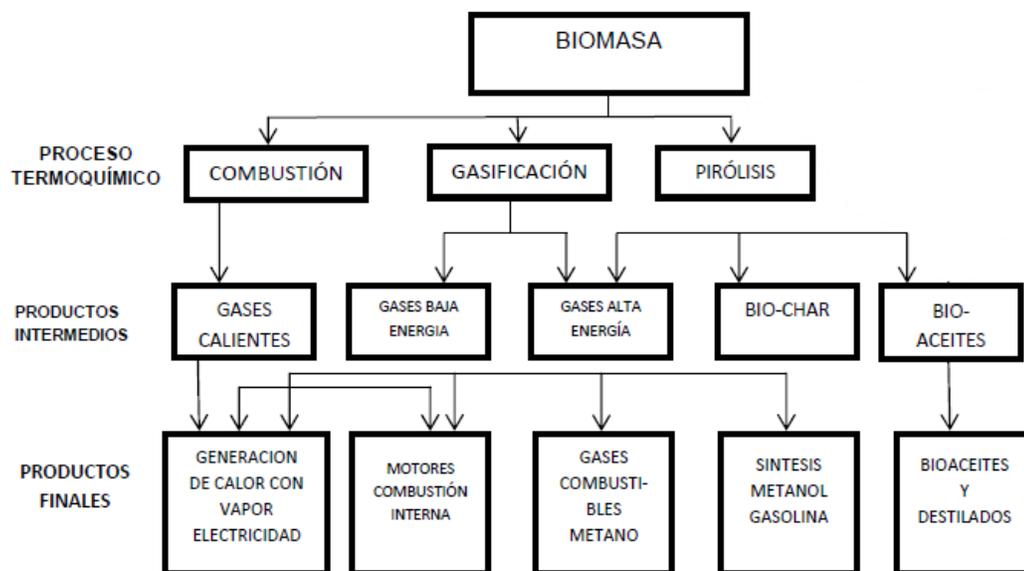


Figura 4.1: Diagrama de los procesos termoquímicos para tratamiento de biomasa, así como sus productos finales (adaptado de Urien Toledo, 2013).

Tabla 4.1: Ventajas y desventajas de los procesos termoquímicos (adaptada de Steinvorth Álvarez, 2014).

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Combustión	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de volumen. - Emisiones controladas. - Aprovechamiento de la energía para generación de calor. - Alternativa a rellenos sanitarios cuando no hay espacio. - Relativamente silenciosos e inodoros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta inversión inicial. - Costos elevados para evitar contaminación por emisiones. - Dificultad de operación (necesidad de personal experto). - Posible generación de productos sumamente nocivos para la salud como dioxinas, furanos y metales pesados. - Problemas con las comunidades cercanas al incinerador. - Posibles conflictos con programas destinados a la reducción en la generación de residuos. - Requiere de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad.
Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> - Aprovechamiento de subproductos en otros procesos. - Permite generar productos específicos de acuerdo a las condiciones de operación. - Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos. - Facilidad de manejo de los productos finales (exceptuando los líquidos debido a su alta corrosividad y viscosidad). 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de inversión inicial. - Requiere cuidado en la operación para no obtener productos indeseados. - Aún no se cuenta con instalaciones de gran escala. - Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad.
Gasificación	<ul style="list-style-type: none"> - Obtención de un gas de síntesis con varios usos. - Facilidad de manejo de los productos obtenidos. - Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Complejidad de operación. - Experiencias a gran escala limitadas. - Utilización de recurso que preferiblemente son destinados al reciclaje. - Requieren de más energía si se trata de residuos con altos porcentajes de humedad.

4.1 Combustión directa

La combustión directa se refiere a la quema de biomasa en presencia de aire, esta combustión es usada comúnmente para convertir la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad (Ayala y Sandoval, 2018).

El más sencillo y más ampliamente utilizado, tanto en el pasado como en el presente, permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos o industriales. Las tecnologías utilizadas para la combustión abarcan una amplia gama de posibilidades que va desde un sencillo fogón abierto hasta calderas de alto rendimiento utilizadas en la industria (Membrillera Serrano, 2018). Las aplicaciones a pequeña escala, como cocinar y calefacción de espacios resultan ser bastante ineficientes, existen entre el 30 y 90 % de pérdidas de transferencia de calor (Dermibas, 2000).

Para poder realizar una combustión de residuos de madera es necesario realizar un pretratamiento previo con el propósito de facilitar reacción.

Estos pretratamientos son los siguientes:

Molienda: este proceso se realiza con el fin de homogeneizar el tamaño de los residuos y facilitar su manipulación. Si se consigue un tamaño uniforme de partículas, se mejorará la eficiencia de la combustión debido al ritmo uniforme y controlado de entrada de combustible y a la posibilidad de regular el paso del aire. El equipo comúnmente utilizado en orden de uso (Murray, 1991):

- Desmenuzadora
- Criba
- Trituradoras

Secado: la eficiencia de la combustión, el control de las calderas y la capacidad del operador para responder rápidamente a los cambios en la demanda de vapor resultan muy afectadas cuando se hay un contenido de humedad elevado y fluctuante en el combustible que llega. La humedad de los residuos puede reducirse mediante prensado mecánico, secado al aire o el empleo de secadores de aire caliente, o combinando los tres procedimientos (Murray, 1991).

Densificación: consiste en compactar materia de baja densidad y convertirla en una de mayor densidad energética, los principales métodos para densificar biomasa son la formación de pellets y briquetas.

4.1.1 Tipos de combustión

Dentro de las aplicaciones potencia y cogeneración, la combustión directa se aplica generalmente en sistemas que van desde 1 MWth hasta varios cientos de MW, que se pueden agrupar en tres tipos de tecnologías: lechos fijos, lechos fluidizados y de combustible pulverizado (Karampinis et al., 2015).

4.1.1.1 Combustión en lecho fijo

La combustión de lecho fijo mostrado en el esquema de la figura 4.2 incluye hornos con parrillas y alimentadores.

Los sistemas de tecnología de lecho fijo son los más extendidos para la combustión de biomasa a escala industrial. Se adaptan bien a todo tipo de combustibles "problemáticos", por ejemplo, combustibles con alta humedad, alto contenido de cenizas y partículas de gran tamaño (Karampinis et al., 2015). Dentro de este proceso de combustión la biomasa se sitúa en una parrilla y se mueve lentamente a través de la caldera. El aire requerido se suministra a través de hoyos dispuestos a lo largo de la parrilla. Los gases combustibles expedidos por la biomasa son quemados después de la adición de un aire secundario, usualmente en una zona de combustión separada de la cama de combustible como se muestra en el siguiente esquema (Barrera et al., 2018).

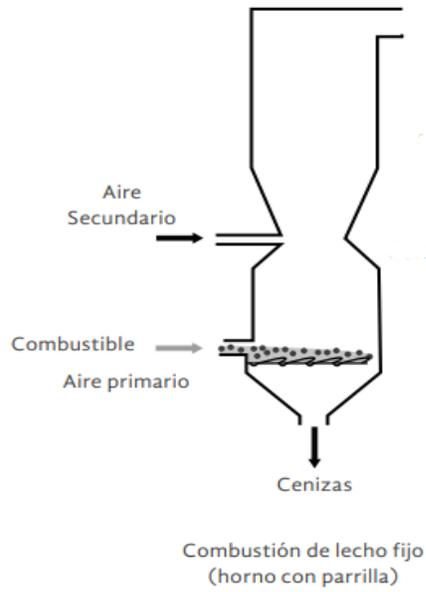


Figura 4.2: Esquema de la combustión en lecho fijo (Barrera et al., 2018).

De acuerdo con la dirección del flujo del combustible y los gases de combustión, existen tres sistemas de operación para calderas de combustión con parrillas (Barrera, et al, 2018):

De flujo en contracorriente mostrado en el esquema de la Figura 4.3, en donde las flamas se encuentran en posición opuesta a la del combustible, proceso recomendado para combustibles de bajo poder calorífico.

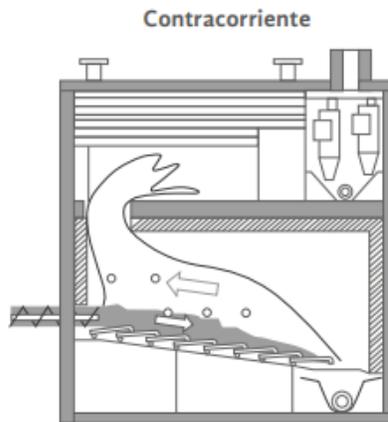


Figura 4.3: Esquema de una caldera de flujo contracorriente (Barrera et al., 2018).

De flujo en corriente como se ilustra en el siguiente esquema de la Figura 5.4 las flamas están en la misma dirección que el combustible, aplicable para combustibles secos o en sistemas con recalentamiento de aire primario.

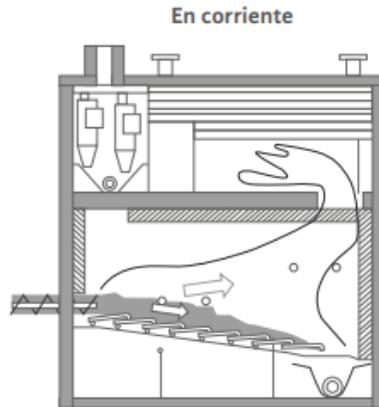


Figura 4.4: Esquema de una caldera de flujo en corriente (Barrera et al., 2018).

De flujo cruzado la remoción de los gases de combustión en el medio de la caldera se utiliza en plantas de combustión con cámaras verticales, en el siguiente esquema de la figura 4.5, se muestra una caldera de flujo cruzado.

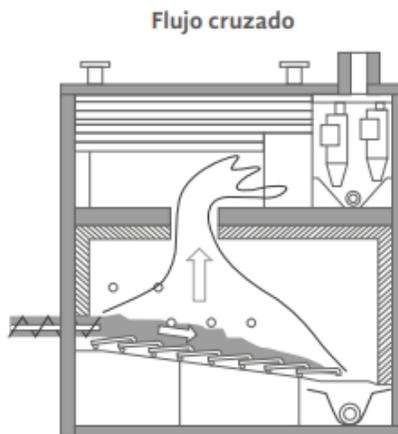


Figura 4.5: Esquema de una caldera de flujo cruzado (Barrera et al., 2018).

Con el fin de lograr una combustión adecuada, se aplica la recirculación de los gases de combustión y cámaras de combustión con agua de enfriamiento. El enfriamiento por agua tiene la ventaja de reducir los volúmenes de gases de combustión, lo que impide el apelmazamiento de las cenizas en las paredes del horno y regularmente extiende el tiempo de vida de los ladrillos de aislamiento.

En la Tabla 4.2 se describen las configuraciones de los lechos fijos, así como sus ventajas y desventajas.

Tabla 4.2: Tecnologías de lecho fijo (Barrera et al., 2018).

Tecnología lecho fijo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Parrillas móviles	Corresponden a los sistemas que incorporan barras paralelas que forman una banda sinfín que se mueve a través de la cámara de combustión.	<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones homogéneas - Baja emisión de hollín. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor cantidad de aire primario. - Requiere mecanismos de alimentación.
Parrillas móviles inclinadas	Estos sistemas tienen una parrilla inclinada que consta de barras fijas y móviles, en los cuales se alternan movimientos horizontales hacia adelante y hacia atrás de las secciones móviles, transportando el combustible a lo largo de la parrilla.	<ul style="list-style-type: none"> - Permite graduar velocidades para ajuste a etapas de combustión. - Permite usar una gran variedad de biomasa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presentan complicaciones en el ajuste de velocidades, lo que genera una alta presencia de inquemados. - Se recomiendan para biomásas secas o con bajo nivel de cenizas.
Parrillas móviles horizontales	Este sistema tiene una cama de combustible completamente horizontal; esto se logra disponiendo de las parrillas de forma diagonal.	<ul style="list-style-type: none"> - Evitan movimientos controlados por efecto de la gravedad distribuyen de manera homogénea el combustible, lo que evita los puntos calientes. - Reduce la altura promedio de una caldera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren precargar de biomasa al inicio de la operación; esto evita que haya un espacio libre entre las barras.
Parrillas vibratorias	Este sistema consiste en una pared de tubos con aletas inclinadas colocados sobre resortes.	<ul style="list-style-type: none"> - Se inhibe la formación de escorias en la parrilla - Ideales para biomásas con altas concentraciones de cenizas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altas emisiones de cenizas causadas por la vibración - Altas emisiones de CO por los disturbios, lo que fomenta la combustión incompleta.
Parrilla rotatoria subalimentada	Se utiliza unas parrillas cónicas que rotan en direcciones opuestas en las cuales se suministra el aire primario por la parte inferior. Como resultado, el combustible quemado y el combustible húmedo son bien mezclados.	<ul style="list-style-type: none"> - Ideal para biomásas muy húmedas (65%) - Capacidad entre 3 y 17 MWt; en caso de contar con cogeneración, puede estar entre 1 y 4.5 MW. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere un tamaño de partícula promedio por debajo de 50 mm.
Calderas con subalimentador	La alimentación se da en la parte inferior por medio de tornillos sinfín o bandas transportadoras.	<ul style="list-style-type: none"> - Seguras y de operación económica - Operación flexible y fácil remoción de cenizas. - Ideales para biomásas con bajo contenido de ceniza. - Requieren un nivel bajo de control. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere un tamaño de partícula promedio por debajo de 50 mm. - Apelmazamiento de ceniza pueden causar problemas en alimentación.

4.1.1.2 Combustión de lecho fluidizado

En los sistemas de lecho fluidizado, el combustible se quema en una cama o lecho lleno de un material inerte, mientras que el aire es suministrado desde el fondo de la cámara de combustión. Es conveniente que la velocidad del aire sea suficientemente alta para que el lecho y las partículas de combustible se levanten consiguiendo así la fluidización (Karampinis et al., 2015).

Hay dos variedades principales de lechos fluidizados, como se muestra en el esquema de la figura 4.6, el lecho fluidizado burbujeante, en el cual la velocidad del aire es relativamente baja y las partículas forman una zona bien definida en la cámara de combustión asemejándose a un líquido hirviendo, y el lecho fluidizado circulante, en el que la velocidad de fluidización es más alta y las partículas salen continuamente de la zona de combustión y es necesario circular de vuelta después de pasar por un ciclón de separación por tamaño (Karampinis et al., 2015).

Entre las ventajas significativas que tiene sobre un sistema de convencional de combustión se destaca un diseño más compacto, la flexibilidad en el uso de combustible, la alta eficiencia en la combustión y la reducción de contaminantes, como sulfuros SO_x y NO_x (Saidur et al., 2011).

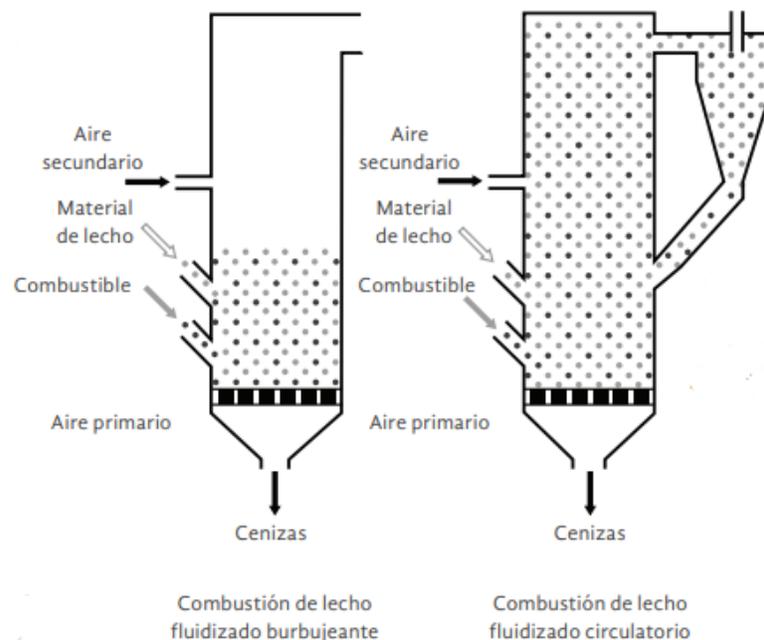


Figura 4.6: Esquema representativo de combustión de lecho fluidizado burbujeante y fluidizado circulante (Barrera et al., 2018).

Prieto Padilla (2007) menciona que algunas de las aplicaciones industriales de la combustión de lecho fluidizado son:

- Intercambiadores de calor: el intercambio puede producirse sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración que circula por tubos en el interior del lecho fluidizado, es común encontrar intercambiadores que hacen circular agua a través de tubos sumergidos en un lecho fluidizado de partículas a alta temperatura recuperando el calor contenido en éstas para producir vapor, como se ilustra en la Figura 4.7.

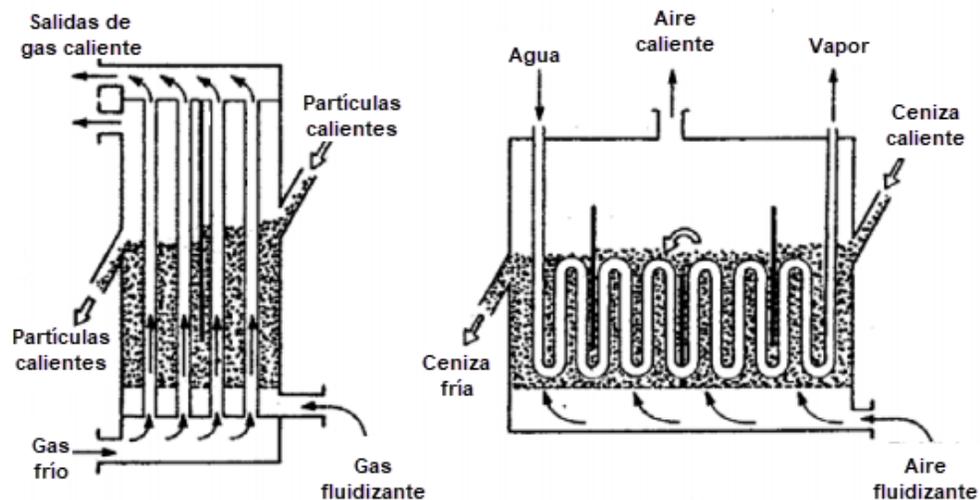


Figura 4.7: Ejemplos de intercambiadores de calor en lecho fluidizado (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).

- Recubrimiento de metales: el recubrimiento plástico de metales se consigue mediante un lecho fluido formado por pequeñas partículas de plástico en las cuales se sumerge un metal caliente a una temperatura superior a la de fusión del plástico, así éste se queda adherido a la superficie del metal formando una capa que aumenta exponencialmente con el tiempo de estancia del metal caliente en el lecho.
- Secado de sólidos: El secado de sólidos se realiza mediante fluidización con aire caliente, aunque existen diseños en los que el calor se aporta mediante conductos sumergidos en el lecho, reduciendo el volumen de gas necesario. Para aplicaciones en las que se requiere mayor eficiencia, por ejemplo, en secado de sólidos muy húmedos, podemos fluidizar con vapor sobrecalentado a alta presión. Se pueden secar cualquier tipo de sólido húmedo siempre y cuando estos puedan ser fluidizados con gas caliente. Para secar materiales inorgánicos

se utilizan lechos de una sola etapa (Figura 4.8), donde se mantiene la temperatura de entre 60 a 90°C y el tiempo de residencia no es importante.

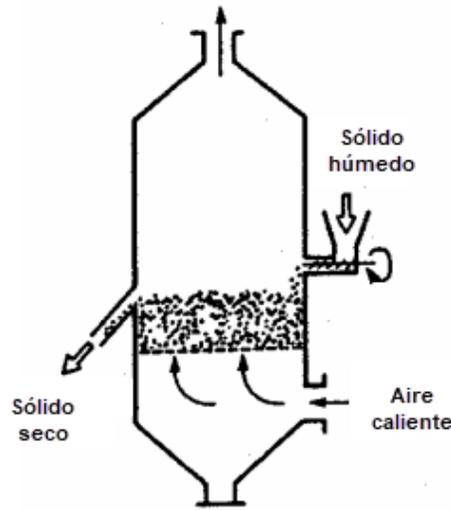


Figura 4.8: Diseño de una sola etapa de fluidización en lecho fluidizado (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).

Cuando los materiales son delicados o con tiempo de secado específico se hará uso de lechos multietapas o con distribuidores rotativos, controlando el tiempo de residencia. En la figura 4.9 se muestran los lechos, a la izquierda, el de multietapas y a la derecha con placas de distribución móvil.

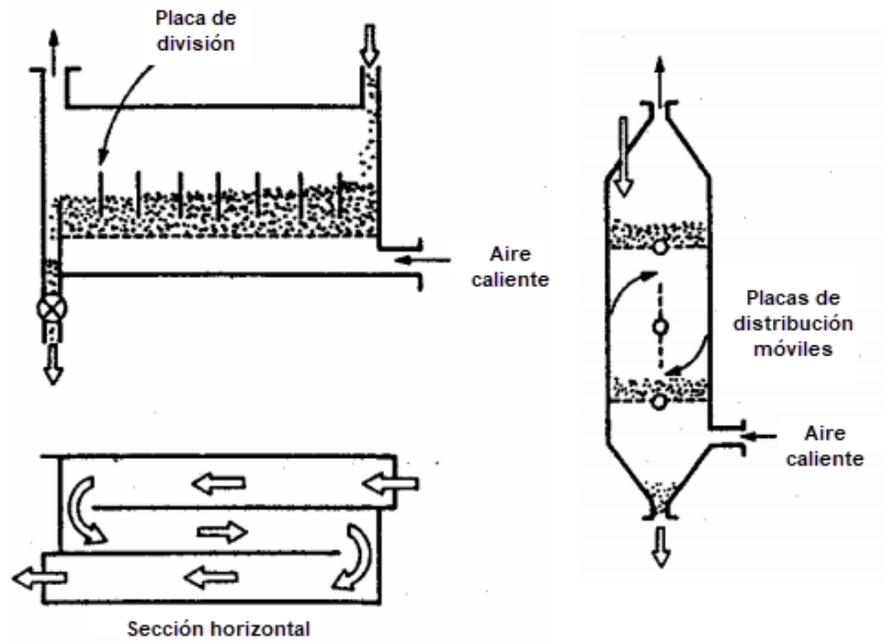


Figura 4.9: Diseños multietapa y rotatorio de fluidización en procesos de secado (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).

En cuanto a los sólidos que presentan cantidades considerables de disolventes, presentando cierto riesgo de explosión, se emplea gas inerte, vapor de agua o el propio vapor del disolvente en un sistema cerrado con intercambiador de tubos, para ilustrar el diseño se tiene la figura 4.10.

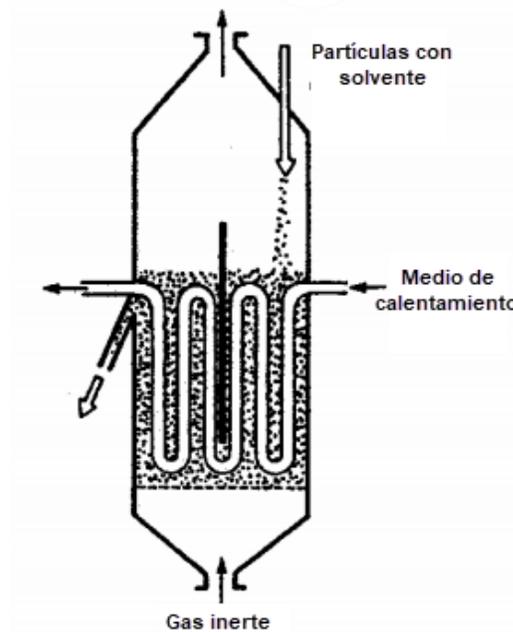


Figura 4.10: Diseño para partículas que contienen disolventes (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).

- Recubrimiento de objetos: Cuando una solución de sal sódica es inyectada o rociada en un lecho caliente de partículas secas, las superficies de las partículas se humedecen. El consecuente secado de la capa líquida proporciona un eficiente proceso de recubrimiento; este tipo de operación también es usado para recubrir con soluciones de sal (figura 4.11).

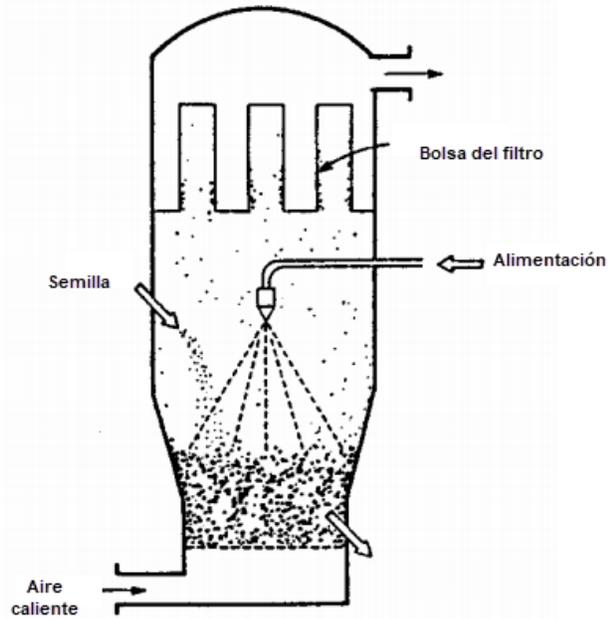


Figura 4.11. Diseño para recubrimiento y/o crecimiento de partículas (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).

- Adsorción: En la adsorción por lecho fluidizado (Figura 4.12), los componentes se adsorben de forma periódica con partículas de carbón activado y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción se llevan a cabo en el mismo lecho.

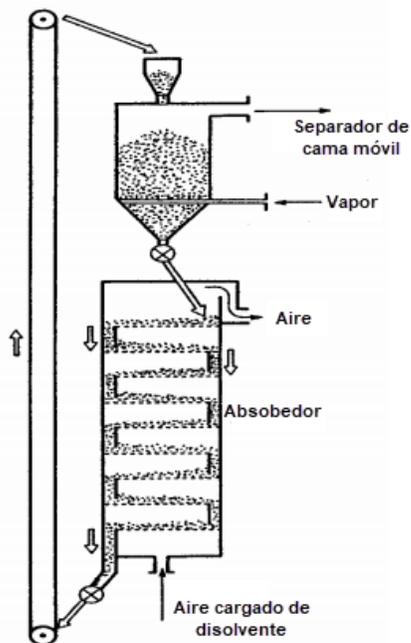


Figura 4.12: Adsorción en lecho fluidizado desarrollado por Courtaulds Ltd (adaptación de Kunii y Levenspiel, 1991).

4.1.1.3 Combustión con combustible pulverizado

Los sistemas de combustible pulverizado queman en un estado de suspensión partículas muy finas de combustible mezcladas con aire de combustión. Eso es actualmente la tecnología más común en plantas de energía empleando carbón pulverizado. Las plantas de combustión de carbón pulverizado pueden usar biomasa como combustible, los biocombustibles sólidos normalmente sustituye el carbón en una caldera de combustible pulverizado sin mayores modificaciones o impactos (Karampinis et al., 2015). El siguiente esquema de la Figura 4.13 muestra una caldera para combustible pulverizado.

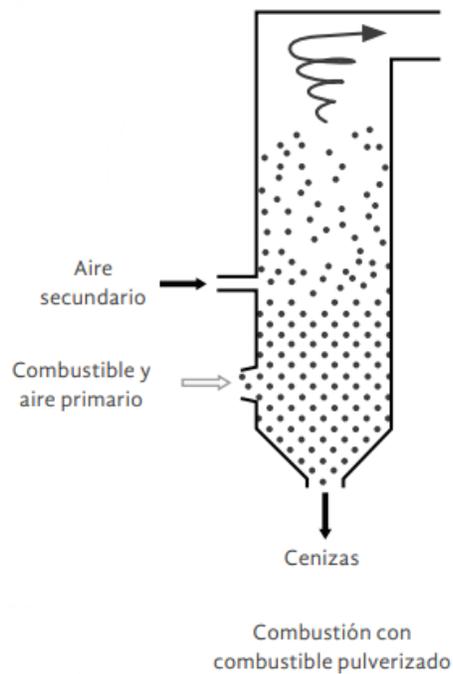


Figura 4.13: Esquema de una caldera para combustible pulverizado (Barrera et al., 2018).

4.2 Gasificación

Es una oxidación parcial de sustancias orgánicas a temperatura elevada (500-1800°C), para producir gas de síntesis (syngas), el cual se puede utilizar como materia prima para la industria química, o como combustible para la producción de energía eléctrica y/o térmica (Rincón y Silva, 2014, en capítulo 8). Este gas debido a su composición posee un poder calorífico considerable que permite su uso en motores de combustión interna para la generación de trabajo o energía eléctrica, en turbinas de gas de ciclo Brayton o como materia prima en procesos químicos para la síntesis de cadenas de mayor valor agregado (Sierra et al., 2011).

Un sistema de gasificación para producción de calor y potencia básicamente consiste en un gasificador, un limpiador de gas y un convertidor de energía que generalmente es un motor o una turbina. En este proceso, la mayor dificultad estriba en el filtrado del “syngas” o gas de síntesis, pues se requiere de equipos con capacidad para operar con gases a elevadas temperaturas, con partículas en suspensión de diferentes tipos y algunas veces altos flujos de masa (Estrada y Zapata, 2004).

La mayor limitación para las aplicaciones comerciales de la tecnología de gasificación está en la necesidad de implementar un sistema de limpieza del gas, que además de los elementos combustibles contiene impurezas que pueden ocasionar problemas en los equipos, los sistemas de limpieza están fundamentalmente a la eliminación de alquitrán y las partículas cuando el gas se utiliza para la generación de energía eléctrica en motores y algunos otros compuestos como azufre, amoníaco, ácidos, halógenos por mencionar algunos para aplicaciones como la síntesis catalítica de biocombustibles (Rincón y Silva, 2014).

El gas generado después de un proceso de gasificación contiene una mezcla de gases combustibles y no combustibles, agua, polvo y compuestos de sulfuro como (H_2S) y compuestos de nitrógeno como (NH_3 , HCN) que son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los NO_x que son grandes contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida. Dicho gas posee un poder calorífico de entre 2.7 y 5.1 MJ/m^3 lo que lo hace ser un combustible de bajo poder calorífico (Estrada y Zapata, 2004).

4.2.1 Tipos de Gasificadores

4.2.1.1 Gasificador de corriente ascendente

Un gasificador de corriente ascendente tiene zonas claramente definidas para la combustión parcial, la reducción y la pirólisis como se muestra en el esquema (Figura 4.14). El aire se introduce en la parte inferior y actúa como contracorriente al flujo de combustible. El gas se extrae en una ubicación más alta. El gasificador de corriente ascendente alcanza la máxima eficiencia cuando el gas caliente pasa a través del lecho de combustible y sale del gasificador a baja temperatura. El calor proporcionado por el gas se utiliza para precalentar y secar el combustible (Turare, 2002).

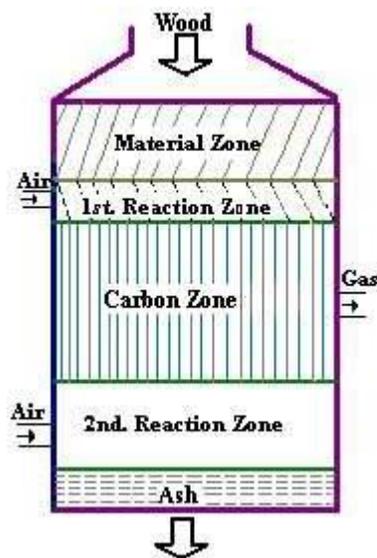


Figura 4.14: Esquema de un gasificador de corriente ascendente (Turare, 2002).

4.2.1.2 Gasificador de corriente descendente

Se introduce aire en el lecho empacado que fluye hacia abajo o en combustibles sólidos y el gas se extrae por la parte inferior como se aprecia en el esquema a continuación (Figura 4.15). Una menor eficiencia general y las dificultades para manejar un mayor contenido de humedad y cenizas son problemas comunes en los pequeños productores de gas de corriente descendente. El tiempo (20-30 minutos) necesario para encender y llevar la planta a la temperatura de trabajo con buena calidad de gas es más corto que el del productor de gas de corriente ascendente. Este gasificador se prefiere al gasificador de corriente ascendente para motores de combustión interna (Turare, 2002).

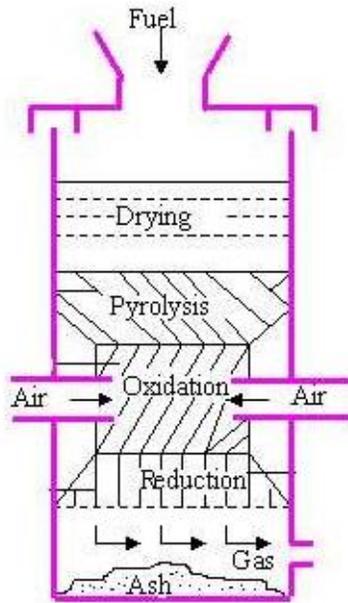


Figura 4.15: Esquema de un gasificador de corriente descendente (Turare, 2002).

4.2.1.3 Gasificador de fuego doble.

Es la combinación de gasificadores de corriente paralela y contracorriente, como se observa en la Figura 4.16. Consta de dos zonas de reacción definidas: el secado, la carbonización a baja temperatura y el craqueo de los gases se producen en la zona superior, mientras que la gasificación permanente del carbón vegetal se produce en la zona inferior. La temperatura del gas se encuentra entre 460 a 520 °C. El proceso total se realiza con una presión de -30 Mbar. El gasificador de doble fuego produce un gas bastante limpio (Turare, 2002).

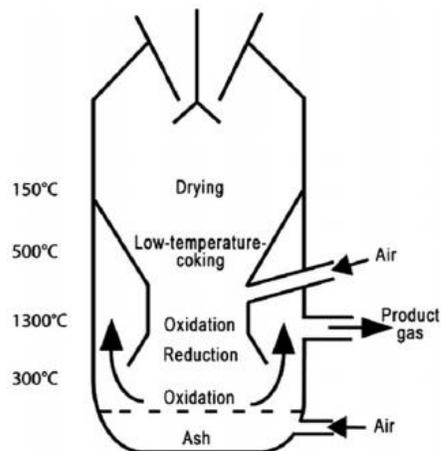


Figura 4.16: Esquema de un gasificador de fuego doble (Kramreiter, 2008).

La gasificación de la biomasa, se perfila como una opción muy importante a futuro para la generación de energía. El gas combustible de bajo poder calorífico producto de la gasificación de biomasa tiene como ventajas la disponibilidad de la materia prima en casi todos los rincones de la tierra, producción neutra de CO₂ y es versátil pues es posible utilizarlo en calderas, quemadores, motores de combustión interna y turbinas de gas (Estrada y Zapata, 2004).

4.3 Pirólisis

Es un proceso termoquímico, ya sea en ausencia completa de un agente oxidante, o con solo una cantidad limitada (gasificación parcial), con el fin de proporcionar la energía térmica necesaria para la pirólisis. Se emplean temperaturas relativamente bajas (400-900°C) en comparación con la gasificación. Se obtienen tres productos: gas de pirólisis, el líquido de pirólisis y el coque sólido (Rincón y Silva, 2014).

El proceso de pirólisis tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos (coque, bio-aceite y gas) (Kung, 2012).

A través de la variación de los parámetros del proceso de pirólisis como: tipo de biomasa, temperatura máxima, condiciones de la atmósfera de reacción, velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor, es posible influir en la distribución y características de sus principales productos (Cantos et al., 2018).

La pirólisis, es por tanto, un proceso flexible, que permite, mediante el uso de la tecnología adecuada, favorecer la producción de gases, líquidos o aceites y biocarbones (Urien Toledo, 2013).

4.3.1 Tipos de pirólisis

Los distintos tipos de procesos de pirólisis se clasifican atendiendo a la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la temperatura final en: carbonización, pirólisis convencional, pirólisis rápida, pirólisis flash de gases y líquidos, pirólisis ultra rápida, pirólisis a vacío, hidro-pirólisis y metano pirólisis procesos ilustrados en la Tabla 5.3 (Urien Toledo, 2013).

Tabla 4.3: Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y temperatura y los productos obtenidos (Urien Toledo, 2013).

Proceso	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura °C	Productos
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Biochar
Convencional	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
Rápida	0.5-5 seg	Muy rápida	650	Bioaceites
Flash (líquidos)	<1 seg	Rápida	<650	Bioaceites
Flash (gas)	<1 seg	Rápida	<650	Químicos y gas
Ultrarápida	<0.5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
Vacío	2-30 seg	Media	400	Bioaceites
Hidropirólisis	<10 seg	Rápida	<500	Bioaceites
Metanopirólisis	<10 seg	Rápida	<700	Químicos

La pirólisis, es por tanto, un proceso flexible, que permite, mediante el uso de la tecnología adecuada, favorecer la producción de gases, líquidos o aceites y biocarbones (Urien Toledo, 2013).

4.3.1.1 Pirolisis lenta

La pirólisis lenta se basa en la combustión parcial de la biomasa por calentamiento uniforme y lento a temperaturas entre 450 y 650°C, y prácticamente sin oxígeno, con la captura simultánea de los gases producidos para la obtención de syngas, transformando aproximadamente un 40% de la biomasa original en carbón. Para la producción de este tipo de carbón se precisa de tiempos de residencia de horas a días. La reacción pirolítica es medianamente endotérmica, siendo la mayor parte de energía capturada en forma de syngas y condensados de bioaceite. La energía extraída del proceso puede utilizarse para retroalimentar el mismo o para el secado de la materia prima. También, puede quemarse el syngas para generar calor o electricidad (Herrera Culebro, 2018).

Según Domínguez Domínguez (2015) en la pirolisis lenta se definen las siguientes etapas respecto a la temperatura:

- Secado: este proceso es observable a temperaturas menores a 100°C, es mediante este proceso que el agua de la biomasa se evapora, el calor sensible entregado permite el aumento de temperatura.

- Torrefacción: etapa observable a temperaturas de entre los 100 y 300°C, es aquí donde se maximiza la densidad energética y el rendimiento masico al ser degradada la hemicelulosa presente en la biomasa.
- Pirolisis: Etapa que se produce entre los 300 y 600 °C al realizarse una descomposición térmica de la celulosa de la biomasa se genera los productos de la reacción, como el carbón gases condensables y no condensables.

4.3.1.2 Pirolisis rápida

Es el proceso por el cual, el material se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno y a temperaturas altas (650°C). Se utiliza sobre todo para la producción de bioaceites ya que los rendimientos en peso de esta fracción son muy superiores a los que se obtienen en la pirólisis convencional (Urien Toledo, 2013).

En la pirólisis rápida, la biomasa se descompone para generar principalmente vapores y aerosoles y algo de carbón. Después del enfriamiento y condensación, se forma un líquido móvil de color marrón oscuro que tiene un poder calorífico aproximadamente la mitad que el combustóleo convencional. Si bien está relacionado con los procesos de pirólisis tradicionales para obtener carbón, la pirólisis rápida es un proceso avanzado, con parámetros cuidadosamente controlados para obtener altos rendimientos de líquido (Bridgwater, 2003).

El producto principal, el bioaceite, se obtiene en rendimientos de hasta 75% en peso sobre la base seca, junto con el subproducto carbonizado y gas que se utilizan en el proceso, por lo que no hay corrientes residuales distintas de los gases de combustión y las cenizas (Bridgwater, 2003).

Se puede considerar cualquier forma de biomasa para la pirólisis rápida que van desde residuos agrícolas como paja, olivo huesos y cáscaras de nueces a cultivos energéticos como miscanthus y sorgo además de desechos sólidos como lodos de depuradora y desechos de cuero (Bridgwater, 2003).

4.3.1.3 Pirolisis flash o muy rápida

Cuando la temperatura del proceso es más elevada (1000 °C) y los tiempos de residencias son aún más cortos. En este caso, el mayor rendimiento corresponde a los gases. Sin embargo, la pirólisis flash es una vía prometedora para la producción de bioaceites. La conversión de la biomasa en aceite crudo puede tener un rendimiento de

hasta el 70 %. En los procesos de flash pirólisis, las condiciones de operación se pueden variar, para favorecer la producción de gas (flash-gas) o de líquidos (flash-líquidos) (Urien Toledo, 2013).

CAPITULO 5. Resultados

Primeramente, es necesario reafirmar que los resultados que se muestran a continuación son obtenidos de forma teórica mediante la base de datos del ANBIO para el año 2012 en la República Mexicana, es posible que para el momento en el que esta tesis está siendo redactada los datos varíen.

Para la recolección de datos se navegó dentro del Atlas Nacional de Biomasa para obtener las bases de datos correspondientes a los bosques de tala sustentable únicamente se tomaron en cuenta los bosques de encino, pino y mixto así como los residuos forestales provenientes de los aserraderos de árboles de hojosas, tropicales y coníferas, las selvas quedaron descartadas por el tipo de biomasa que producen.

Las bases de datos fueron limpiadas para el mejor manejo de los datos, solo se conservaron los criterios: estado, tipo de biomasa, producción de biomasa, poder calorífico inferior y potencial energético.

Posteriormente para ser analizados se reacomodaron por estado para obtener la biomasa total producida en toneladas y potencial energético al año, con la finalidad de encontrar que estados de la República Mexicana son los que cuentan con mayor cantidad de biomasa disponible para su aprovechamiento.

Así mismo se realizaron los cálculos para la transformación hipotética del potencial energético aportado por la biomasa forestal por medio del ciclo Rankine a energía eléctrica capaz de ser inyectada al Sistema Eléctrico Nacional, analizado por entidad federativa.

Enseguida se muestran a detalladamente lo redactado en los párrafos previos.

5.1 Producción de biomasa

La biomasa forestal, de acuerdo con el ANBIO, tiene dos orígenes, el de la tala sustentable, y el del aserrío. La tala sustentable, considera las fuentes de biomasa de los bosques: de pino, encino y mixtos, y para cada uno de ellos aplica el criterio de 3 y 5 km de carretera.

Los resultados de la biomasa proveniente de la tala sustentable se mencionan a continuación, en primer lugar, para los que se encuentran a 3 km de carretera y después para los de 5 km de carretera.

5.1.1 Resultados para la tala sustentable a 3 km de carretera

La Tabla 5.1 muestra la cantidad producida por año por estado de los diferentes tipos de biomasa producida por los bosques de encino, pino y mixtos a 3 km de carreteras, datos recopilados por la subclasificación de tala sustentable de acuerdo al Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO) para el año 2014 en la República Mexicana.

Tabla 5.1: Cantidad de biomasa por estado de tala sustentable a 3 km de carreteras (elaboración propia).

Estado	Tipo de Biomasa	Biomasa producida Ton/año
Aguascalientes	Bosque de encino	20281
Baja California	Bosque de encino	2005
	Bosque de pino	51231
Baja California Sur	Bosque de encino	3133
Campeche	Bosque de encino	14457
CDMX	Bosque de encino	1378
	Bosque de pino	9573
	Bosque mixto	3142
Chiapas	Bosque de encino	169458
	Bosque de pino	123821
	Bosque mixto	458894
Chihuahua	Bosque de encino	1387667
	Bosque de pino	1169761
	Bosque mixto	1882772
Coahuila	Bosque de encino	46868
	Bosque de pino	43472
	Bosque mixto	42429
Colima	Bosque de encino	28512
	Bosque de pino	81
	Bosque mixto	5319
Durango	Bosque de encino	719610
	Bosque de pino	1299639
	Bosque mixto	1103636
Edo. Méx	Bosque de encino	128757
	Bosque de pino	20008
	Bosque mixto	100610
Guanajuato	Bosque de encino	161586
	Bosque de pino	9079
	Bosque mixto	9692
Guerrero	Bosque de encino	798462
	Bosque de pino	113149
	Bosque mixto	1091712
Hidalgo	Bosque de encino	71503

	Bosque de pino	16730
	Bosque mixto	32521
Jalisco	Bosque de encino	1055411
	Bosque de pino	76564
	Bosque mixto	762291
Michoacán	Bosque de encino	400658
	Bosque de pino	319639
	Bosque mixto	641291
Morelos	Bosque de encino	7624
	Bosque de pino	733
	Bosque mixto	1694
Nayarit	Bosque de encino	182405
	Bosque de pino	4666
	Bosque mixto	237475
Nuevo León	Bosque de encino	27636
	Bosque de pino	40435
	Bosque mixto	40038
Oaxaca	Bosque de encino	718522
	Bosque de pino	305609
	Bosque mixto	1243309
Puebla	Bosque de encino	124436
	Bosque de pino	61591
	Bosque mixto	79099
Querétaro	Bosque de encino	39592
	Bosque de pino	826
	Bosque mixto	14595
San Luis Potosí	Bosque de encino	244313
	Bosque de pino	6853
	Bosque mixto	16055
Sinaloa	Bosque de encino	537936
	Bosque de pino	47610
	Bosque mixto	169646
Sonora	Bosque de encino	1401461
	Bosque de pino	11332
	Bosque mixto	240497
Tabasco	Bosque de encino	31482
Tamaulipas	Bosque de encino	130290
	Bosque de pino	7799
	Bosque mixto	14936
Tlaxcala	Bosque de encino	12220
	Bosque de pino	7856

	Bosque mixto	5546
Veracruz	Bosque de encino	58903
	Bosque de pino	40981
	Bosque mixto	25457
Zacatecas	Bosque de encino	369015
	Bosque de pino	34710
	Bosque mixto	147612

El total generado por la biomasa proveniente de la tala sustentable de bosques a 3km de carretera es de 21089597 toneladas al año; el bosque de encino es el principal productor con 8895581 toneladas al año generadas, el bosque mixto se encuentra en el segundo lugar con 8370268 toneladas al año, por último se encuentra el bosque de pino con 3823748 toneladas al año.

En cuanto al bosque de encino Sonora produce 1401461 toneladas al año, Chihuahua 1387667 toneladas al año y Jalisco 1055411 toneladas al año.

Durango, Chihuahua y Michoacán son los principales productores de bosque de pino con 1299639, 1169761 y 319639 toneladas al año respectivamente.

Para el bosque mixto Chihuahua genera 1882772 toneladas al año, Oaxaca 1243309 toneladas al año y Durango 1103636 toneladas al año.

A continuación se muestran los resultados para cada tipo de fuente de biomasa:

a) Bosque de encino

Se registró una generación total de 8895581 toneladas al año de biomasa de encino en la Figura 5.1, se muestra la distribución de generación estado de este tipo de biomasa. Se puede observar que Sonora (16%), Chihuahua (16%) y Jalisco (12%) son los 3 estados de mayor generación.

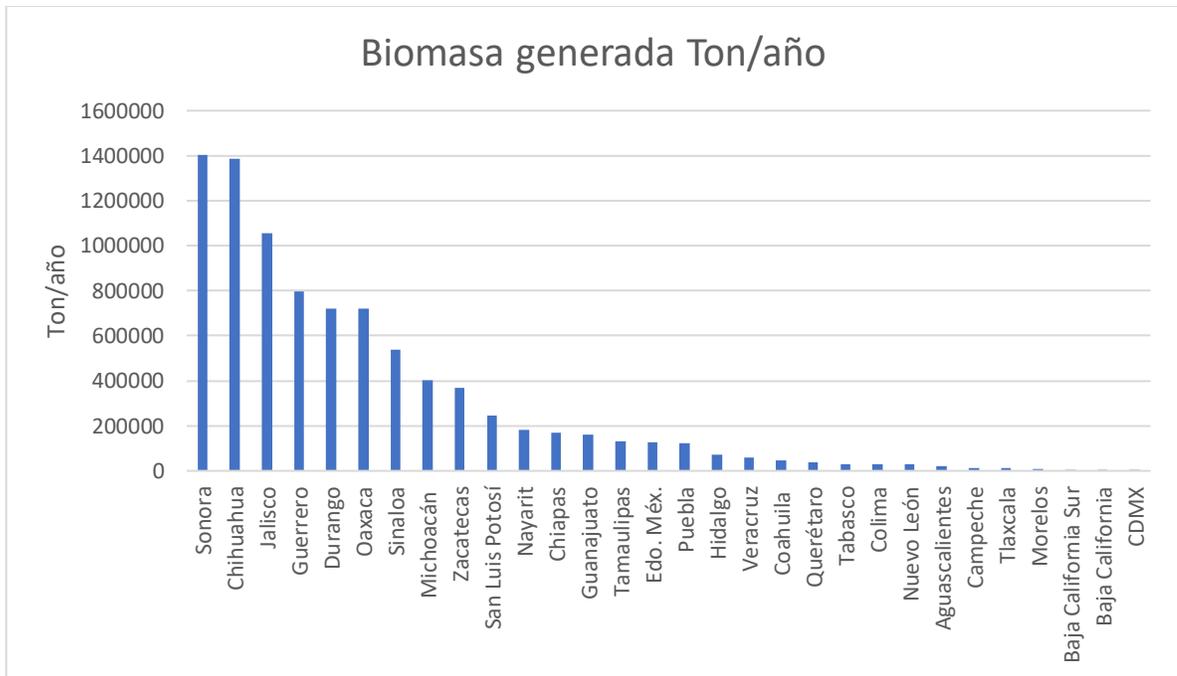


Figura 5.1: Producción de biomasa de bosque de encino por estado a 3Km de carretera. (elaboración propia).

b) Bosque de pino

Por tala sustentable de bosque de pino se registran 3823748 toneladas al año, en la Figura 5.2 se puede apreciar la cantidad generada por entidad federativa. Se observa que Durango (34%), Chihuahua (31%) y Michoacán (8%) son los estados que más biomasa generan.

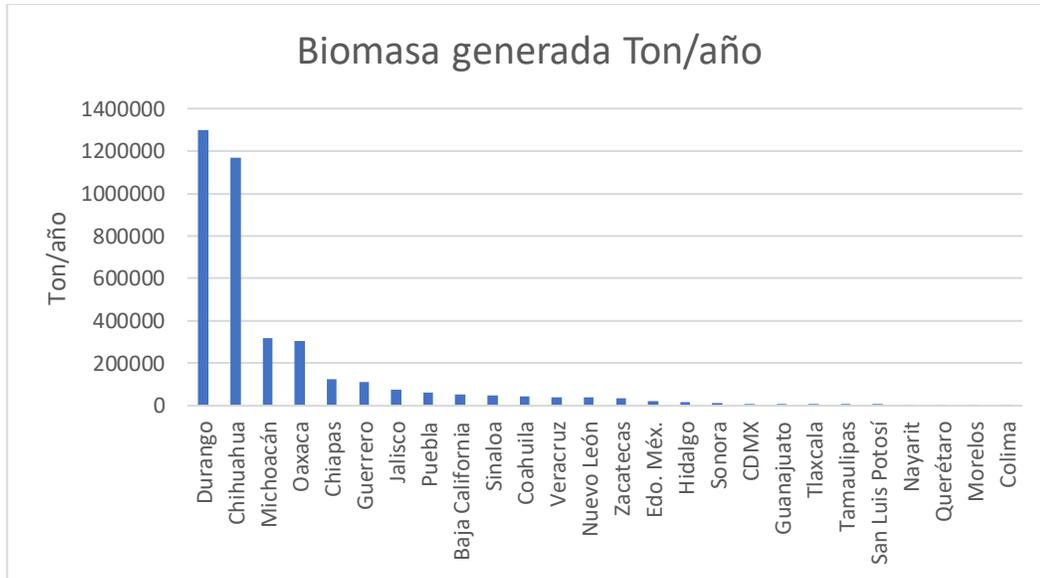


Figura 5.2: Producción de biomasa de bosque de pino por estado a 3Km de carretera. (elaboración propia).

c) Bosque mixto

Del bosque mixto se generan 8370268 toneladas al año, la Figura 5.3 muestra la cantidad de este tipo de biomasa por estado. Chihuahua (23%), Oaxaca (15%) y Durango (13%) son los estados que cuentan con mayor generación.

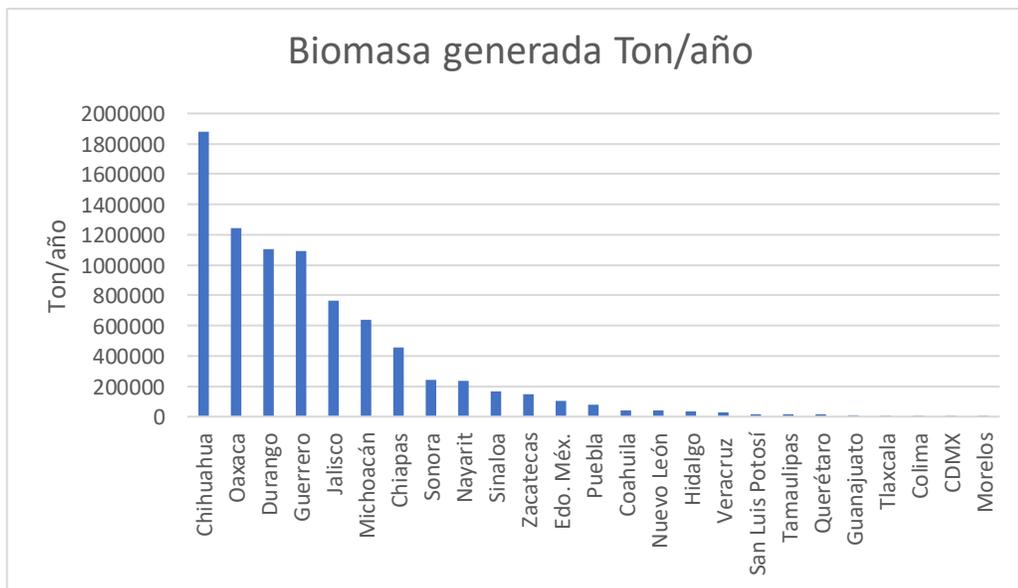


Figura 5.3: Producción de biomasa bosque mixto por estado a 3Km de carretera. (elaboración propia).

El bosque de encino es el principal productor de biomasa, seguido del bosque mixto y por último el bosque de pino.

En el bosque de encino de las 32 entidades federativas 29 estados cuentan con esta biomasa; los estados que mayor generación tienen son Sonora, Chihuahua, Jalisco, Guerrero, Durango y Oaxaca; estos proveen el 68% de la biomasa de dicho bosque.

Para el bosque de pino en la República Mexicana solo 26 estados generan dicha biomasa; Durango, Chihuahua, Michoacán y Oaxaca aportan el 81% de la biomasa generada a nivel nacional.

El bosque mixto es generado por 25 de las 32 entidades federativas donde Chihuahua, Oaxaca, Durango y Guerrero aportan el 64% de la biomasa.

Los estados Chihuahua, Oaxaca y Durango cuentan con una buena generación de los 3 tipos de bosque, en ellos se genera el 47% de la biomasa forestal del apartado de tala sustentable a 3 km de carreteras.

5.1.2 Resultados de la tala sustentable a 5 km de carretera.

A continuación, se muestra en la Tabla 5.2, la cantidad producida por año a nivel estatal de los diferentes tipos de biomasa producida por los bosques de encino, pino y mixtos a 5 km de carreteras, datos de tala sustentable de acuerdo al ANBIO para el año 2014 en la República Mexicana.

Tabla 5.2: Cantidad de biomasa por estado de tala sustentable a 5 km de carreteras (elaboración propia).

Estado	Tipo de biomasa	Biomasa producida Ton/año
Aguascalientes	Bosque de encino	20736
Baja California	Bosque de encino	4376
	Bosque de pino	59070
Baja California Sur	Bosque de encino	2280
Campeche	Bosque de encino	14457
CDMX	Bosque de encino	1378
	Bosque de pino	11265
	Bosque mixto	3142
Chiapas	Bosque de encino	184646
	Bosque de pino	136034
	Bosque mixto	507214
Chihuahua	Bosque de encino	1873360
	Bosque de pino	1297514
	Bosque mixto	2297879
Coahuila	Bosque de encino	52929
	Bosque de pino	52931
	Bosque mixto	57978
Colima	Bosque de encino	40914

	Bosque de pino	332
	Bosque mixto	8160
Durango	Bosque de encino	999514
	Bosque de pino	1495357
	Bosque mixto	1436223
Edo. Méx	Bosque de encino	133594
	Bosque de pino	22110
	Bosque mixto	102567
Guanajuato	Bosque de encino	173784
	Bosque de pino	14476
	Bosque mixto	11866
Guerrero	Bosque de encino	953498
	Bosque de pino	132174
	Bosque mixto	1319003
Hidalgo	Bosque de encino	81901
	Bosque de pino	18541
	Bosque mixto	33048
Jalisco	Bosque de encino	1161492
	Bosque de pino	86175
	Bosque mixto	874877
Michoacán	Bosque de encino	440434
	Bosque de pino	346926
	Bosque mixto	696137
Morelos	Bosque de encino	7753
	Bosque de pino	876
	Bosque mixto	1694
Nayarit	Bosque de encino	234215
	Bosque de pino	6619
	Bosque mixto	303447
Nuevo León	Bosque de encino	33054
	Bosque de pino	49720
	Bosque mixto	42805
Oaxaca	Bosque de encino	863945
	Bosque de pino	363886
	Bosque mixto	1563453
Puebla	Bosque de encino	151067
	Bosque de pino	69606
	Bosque mixto	81145
Querétaro	Bosque de encino	87080
	Bosque de pino	854
	Bosque mixto	16259

San Luis Potosí	Bosque de encino	281423
	Bosque de pino	12355
	Bosque mixto	20804
Sinaloa	Bosque de encino	691159
	Bosque de pino	62989
	Bosque mixto	225888
Sonora	Bosque de encino	1683235
	Bosque de pino	12123
	Bosque mixto	280543
Tabasco	Bosque de encino	31503
Tamaulipas	Bosque de encino	157523
	Bosque de pino	10565
	Bosque mixto	19623
Tlaxcala	Bosque de encino	12220
	Bosque de pino	7932
	Bosque mixto	5598
Veracruz	Bosque de encino	59425
	Bosque de pino	41336
	Bosque mixto	25518
Zacatecas	Bosque de pino	49638
	Bosque mixto	185855

El total generado por la biomasa proveniente de la tala sustentable de bosques a 5km es de 24915025 toneladas al año; el bosque de encino es el principal productor con 10432895 toneladas al año generadas, el bosque mixto se encuentra en el segundo lugar con 10120726 toneladas al año, por último, se encuentra el bosque de pino con 4361404 toneladas al año.

El bosque de encino es generado primordialmente en los estados de Chihuahua, Sonora y Jalisco con 1873360, 1683234 y 1161492 toneladas al año respectivamente.

Para el bosque de pino la principal aportación la brindan los estados de Durango con 1495357 toneladas al año, Chihuahua con 1297514 toneladas al año y Oaxaca con 363886 toneladas al año.

Los principales productores de bosque mixto son Chihuahua con 2297879 toneladas al año, Oaxaca con 1563453 toneladas al año y Durango con 1436223 toneladas al año.

A continuación, se muestran los resultados para cada tipo de fuente de biomasa:

a) Bosque de encino

Se registró una producción total de 10432895 toneladas al año de bosque de encino, la Figura 5.4 muestra la distribución de generación por estado de este tipo de biomasa. Chihuahua (18%), Sonora (16%) y Jalisco (11%) son los 3 estados que mayor cantidad de biomasa generan.

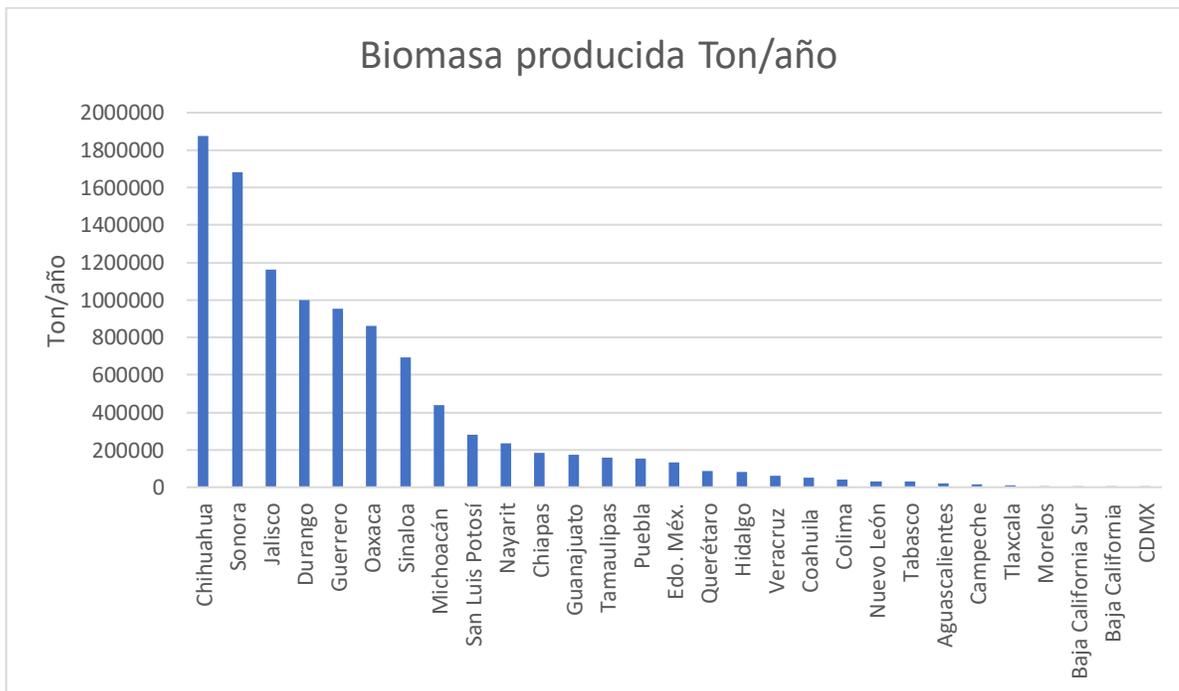


Figura 5.4: Producción de biomasa de bosque de encino por estado a 5Km de carreteras. (elaboración propia).

b) Bosque de pino

De bosque de pino se generaron 4361404 toneladas al año, en la Figura 5.5 se puede apreciar la cantidad producida por entidad federativa. Durango (34%), Chihuahua (30%) y Oaxaca (8%) son los 3 principales productores de esta biomasa.

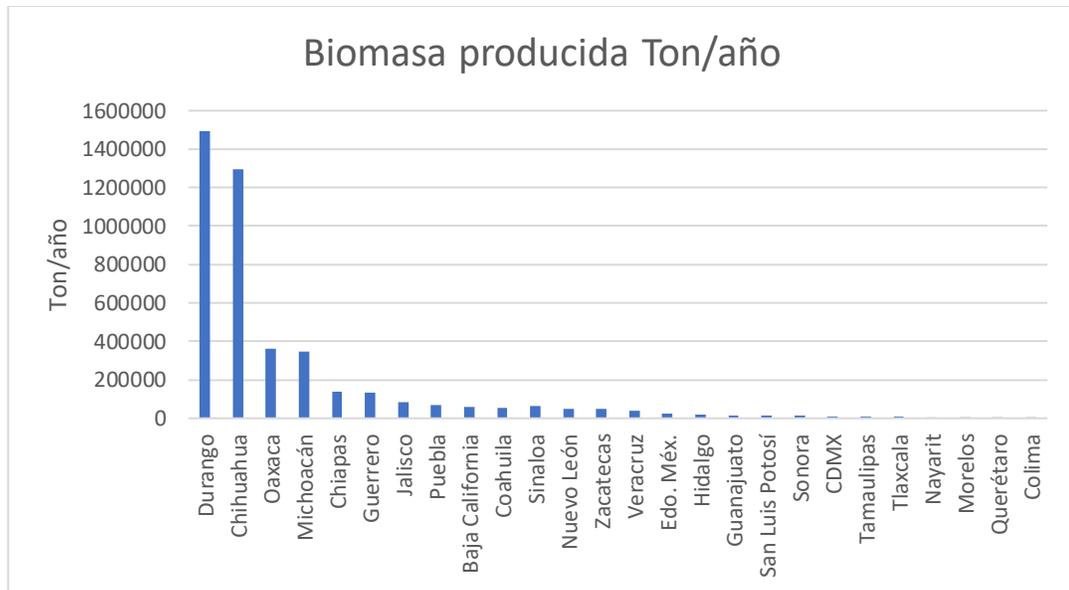


Figura 5.5: Producción de biomasa de bosque de pino por estado a 5Km de carretera. (elaboración propia).

c) Bosque mixto

De bosque mixto, de generaron 10120726 toneladas al año, en la Figura 5.6 describe la magnitud de este tipo de biomasa por estado. Chihuahua (23%), Oaxaca (15%) y Durango (14%) lideran la producción de este tipo de biomasa.

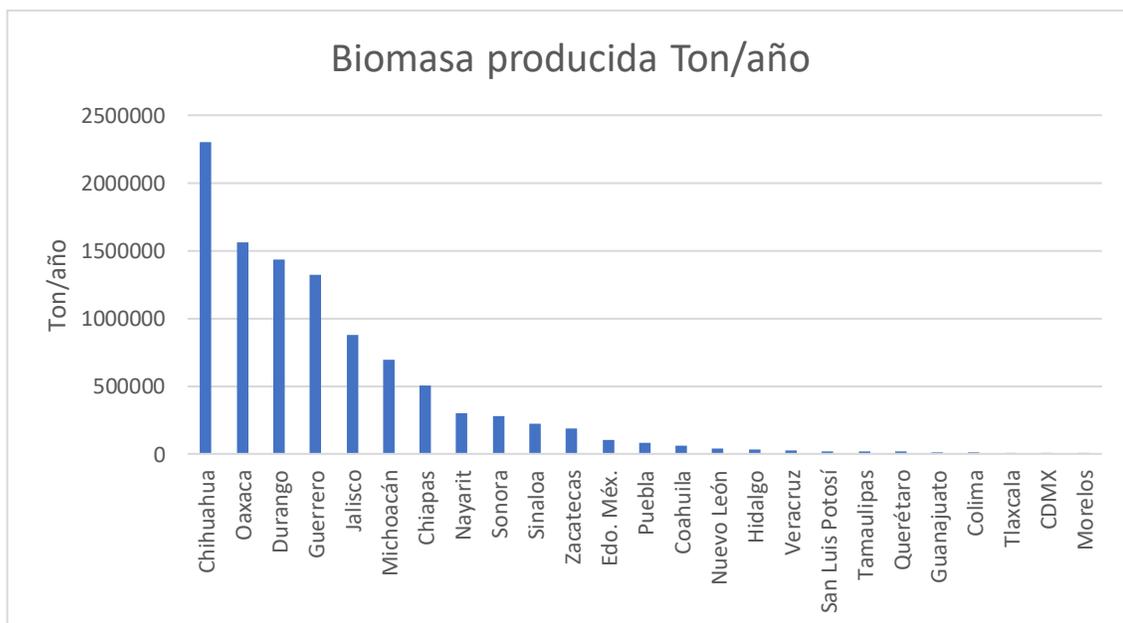


Figura 5.6: Producción de biomasa de bosque mixto por estado a 5 km de carretera. (elaboración propia).

El bosque de encino es el principal productor de biomasa, seguido del bosque mixto y por último el bosque de pino al igual que en la clasificación de bosques a 3km de carreteras.

En el bosque de encino de las 32 entidades federativas 29 estados cuentan con esta biomasa; los estados que mayor generación tienen son Chihuahua, Sonora, Jalisco, Durango, Guerrero y Oaxaca; estos proveen el 72% de la biomasa de dicho bosque.

Para el bosque de pino en la República Mexicana solo 26 estados generan dicha biomasa; Durango, Chihuahua, Oaxaca y Michoacán aportan el 80% de la biomasa generada a nivel nacional.

El bosque mixto es generado por 25 de las 32 entidades federativas donde Chihuahua, Oaxaca, Durango, Guerrero y Jalisco aportan el 74% de la biomasa.

Estados como Chihuahua, Durango y Oaxaca cuentan con una buena generación de los 3 tipos de bosque, en ellos se genera el 49% de la biomasa forestal del apartado de tala sustentable a 5 km de carreteras.

El total la tala sustentable por medio de la generación de biomasa de los bosques a 3 y 5 km de carreteras serán 46004621 toneladas al año mismas que podrán ser aprovechadas energéticamente.

En resumen, los datos anteriormente expuestos permiten proponer que los estados de Chihuahua, Durango y Oaxaca cuentan con un potencial energético prometedor para su uso ya que proveen el 48% de la biomasa generada por los bosques a 3 y 5 km de carreteras.

5.1.3 Resultados de la biomasa proveniente del aserrío

Los resultados de la biomasa proveniente del aserrío son los siguientes:

En la República Mexicana se tiene una cantidad de 728846 toneladas generadas de aserrín de las cuales el 76% proviene del aprovechamiento de árboles de coníferas, el 16% árboles de hojosas y el 8% de árboles tropicales (Figura 5.7) especies descritas en el Capítulo 2.

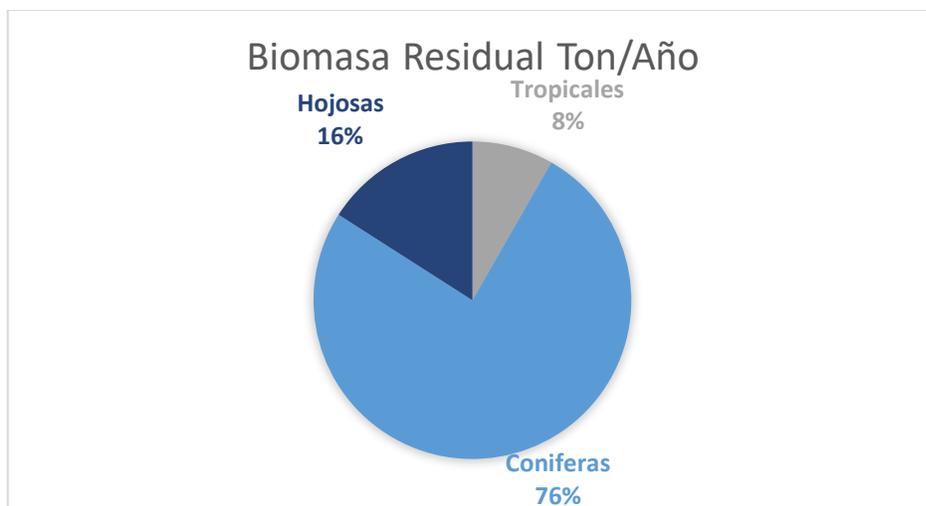


Figura 5.7: Distribución de la biomasa de aserradero. (elaboración propia)

Se presentan en la Tabla 5.3 los datos recopilados de la generación por estado de la biomasa producida, así como su tipo.

Tabla 5.3: Cantidad de biomasa producida la división de residuos forestales de aserrío (elaboración propia).

Estado	Tipo de biomasa residual	Cantidad de biomasa residual Ton/Año
Baja California	Coníferas	264
Campeche	Tropicales	80
Chiapas	Coníferas	45
Chihuahua	Coníferas	175858
	Hojosas	9278
Coahuila	Coníferas	5
CDMX	Coníferas	19
Durango	Coníferas	214505
	Hojosas	27545
	Tropicales	40
Edo. Méx	Coníferas	15602
	Hojosas	3605
	Tropicales	425
Guanajuato	Coníferas	107
	Hojosas	38
Guerrero	Coníferas	13696
	Tropicales	58
Hidalgo	Coníferas	9995
	Hojosas	15488
	Tropicales	10
Jalisco	Coníferas	27929

	Hojosas	3561
	Tropicales	1277
Michoacán	Coníferas	816
Morelos	Coníferas	26
	Hojosas	62
	Tropicales	20
Nayarit	Coníferas	2496
	Hojosas	26
	Tropicales	204
Nuevo León	Coníferas	421
	Tropicales	412
Oaxaca	Coníferas	118935
	Hojosas	15370
	Tropicales	1035
Puebla	Coníferas	50
Querétaro	Coníferas	2871
	Hojosas	52
	Tropicales	47
Quintana Roo	Tropicales	4901
San Luis Potosí	Coníferas	49
	Hojosas	79
	Tropicales	3
Sinaloa	Coníferas	4608
	Hojosas	45
	Tropicales	1038
Sonora	Coníferas	2116
	Hojosas	40385
	Tropicales	3
Tabasco	Tropicales	18492
Tamaulipas	Coníferas	1614
	Hojosas	15
	Tropicales	77
Tlaxcala	Coníferas	3408
	Hojosas	307
	Tropicales	326
Veracruz	Hojosas	232
	Tropicales	20
Yucatán	Tropicales	30141
Zacatecas	Coníferas	1235
	Hojosas	118

La biomasa total de los residuos forestales de aserrío es 771485 toneladas al año, se genera mayormente la biomasa que proviene del aserradero de árboles de coníferas con 596670 ton/año, seguido por el aserradero de árboles de hojosas con 116207 ton/año y al final el de los árboles tropicales con 58609 toneladas generadas anualmente.

La biomasa proveniente de aserraderos de árboles de coníferas solo es producida por los estados Durango con 214505 ton/año, Chihuahua con 175857 ton/año y Oaxaca con 118936 toneladas al año.

Los residuos del aserradero de árboles de hojosas se genera mayor parte de la biomasa en Sonora con 40385 toneladas al año, Durango con 27545 toneladas al año e Hidalgo con 15788 toneladas al año.

Para el aserradero de árboles tropicales los residuos de biomasa son generados por Yucatán con 955 toneladas al año, Tabasco con 18492 toneladas al año y Quintana Roo con 4901 toneladas al año.

A continuación, se muestran los resultados para cada tipo de fuente de biomasa:

a) Aserradero de coníferas

Dentro de la industria maderera los 3 principales generadores son: Durango (36%), Chihuahua (29%) y Oaxaca (20%). La Figura 5.8 describe la cantidad de biomasa al año generada por estado.

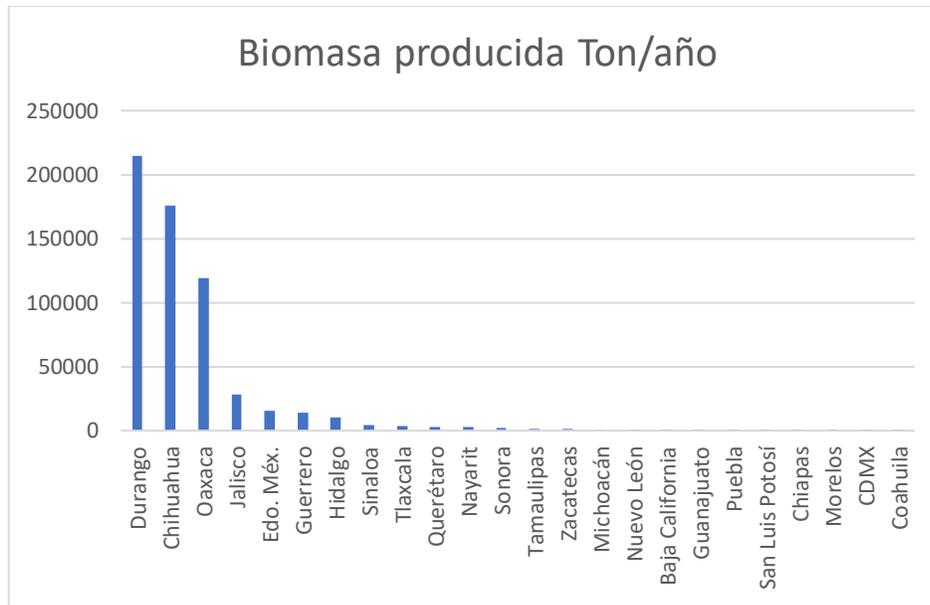


Figura 5.8: Biomasa producida Ton/año por el aserradero de coníferas (elaboración propia).

b) Aserradero de hojosas

En la Figura 5.9 se puede observar cantidad de aserradero proveniente de hojosas generado por estado, Sonora (34.75%), Durango (23.7%), Hidalgo (13.33%) y Oaxaca (13.23%) brindan la mayor producción anual de esta biomasa.

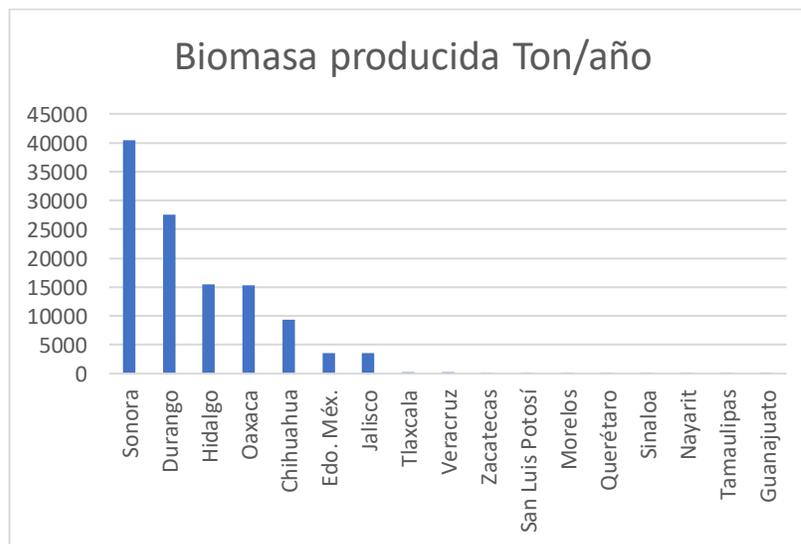


Figura 5.9: Biomasa producida Ton/año por el aserradero de hojosas (elaboración propia).

c) Aserradero de tropicales

Las toneladas de aserradero de los árboles tropicales por los estados aplicables esta descrito por la Figura 5.10, debido a las diversas cualidades climáticas de la República

Mexicana la mayor parte de la biomasa producida será de por parte de los países del sureste, Yucatán brinda el 51.4% de la generación mientras Tabasco genera el 31.55%, en menor cantidad, pero igual de importante Quintana Roo aporta el 8.36%.

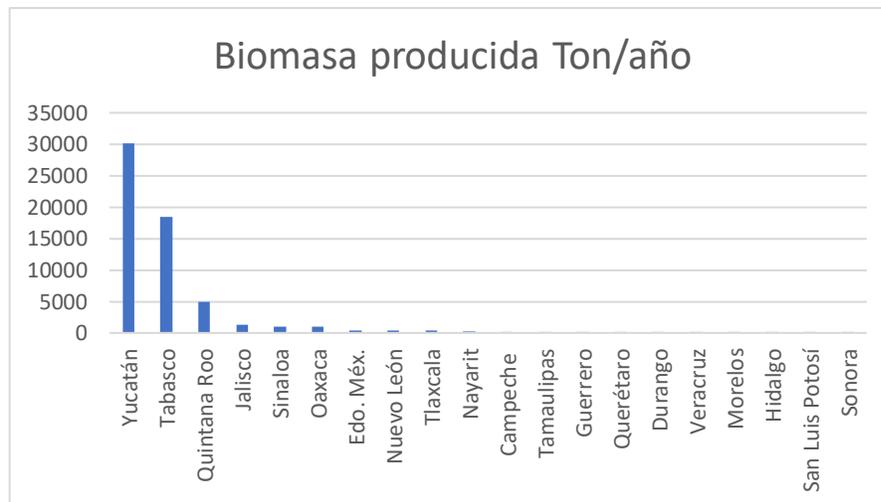


Figura 5.10: Biomasa producida Ton/año por el aserradero de Tropicales (elaboración propia).

La biomasa residual que se genera en mayor parte es la de los árboles de coníferas, seguido por el de los árboles de hojosas; por último, se encuentra el residuo de los árboles tropicales.

La biomasa proveniente de aserraderos de árboles de coníferas solo es producida en 24 de las 32 entidades federativas; los estados que mayor generación tienen son Durango, Chihuahua y Oaxaca; estos proveen el 85.36% de la biomasa.

Los residuos del aserradero de árboles de hojosas en la República Mexicana provienen de solo 17 estados, se genera mayor parte de la biomasa en Sonora, Durango, Hidalgo, Oaxaca y Chihuahua los cuales aportan el 85% de la biomasa generada.

Para el aserradero de árboles tropicales los residuos de biomasa son generados por 20 de las 32 entidades federativas donde Yucatán, Tabasco y Quintana Roo aportan el 91.34%

Estados como Chihuahua, Durango y Oaxaca cuentan con una buena generación de residuos del aserradero de árboles de coníferas y hojosas, estos 3 estados aportan el 78.76% de la biomasa total. El aprovechamiento de los árboles tropicales solo es posible en la zona sureste de la República Mexicana es por lo que Yucatán, Tabasco y Quintana Roo aportan el 91.34% de esta biomasa residual.

Durango, Oaxaca y Sonora producen los 3 tipos de aserrío de madera, ellos proveen el 54.74% de la biomasa de aserraderos.

Si se toma en cuenta la biomasa generada por la tala sustentable de 46004622 Ton/año, (de la cual 21089597 toneladas al año generada por los bosques a 3 km de carreteras y 24915025 toneladas al año generada por los bosques a 5 km) como el 100% de la biomasa forestal aprovechable, el aserradero cumpliría con el 1.6%, lo que corresponde a 728846 Ton/año. Al implementar programas de aprovechamiento in situ de los residuos forestales se evitaría que estos acabaran en rellenos sanitarios o expuestos a degradación natural convirtiéndose en una fuente de contaminación atmosférica, además de convertirse en un recurso renovable capaz de ser implementado en los procesos de generación de energía eléctrica o térmica volviendo más rentable el proceso, tal es el caso del Grupo SEZARIC en el estado de Durango quienes aprovechan la corteza de pino como fuente de energía calorífica dentro de sus procesos, evitando el uso de fuentes fósiles y llegando a una independencia energética.

5.2 Potencial Energético

Para el cálculo del potencial energético que se puede obtener de la biomasa forestal se tomara en cuenta el ciclo Rankine ya que la SENER considera para su aprovechamiento inmediato en la generación de energía eléctrica.

El criterio de la potencia de generación se basa en la cantidad de energía en MW se podrá generar a partir de los TJ/año generados por estado, siendo de mediana potencia si se encuentran en el rango de 0.5 a 5 MW y alta potencia de 5 a 50 MW.

Según los datos reportados por el ANBIO para el año 2014, respecto a las características energéticas de la tala sustentable y los residuos de la industria forestal se presenta la Tabla 5.4 la cual presenta los valores promedio del poder calorífico inferior según bibliografía para las especies de bosques nativo y las variedades de madera de aserraderos.

Tabla 5.4: Poder calorífico promedio presentado por el ANBIO (elaboración propia).

Tipo	Poder calorífico inferior (MJ/Kg)
Tropicales	17.30
Coníferas	19.55
Hojosas	17.70

Encino	18.83
Pino	18.88
Mixto	18.83

El potencial energético al igual que los datos de la biomasa generada mostrados en el apartado anterior fueron obtenidos de la base de datos del ANBIO, además se consideraron las eficiencias de los elementos del ciclo Rankine el 80%, 95% y 40% para la caldera, moto-generador y turbina respectivamente las cuales son el promedio de los modelos comerciales.

A continuación, se presentan las tablas con el potencial energético por estado, así como su escala de potencia de generación de energía eléctrica, la tabla 5.5 para la biomasa del bosque de encino, tabla 5.6 para el bosque de pino y tabla 5.7 para el bosque mixto a 3km de carretera; así mismo los resultados de las tablas 5.8, 5.9 y 5.10 corresponden a los bosques de encino, pino y mixto respectivamente encontrados a 5 km de carretera.

Tabla 5.5: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de encino a 3 km de carreteras por estado (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/Año	MW	Escala
Aguascalientes	381	12	Mediana
Baja California Sur	59	2	Mediana
Campeche	271	9	Mediana
Chiapas	3182	101	Alta
Chihuahua	26059	826	Alta
Coahuila	880	28	Alta
Colima	535	17	Alta
Durango	13513	429	Alta
Edo. Méx	2418	77	Alta
Guanajuato	3034	96	Alta
Guerrero	14994	475	Alta
Hidalgo	1343	43	Alta
Jalisco	19819	628	Alta
Michoacán	7524	239	Alta
Morelos	143	5	Mediana
Nayarit	3425	109	Alta
Nuevo León	519	16	Alta
Oaxaca	13493	428	Alta
Puebla	2337	74	Alta
Querétaro	743	24	Alta

San Luis Potosí	4588	145	Alta
Sinaloa	10102	320	Alta
Sonora	26318	835	Alta
Tabasco	591	19	Alta
Tamaulipas	2447	78	Alta
Tlaxcala	229	7	Mediana
Veracruz	1106	35	Alta
Zacatecas	6930	220	Alta

Tabla 5.6: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de pino a 3 km de carreteras por estado (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/Año	MW	Potencia
Baja California	967	9	Alta
CDMX	181	2	Mediana
Chiapas	2338	23	Alta
Chihuahua	22090	213	Alta
Coahuila	821	8	Alta
Durango	24543	237	Alta
Edo. Méx.	378	4	Mediana
Guanajuato	171	2	Mediana
Guerrero	2137	21	Alta
Hidalgo	316	3	Mediana
Jalisco	1446	14	Alta
Michoacán	6036	58	Alta
Nayarit	88	1	Mediana
Nuevo León	764	7	Alta
Oaxaca	5771	56	Alta
Puebla	1163	11	Alta
San Luis Potosí	129	1	Mediana
Sinaloa	899	9	Alta
Sonora	214	2	Mediana
Tamaulipas	147	1	Mediana
Tlaxcala	148	1	Mediana
Veracruz	774	7	Alta
Zacatecas	655	6	Alta

Tabla 5.7: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque mixto a 3 km de carreteras por estado (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/año	MW	Escala
CDMX	59	1	Mediana
Chiapas	8641	83	Alta
Chihuahua	35452	342	Alta
Coahuila	799	8	Alta
Colima	100	1	Mediana
Durango	20781	200	Alta
Edo. Méx.	1894	18	Alta
Guanajuato	182	2	Mediana
Guerrero	20556	198	Alta
Hidalgo	612	6	Alta
Jalisco	14354	138	Alta
Michoacán	12075	116	Alta
Nayarit	4472	43	Alta
Nuevo León	754	7	Alta
Oaxaca	23411	226	Alta
Puebla	1489	14	Alta
Querétaro	275	3	Mediana
San Luis Potosí	302	3	Mediana
Sinaloa	3194	31	Alta
Sonora	4528	44	Alta
Tamaulipas	281	3	Mediana
Tlaxcala	104	1	Mediana
Veracruz	479	5	Mediana
Zacatecas	2779	27	Alta

Por la cantidad del potencial energético que brindan los bosques de encino que es 166983 TJ/año, que equivalen a 5297 MW Aguascalientes, Baja California Sur, Campeche y Morelos podrán generar 35 MW, y el resto de las entidades federativas mostradas en la Tabla 5.5 generarían 5262 MW.

El potencial energético del bosque de pino corresponde a 72176 TJ/año que equivalen a 696 MW, los estados CDMX, Edo. Méx., Guanajuato, Hidalgo, Nayarit, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas y Tlaxcala generarían 17 MW, los estados restantes presentados en la Tabla 5.6 generarían 679 MW.

Para el potencial energético del bosque mixto que es un total de 157573 TJ/año que equivalen a 1520 MW, la CDMX, Colima, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí,

Tamaulipas Tlaxcala y Veracruz generarían 19 MW, el resto de los estados presentados en la Tabla 5.7, podrían generar 1501 MW.

Tabla 5.8: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de encino a 5 km de carreteras por estado (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/Año	MW	Potencia
Aguascalientes	389	12	Mediana
Baja California Sur	82	3	Mediana
Campeche	271	9	Mediana
Chiapas	3467	110	Alta
Chihuahua	35180	1116	Alta
Coahuila	994	32	Alta
Colima	768	24	Alta
Durango	18770	595	Alta
Edo. Méx.	2509	80	Alta
Guanajuato	3263	103	Alta
Guerrero	17906	568	Alta
Hidalgo	1538	49	Alta
Jalisco	21812	692	Alta
Michoacán	8271	262	Alta
Morelos	146	5	Mediana
Nayarit	4398	139	Alta
Nuevo León	621	20	Alta
Oaxaca	16224	514	Alta
Puebla	2837	90	Alta
Querétaro	1635	52	Alta
San Luis Potosí	5285	168	Alta
Sinaloa	12979	412	Alta
Sonora	31609	1002	Alta
Tabasco	592	19	Alta
Tamaulipas	2958	94	Alta
Tlaxcala	229	7	Mediana
Veracruz	1116	35	Alta

Tabla 5.9: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque de pino a 5 km de carreteras por estado (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/año	MW	Potencia
Baja California	1116	11	Alta
CDMX	213	2	Mediana
Chiapas	2569	25	Alta
Chihuahua	24503	236	Alta
Coahuila	1000	10	Alta

Durango	28239	272	Alta
Edo. Méx.	418	4	Mediana
Guanajuato	273	3	Mediana
Guerrero	2496	24	Alta
Hidalgo	350	3	Mediana
Jalisco	1627	16	Alta
Michoacán	6551	63	Alta
Nayarit	125	1	Mediana
Nuevo León	939	9	Alta
Oaxaca	6872	66	Alta
Puebla	1314	13	Alta
San Luis Potosí	233	2	Mediana
Sinaloa	1190	11	Alta
Sonora	229	2	Mediana
Tamaulipas	199	2	Mediana
Tlaxcala	150	1	Mediana
Veracruz	781	8	Alta
Zacatecas	937	9	Alta

Tabla 5.10: Potencial energético y escala de potencia de generación del bosque mixto a 5 km de carreteras por estado (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/Año	MW	Potencia
CDMX	59	1	Mediana
Chiapas	9551	92	Alta
Chihuahua	43268	417	Alta
Coahuila	1092	11	Alta
Colima	154	1	Mediana
Durango	27043	261	Alta
Edo. Méx.	1931	19	Alta
Guanajuato	223	2	Mediana
Guerrero	24836	239	Alta
Hidalgo	622	6	Alta
Jalisco	16474	159	Alta
Michoacán	13108	126	Alta
Nayarit	5714	55	Alta
Nuevo León	806	8	Alta
Oaxaca	29439	284	Alta
Puebla	1528	15	Alta
Querétaro	306	3	Mediana
San Luis Potosí	392	4	Mediana
Sinaloa	4253	41	Alta

Sonora	5282	51	Alta
Tamaulipas	370	4	Mediana
Tlaxcala	105	1	Mediana
Veracruz	480	5	Mediana
Zacatecas	3500	34	Alta

Por la cantidad del potencial energético que brindan los bosques de encino a 5 km de carreteras es 195849 TJ/año, que equivalen a 6212 MW Aguascalientes, Baja California Sur, Campeche, Morelos y Tlaxcala podrán generar 36 MW, y el resto de las entidades federativas mostradas en la Tabla 5.8 generarían 6176 MW.

El potencial energético del bosque de pino resulta ser de 82324 TJ/año, que equivalen a 793 MW del cual la CDMX, el Edo. Méx., Guanajuato, Hidalgo, Nayarit, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas y Tlaxcala generarían 20 MW, los estados restantes presentados en la Tabla 5.9 generarían 773 MW.

Para el potencial energético del bosque mixto de 190536 TJ/año que equivalen a 1839 MW, la CDMX, Colima, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas Tlaxcala y Veracruz generarían 21 MW, el resto de los estados presentados en la Tabla 5.10 presentaran una generación de 1818 MW.

Para los residuos forestales se obtuvo el potencial energético, así como su potencia de generación de la Tabla 5.11 para las hojosas, Tabla 5.12 para las coníferas y Tabla 5.13 para los tropicales.

Tabla 5.11: Potencial energético y escala de potencia de generación del aserrín de hojosas (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/año	MW	Potencia
Chihuahua	164	2	Mediana
Durango	488	5	Mediana
Edo. Méx.	64	1	Mediana
Hidalgo	274	3	Mediana
Jalisco	63	1	Mediana
Oaxaca	272	3	Mediana
Sonora	715	7	Alta

Tabla 5.12: Potencial energético y escala de potencia de generación del aserrín de coníferas (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/año	MW	Potencia
Chihuahua	3438	33	Alta
Durango	4193	40	Alta

Edo. Méx.	305	3	Mediana
Guerrero	268	3	Mediana
Hidalgo	195	2	Mediana
Jalisco	546	5	Alta
Oaxaca	2325	22	Alta
Querétaro	56	1	Mediana
Sinaloa	90	1	Mediana

Tabla 5.13: Potencial energético y escala de potencia de generación del aserrín de Tropicales (elaboración propia).

Estado	Potencial energético TJ/año	MW	Potencia
Quintana Roo	85	1	Mediana
Tabasco	320	3	Mediana
Yucatán	521	5	Alta

Con el potencial energético proveniente de los aserraderos de árboles de hojosas 2040 TJ/año, que equivalen a 22 MW, solo el estado de Sonora tendría una alta generación de potencia con 7 MW, Chihuahua, Durango, Edo. Méx., Hidalgo, Jalisco, Oaxaca tendrían una generación mediana de potencia con 15 MW.

El potencial proveniente de los aserraderos de árboles de coníferas es 11416 TJ/año, que equivalen a 110 MW, del cual los estados Chihuahua, Durango, Jalisco y Oaxaca tendrían una alta potencia generada con 100 MW, el Edo. Méx, Guerrero, Hidalgo, Querétaro y Sinaloa tendrían oportunidad de generar una mediana potencia con 10 MW.

Con 926 TJ/año, equivalentes a 9 MW generados por el aserradero de árboles tropicales, el estado de Yucatán sería el estado capaz de generar alta potencia con 5 MW, Tabasco y Quintana Roo mediana potencia con 4 MW.

Con los datos anteriormente expuestos se llegó a la conclusión de que en México cuenta con un gran potencial energético de 879823 TJ/año que equivalen a 16353 MW de los cuales, el 45% puede ser generado por los bosques a 3km de carreteras y el 53% por los bosques a 5 km de carreteras, los aserraderos brindarían el 2% al año del cual el 79% es generado por las coníferas, el 14% por los árboles de hojosas y el 7% por los tropicales como se puede apreciar en la figura 5.11.

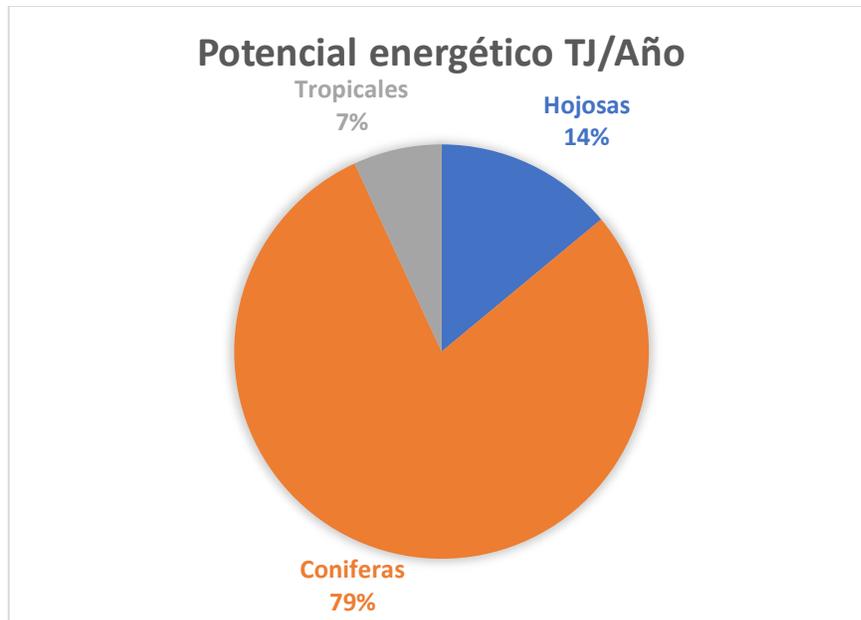


Figura 5.11: Porcentajes del potencial energético de los aserraderos de coníferas, hojasas y tropicales (elaboración propia).

Según los datos de la PRODESEN en el año 2014 se tenía una capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional era de 65452 de MW de los cuales 27.5% provenía de fuentes renovables, si se incluyeran los 16498 MW posibles del uso de biomasa forestal se contribuiría con un 25% de la generación, aumentando así a un 53% la producción de energía eléctrica por fuentes renovables, contribuyendo así con la meta establecida por el gobierno federal para la generación de electricidad con fuentes renovables de energía.

Las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 muestran la potencia anual que se tendría instalada en los estados de la republica si se hiciera uso del bosque de encino, bosque de pino y bosque mixto respectivamente a 3km de carreteras para la generación de energía eléctrica mediante el ciclo Rankine.



Figura 5.12: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de encino a 3 km (elaboración propia).

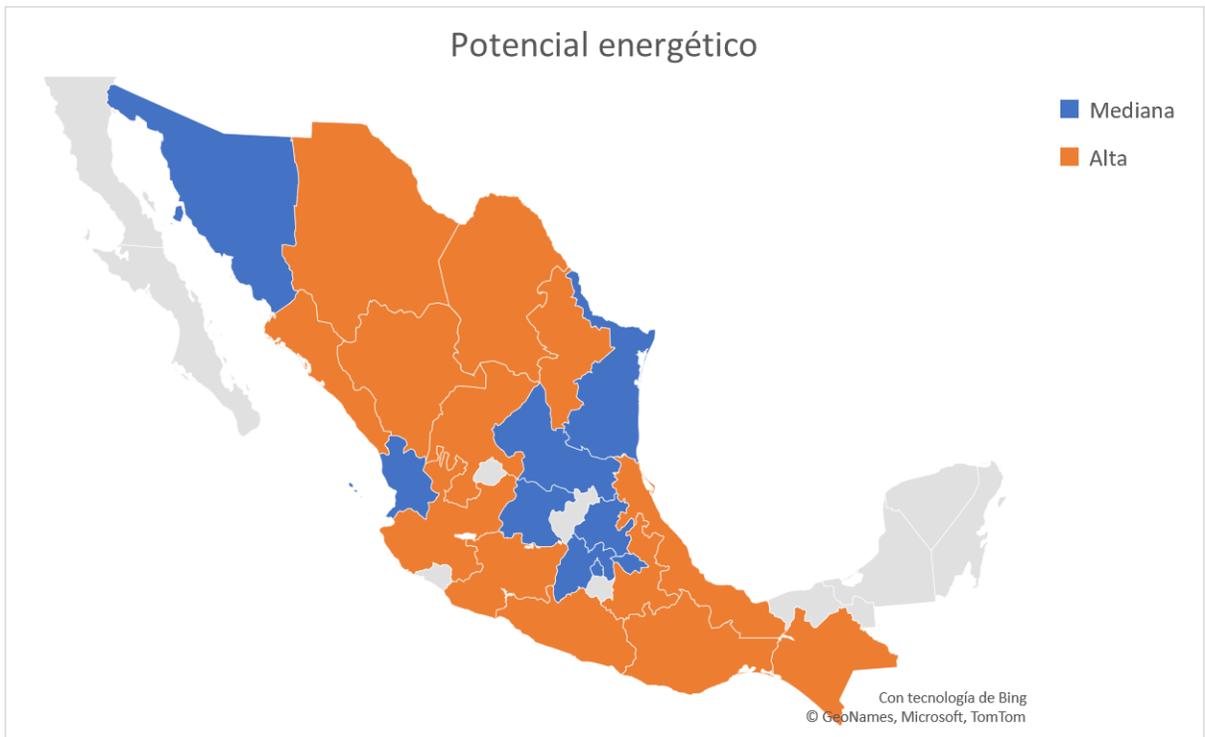


Figura 5.13: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de pino a 3 km (elaboración propia).

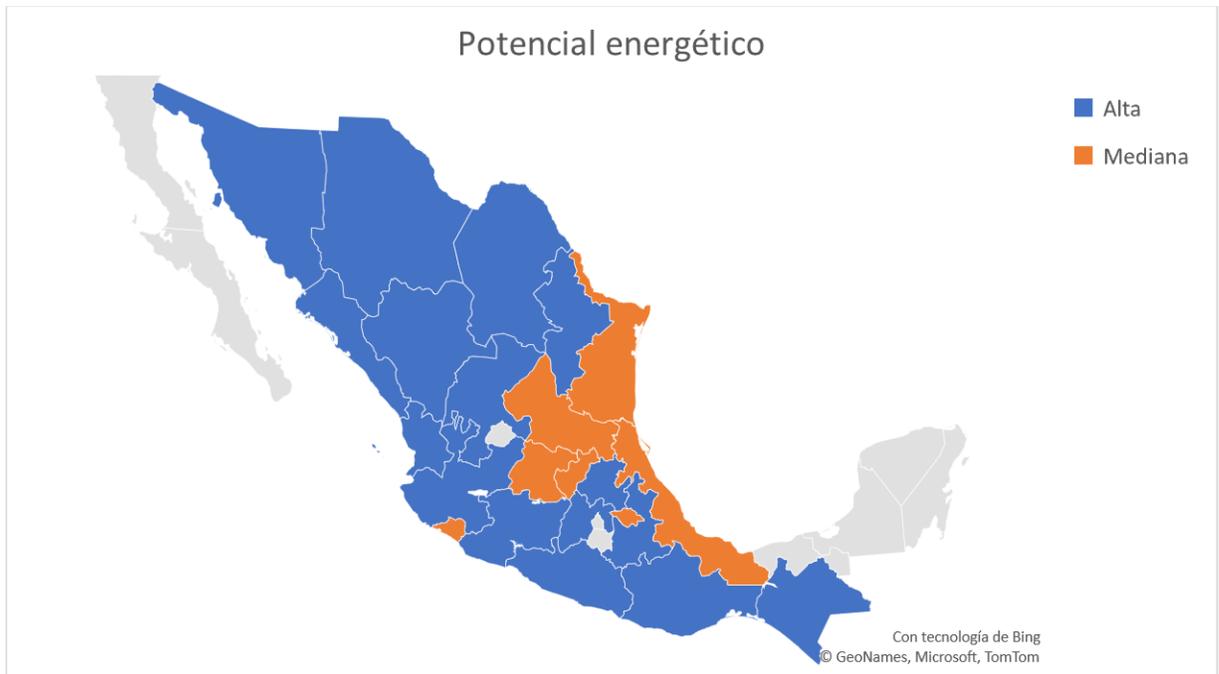


Figura 5.14: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque Mixto a 3 km (elaboración propia).

Las figuras 5.15, 5.16 y 5.17 muestran la potencia anual que se tendría instalada en los Estados de la República si se hiciera uso del bosque de encino, bosque de pino y bosque mixto respectivamente a 5 km de carreteras para la generación de energía eléctrica mediante el ciclo Rankine.



Figura 5.15: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de encino a 5 km (elaboración propia).

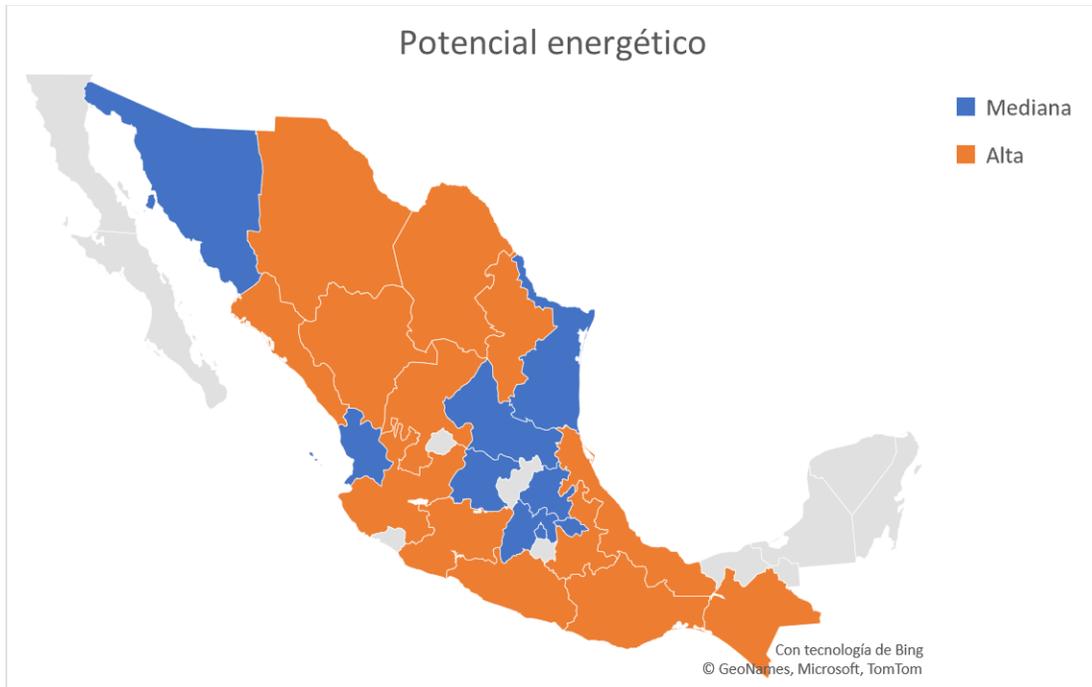


Figura 5.16: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque de pino a 5 km (elaboración propia).

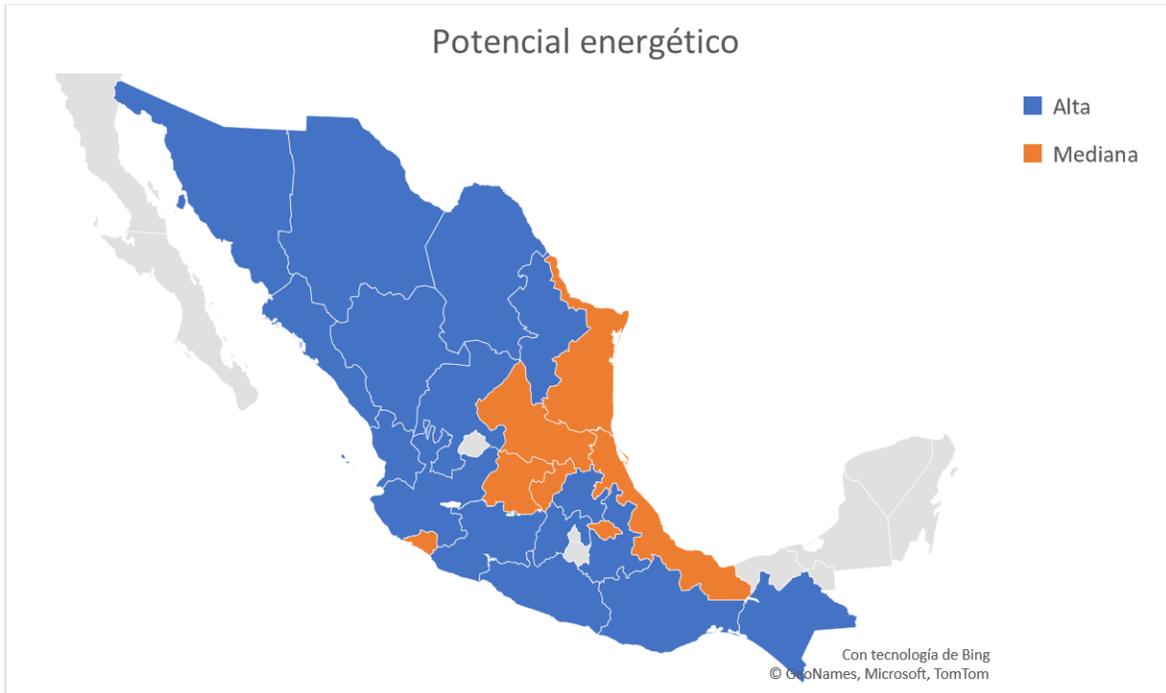


Figura 5.17: Potencial energético en la República Mexicana mediante el bosque mixto a 5 km (elaboración propia).

5.3 Emisiones de CO₂

Otro punto para considerar en cuanto a la generación de energía es la cantidad de gases de efecto invernadero que se emitirán a la atmosfera.

Considerando la cantidad de TJ/año que se generan por la tala sustentable y los residuos de biomasa forestal, mediante la multiplicación de los TJ/año por un factor de conversión de 0.2778 (factor aritmético en la categoría de la energía mediante el cual las unidades J son convertidas a Wh, ya que 1J es igual a 0.000277777777777778 Wh; por tanto 1TJ será 0.277777777777778 GWh) se obtendrán los GWh/año, la Tabla 5.14 describe la cantidad de GWh/año generados por los bosques a 3 y 5 km de carreteras.

Tabla 5.14: GWh/año generados por la biomasa de la tala sustentable a 3 y 5 km de carreteras (elaboración propia).

Tipo de Biomasa	TJ/año	GWh/año
Bosque de encino a 3 km	167049	46423
Bosque de encino a 5 km	195918	54446
Bosque de pino a 3 km	72209	20067
Bosque de pino a 5km	82362	22888
Bosque mixto a 3 km	157608	43799
Bosque mixto a 5 km	190568	52959

La SEMARNAT indica que multiplicar por el factor de conversión 0.454 por cada GWh/año indicara la cantidad en Mt/año de emisiones evitables de CO₂, multiplicando los GWh/año generados por los bosques de la tala sustentable por el factor que indica la SEMARNAT se obtendrán la cantidad de emisiones evitables de CO₂.

En la Tabla 5.15 se describe la cantidad de emisiones de CO₂ evitables si se empleara en su totalidad los bosques de la tala sustentable a 3 y 5 km de carreteras.

Tabla 5.15: Emisiones evitables por el uso de biomasa de la tala sustentable a 3 y 5 km de carreteras (elaboración propia).

Tipo de Biomasa	Emisiones evitables Mt/año
Bosque de encino a 3 km	21076
Bosque de encino a 5 km	24718
Bosque de pino a 3 km	9110
Bosque de pino a 5km	10391
Bosque mixto a 3 km	19885
Bosque mixto a 5 km	24043

El total de emisiones evitables de CO₂ por los bosques de la tala sustentable serán de 111078 Mt/año, los bosques de encino y mixto a 3 y 5 km de carreteras evitarían emitir 82% de éstas.

Al igual que para la tala sustentable, mediante la multiplicación antes descrita se convertirá el potencial energético de TJ/año a GWh/año para obtener las emisiones de CO₂ evitables. En la Tabla 5.16 se describe la cantidad de emisiones de CO₂ evitables si se empleara en su totalidad la biomasa proveniente de los aserraderos de árboles de coníferas, hojosas y tropicales.

Tabla 5.16: Emisiones evitables por el uso de biomasa de aserraderos (elaboración propia).

Tipo de biomasa	TJ/año	GWh/año	Emisiones evitables Mt/año
Árboles de coníferas	11639	3234	1468
Árboles de hojosas	2057	572	259
Árboles de tropicales	1014	282	128

El total de emisiones evitables de CO₂ por los aserraderos de México será de 1855 Mt/año, del cual el 79% corresponde a los aserraderos que aprovechan los árboles de coníferas.

A manera de conclusión, en México las emisiones netas, al incluir las absorciones por permanencias, fueron de 492,307 Mt de CO₂e, si se emplea completamente la biomasa forestal tanto de la tala sustentable como la biomasa residual de los aserraderos 111080 Mt/año de CO₂ serán evitados lo que correspondería al 23% del total generado al año.

5.4 Propuesta de especificaciones técnicas para el uso de biomasa forestal

Para el aprovechamiento de la biomasa forestal se propone monitorear las propiedades energéticas de la biomasa como lo son:

- El poder calorífico ya que es el encargado de entregar la energía calorífica mediante una reacción exotérmica, el rango propuesto para el poder calorífico que brinde un rendimiento óptimo deberá estar dentro de 17KJ/Kg a 20KJ/K.
- El contenido de humedad, al estar relacionado con la cantidad de energía que se puede aprovechar de la biomasa de acuerdo con los datos recopilados el contenido de humedad máximo que puede contener la biomasa forestal para ser quemada es 70% (Lima Rojas, 2013) por lo que si los datos experimentales de las muestras de biomasa analizadas exceden este porcentaje deberá de procesada por un tratamiento previo de secado para no disminuir el poder calorífico.
- Los elementos como el carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno componen la categoría de compuestos orgánicos volátiles, estos son liberados con facilidad mediante la reacción de combustión, entre mayor porcentaje tenga la biomasa resultara de más fácil combustión, reduciendo la temperatura de operación. Para combustibles de madera el valor típico de compuestos orgánicos volátiles es alrededor del 82%.
- El contenido de cenizas es una variable que se debe monitorear, pues si el porcentaje de estas es alto indica que existen compuestos inorgánicos incapaces de volatilizarse, en consecuencia, produciéndose en mayor cantidad o reaccionando en la combustión generando gases contaminantes. Las cantidades típicas de ceniza son 1-4% del combustible seco.

Además, es propuesto seguir con los valores típicos de tamaño de partícula que establece la norma ISO 17225-1 para los combustibles sólidos, de presentarse tamaños inadecuados se deberá llevar a cabo un pretratamiento. La tabla 5.17 compila los tamaños típicos para la biomasa forestal.

Tabla 5.17: Principales formas comerciales de biocombustibles sólidos adaptación de la tabla 2 de la Norma ISO 17225-1.

Nombre del combustible	Tamaño de partícula
Árbol entero	> 500mm
Virutas de madera	5 mm a 100mm
Tronco	> 100 cm
Astillas	50 cm a 100 cm
Leña	5 cm a 100 cm
Aserrín	1 mm a 5 mm
Briquetas	$\varnothing > 25\text{mm}$
Pellets	$\varnothing \leq 25\text{mm}$

5.5 Propuesta de tecnología para el aprovechamiento de los residuos de madera forestal

La cantidad de biomasa generada resulta ser un campo de oportunidad para la generación de energía eléctrica por medio de fuentes limpias, a pesar de que en la república mexicana se cuenta con instalación suficiente para realizar una conversión de energía mediante la combustión directa de la fuente energética para su posterior transformación por el ciclo Rankine, resulta de interés mejorar el proceso con el propósito de aumentar la eficiencia de generación.

Las tecnologías termoquímicas para el aprovechamiento de la biomasa resultan ser las más atractivas, de entre la combustión directa, la gasificación y pirolisis; es de interés para la autora la gasificación. La gasificación presenta ventajas frente a la combustión directa al igual que con la pirolisis ya que como se ha mencionado en el capítulo 4 mediante la gasificación se obtiene gas de síntesis el cual puede ser empleado para producir energía eléctrica mediante un moto generador, inclusive ser parte de celdas de combustible o ser transformado en hidrógeno.

La propuesta para el aprovechamiento de la biomasa forestal es el uso de un gasificador de fuego doble, para así evitar el pretratamiento con oxígeno como agente carburante, el cual será instalado las zonas con mayor cantidad de biomasa producida por la tala sustentable y residuos forestales como los estados de Chihuahua, Durango y Oaxaca.

Las especificaciones técnicas del gasificador y el plan de trabajo se reservan a la implementación empírica de la propuesta.

Conclusiones

La República Mexicana es un territorio con condiciones geográficas y climáticas diversas que se benefician con el uso de energías renovables. De acuerdo a los datos recopilados por el ANBIO en el año 2014 se han determinado las cantidades de biomasa forestal que puede ser aprovechable energéticamente mediante la tala sustentable y la biomasa residual de los aserraderos, los bosques de encino a 3 km proveen 8895581 toneladas al año, de las cuales Durango, Chihuahua y Michoacán son los estados que más biomasa generan, por el bosque de pino a 3 km se registran 3823748 toneladas al año, Durango, Chihuahua y Michoacán son los estados que más biomasa generan, el bosque mixto a 3 km genera 8370268 toneladas al año, Chihuahua, Oaxaca y Durango son los estados que cuentan con mayor generación. Se registró una producción total de 10432895 toneladas al año de bosque de encino 5 km, Chihuahua, Sonora y Jalisco son los 3 estados que mayor cantidad de biomasa generan; de bosque de pino a 5 km se generaron 4361404 toneladas al año, Durango, Chihuahua y Oaxaca son los 3 principales productores de esta biomasa, en el bosque mixto a 5 km, se generaron 10120726 toneladas al año, Chihuahua, Oaxaca y Durango lideran la producción de este tipo de biomasa.

Los estados de Chihuahua, Durango y Oaxaca cuentan con una buena producción de biomasa de los bosques de encino, pino y mixto a 3 y 5 km de carreteras, estos estados son a los que se les encuentra prometedoros para el aprovechamiento energético de la biomasa forestal.

Las emisiones de CO₂ que se evitarían enviar a la atmósfera por el aprovechamiento energético de la biomasa forestal, es de 111079 Mt/año, 19% generadas por el bosque de encino a 3 km, 22% por el bosque de encino a 5 km, 8% por el bosque de pino a 3 km, 9% por el bosque de pino a 5 km, 18% por el bosque mixto a 3 km, 22% por el bosque mixto a 5 km y 2% por los aserraderos. El uso de la biomasa forestal favorecería a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y a frenar el cambio climático, asistiendo a la Ley General de Cambio Climático, además se ayudaría a cumplir con el 35% de participación de las energías limpias para la generación de energía eléctrica para el año 2024.

Con la diversificación de la matriz energética en los sistemas de generación de energía eléctrica se conseguiría una mejor calidad de entrega hacia los sistemas de transmisión.

Los parámetros para considerar dentro del aprovechamiento de biomasa forestal son: Poder calorífico inferior, contenido de humedad, compuestos orgánicos volátiles, contenido de cenizas y el tamaño de partícula, ya que estos están ligados directamente a el desempeño que tendrá dentro de su transformación energética.

Las tecnologías termoquímicas para la transformación de biomasa sólida son las más atractivas, la gasificación presenta ventajas frente a la combustión directa, por cuestiones de manejo y falta de personal especializado también presenta ventajas frente a la pirólisis. Comparando los tipos de gasificadores, un gasificador de fuego doble se propone como la mejor opción para el aprovechamiento energético de biomasa sólida.

Se concluye que la biomasa forestal es una potencial fuente de energía ya que cuenta con las características energéticas necesarias para su aprovechamiento, se produce en grandes cantidades en estados como Chihuahua, Durango y Oaxaca donde podrían ser implementados para la generación de energía eléctrica, aportando a la diversificación de la matriz energética y a disminuir la emisión de CO₂ a la atmosfera. Además se sugiere para el aprovechamiento de la biomasa forestal en esos estados la instalación de una planta de gasificación con la capacidad necesaria para la transformación de la biomasa, contemplando los parámetros de calidad que anteriormente se mencionan.

Debido a la situación vivida por la pandemia del SARS COVID-19 esta investigación se realizó de manera teórica, los datos obtenidos de las bases de datos nacionales se ocuparon como referencia para dar un panorama de la situación energética nacional en el caso del aprovechamiento energético de los residuos forestales en México.

Bibliografía

- Acuña Carreño, C. (2014). *Biomasa: Evaluación de lignogranos de residuos madereros como recurso energético, caso proyecto La Gloria* (Tesis de doctorado, Universidad de Santander- UDES). Bucaramanga: Colombia.
- Aguirre, A. (2012) *Tipos de biomasa*. Grupo editorial striatum. <https://gstriatum.com/2013/02/13/tipos-de-biomasa-2/>.
- Arnabat, I. (2015, 20 de septiembre). Calderas de biomasa y pellets. Las ventajas de la calefacción más ecológica. [Blog]. Calor y frío. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/calderas/calderas-de-biomasa-ventajas-y-funcionamiento.html>.
- Ayala, Mendivil, N., Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Revista Madera y Bosques*, 24(Núm. esp.). doi:/10.21829/myb.2018.2401877.
- Barrera, J. C., Ramírez Contreras, N. E., García Núñez, J. A. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Palmas*, 39(4), 24-44.
- Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91, 87-102.
- Bueno Zarate, J. (1987). La madera como combustible. *Revista forestal de Perú*, 14 (2). 1-9.
- Cantos Macías, M. A., Quesada González, O., Ross Mesa, A., Brito Soubanell, A. L., Casanova Gómez, A. (2018). Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos. *Revista Cubana de química*, 30(3), 400-422.

- Carmona Cerda, R. J. (2015). *Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible*. (Tesis de doctorado, Universidad de Córdoba), Córdoba: España.
- Cengel, Y, A., Boles, M, A. (2012) *Termodinámica*. Mc Graw Hill.
- Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. (2012). *Biomasa, biocombustibles y Sostenibilidad. En Bloque I. Materias primas*. (4-65). España. Transbioma.
- COWI & INECC (2017). Catálogo de tecnología de biomasa a energía Informe final. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Demirbas, A. (2000). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Revista Energy Conversion and Management*, 42, 1357-1378.
- Domínguez Domínguez, M. P. (2015). *Pirólisis y gasificación de biomasa: Optimización del proceso de transformación energética mediante distintos sistemas de reacción*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid). Madrid: España.
- Estrada, C., Zapata Meneses, A. (2004). Gasificación De Biomasa Para Producción De Combustibles De Bajo Poder Calorífico Y Su Utilización En Generación De Potencia Y Calor. *Scientia Et Technica*, 2(25). doi:10.22517/23447214.7229.
- Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership EPA CHP. (2007). Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies. Estados Unidos de América
- Fonseca Prieto, F. V. (2013). *Pirólisis de los residuos lignocelulósicos del henequén para la obtención de bioaceite*. (Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.) Mérida: Yucatán.

- Hartmann, H. (2017). *Solid Biofuels, Fuels, and their characteristics. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. R.A. Meyers (ed.), Springer Science+Business Media LLC. doi:10.1007/978-1-4939-2493-6_245-3.
- Heras Celemín, M. (2008). Biomasa como recurso energético. En M. Ballesteros. (Ed), *Fuentes de energía para el futuro*. (125-140). España. Ministerio de Educación y Formación profesional.
- Herrera Culebro, J. D. (2018). Pirolisis de biomasa para la obtención de biocarbon y su efecto en el rendimiento de tomate. (Tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar). Guatemala.
- Karampinis, E., Kourkoumpas, D.-S., Grammelis, P., Kakaras, E. (2015). New power production options for biomass and cogeneration. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 4(6), 471–485. doi:10.1002/wene.163.
- Kramreiter, R., Url, M., Kotik, J., Hofbauer, H. (2008). Experimental investigation of a 125 kW twin-fire fixed bed gasification pilot plant and comparison to the results of a 2 MW combined heat and power plant (CHP). *Fuel Processing Technology*, 89(1), 90–102. doi:10.1016/j.fuproc.2007.08.001.
- Kunii, D., Levenspiel, O. (1991). *Fluidization engineering* (2ª Ed). Butterworth-Heinemann.
- Lima Rojas, L. (2013). *Evaluación De La Composición Química Y Propiedades Físicas De Madera Y Corteza De Cuatro Coníferas Para La Producción De Bioenergía*. (Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León). Nuevo León: México.

- Loaiza Navarro, M. A. (2015). *Modelo De Generación De Energía A Partir De Biomasa Forestal*. (Tesis de Pregrado, Universidad de Chile). Santiago de Chile: Chile.
- Martínez, J. A., Montoya, N., Sierra, N. (2014). Energía del futuro: Bioalcoholes a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). *Revista Escuela de administración de negocios*, 77, 64-81.
- Mata Sánchez, J. (2015). *Optimización de metodologías para la caracterización de biocombustibles sólidos procedentes de la industria del olivar*. (Tesis de doctorado, Universidad de Córdoba). Córdoba: Madrid.
- Medina Morales, M. A., Lara Fernández, L., Aguilar, C. N., De la Garza Toledo, H. (2011) Aprovechamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de etanol como carburante. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 3 (6), 35-41.
- Membrillera Serrano, B. (2018). Aplicación de biomasa a la generación de energía térmica. Análisis de instalaciones. (Tesis de maestría, Universidad de Sevilla). Sevilla: España.
- Murray, C. H. (1991). *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales*. Fao. <http://www.fao.org/3/T0269S/T0269S00.htm>.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2020, 23 de marzo). Importancia de los Ecosistemas Forestales; Especies de los Bosques y Selvas. [Blog]. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. <https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/importancia-de-los-ecosistemas-forestales-especies-de-los-bosques-y-selvas?idiom=es>.

- Prieto Padilla, À. (2007). Caracterización hidrodinámica de un lecho fluido. (Tesis de pregrado, Universidad Carlos III de Madrid). Madrid: España.
- Rincón Martínez, J. M., Silva Lora, E. (2014). Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. La red iberoamericana de aprovechamiento de residuos orgánicos en producción de energía. Bogotá, Colombia
- Romanelli, G., Ruiz, D., Pasquale, G. (2016). Química de la biomasa y los biocombustibles. Editorial de la Universidad de la Plata. Argentina.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). *A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. doi:10.1016/j.rser.2011.02.015
- Sandoval, G. (2010). Biocombustibles avanzados en México, estado actual y perspectivas. Red Mexicana de Bioenergía, A. C. México.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019, 12 de noviembre). Biomasa, creación ecológica de energía. [Blog]. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biomasa-creacion-ecologica-de-energia>.
- Secretaría de energía. (2008). Energías Renovables 2008- Energía biomasa. Secretaria de Energía. Argentina.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017, 23 de junio). Bosques tropicales, ecosistemas con gran riqueza de especies. [Blog]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-tropicales-ecosistemas-con-gran-riqueza-de-especies>.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018, 07 octubre). ¿Qué es la energía de biomasa? [Blog]. SEMARNAT. [https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-energia-de-](https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-energia-de-biomasa?idiom=es#:~:text=Tambi%C3%A9n%20conocida%20como%20bioenerg%C3%ADa%2C%20es,y%20sus%20restos%20no%20vivos.&text=Mediante%20este%20proceso%20se%20almacena%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20en%20forma%20de%20biomasa.)

[biomasa?idiom=es#:~:text=Tambi%C3%A9n%20conocida%20como%20bioenerg%C3%ADa%2C%20es,y%20sus%20restos%20no%20vivos.&text=Mediante%20este%20proceso%20se%20almacena%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20en%20forma%20de%20biomasa.](https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-energia-de-biomasa?idiom=es#:~:text=Tambi%C3%A9n%20conocida%20como%20bioenerg%C3%ADa%2C%20es,y%20sus%20restos%20no%20vivos.&text=Mediante%20este%20proceso%20se%20almacena%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20en%20forma%20de%20biomasa.)

Serrano Yuste, P. (2016). Biomasa para ACS, calefacción y refrigeración de viviendas. [Blog]. [Certificados energéticos.com](https://www.certificadosenergeticos.com). <https://www.certificadosenergeticos.com/biomasa-acsc-calefaccion-refrigeracion-viviendas>.

Sierra V, F., Guerrero F, C., Foreno N, C. (2011). Eficiencia Energética De Una Planta De Gasificación De Lecho Fijo Corriente Descendente De 12 Kw Alimentada Con Madera Residual Y Aire Como Agente Oxidante. *V Congreso internacional de ingeniería mecánica y III de ingeniería Mecatrónica*. CIMM.

Steinvorth Álvarez, A. (2014). Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. *CEGESTI Éxito Empresarial*. 253, 1-4.

Tojes Pacheco, J. F. (2015). *Caracterización energética del densificado de aserrín como biocombustible, pellet, utilizando tres diferentes aglutinantes: arcilla, almidón y yeso*. (Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala.

Turare, C. (2002). Biomass gasification- Technology and utilization. ARTES Institute of Flensburg. Germany.

Urien Toledo, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Educación a Distancia). Madrid, España.

Valverde, A., Sarria, B., Monteagudo, J. (2007) Evaluación de la eficiencia energética de un horno que utiliza como combustible cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 37, 175-180.

Zermeño Eguia Lis, J., Amezcua Allieri, M., Aburto Anell, J., Martínez Hernández, E. (2020). Lineamientos de Las Especificaciones Técnicas de Calidad Para Biocombustibles Sólidos (BCS). Biocombustibles sólidos para generar calor y electricidad en media y alta potencia. Ciudad de México, México.