



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

División de Estudios de Posgrado

Maestría en Ciencia y Tecnología de la Madera



Tesis

“EVALUACIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL GENERADA EN EL PROCESO DE ASERRÍO EN LA EMPRESA FORESTAL VIZCAYA S. DE R. L. DE C. V. UBICADA EN LA CIUDAD DE DURANGO, DGO. MX.”

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencia y Tecnología de la Madera

Quien presenta:

Ing. en Ciencias Forestales Lucero A. Reyes Rodríguez

Director:

Dr. En Ciencias Forestales José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Codirector:

Dr. En Ciencias Ambientales Esteban Pérez Canales

Morelia, Mich. Junio de 2015

D E D I C A T O R I A

A Dios por haberme regalado el don de la vida, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de mucho aprendizaje, experiencia, felicidad y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. Gracias Dios por estar al lado mío en cada paso de mi vida.

A mi amado esposo Alfredo Coheto Maciel, que ha sido el impulso durante toda mi carrera y el pilar principal para la culminación de la misma, que con su apoyo constante y amor incondicional ha sido amigo y compañero inseparable, fuente de paciencia, comprensión y consejo en todo momento.

A mis padres, que con su amor y enseñanza han sembrado las virtudes que se necesitan para vivir con anhelo y felicidad.

A mis hermanos, Fabian, Iban y Yovanna, aunque en la mayoría de las veces parece que estuviéramos en una batalla, hay momentos en los que la guerra cesa y nos unimos más. Gracias por todos los bonitos momentos que pasamos

A mis cuñados, Sonia Moreno y a José Coheto que son personas que han aportado buenas cosas a mi vida, además de los grandes lotes de felicidad y de las diversas emociones que siempre me han causado.

A mis profesores, a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias por prepararnos para un futuro competitivo no solo como los mejores profesionales sino también como mejores personas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis realizado en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH, es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron distintas personas opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Este trabajo me ha permitido aprovechar la competencia y la experiencia de muchas personas que deseo agradecer en este apartado.

A mi director de tesis al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, por sus consejos y paciencia, por su valiosa dirección y apoyo para seguir este camino de tesis y llegar a la conclusión del mismo. Cuya experiencia y educación han sido mi fuente de motivación y de curiosidad durante estos años. En especial agradecimiento por su valiosa amistad y por el ánimo que me brindó en este tiempo.

A la M.C. Fabiola E. PedrazaBucio, por su siempre atenta y efectiva colaboración durante el trabajo del laboratorio, además por su enseñanza, ayuda y valiosa amistad.

A los miembros del jurado: M. C. Luis J. AviñaBerumen, Dr. Pablo Albarrán y Dr. Rafael Herrera Bucio, porque de manera honesta, capaz y respetuosa crearon un ambiente de confianza y responsabilidad en el desarrollo del proyecto. Debo agradecer de manera especial al Dr. Esteban Pérez Canales, por su colaboración y valiosos aportes realizados durante el desarrollo de la tesis.

A mi compañera de laboratorio, Adriana Vázquez Guerrero, por las conversaciones que hicieron el trabajo en el laboratorio un lugar agradable, por el respaldo y la amistad. Gracias por ayudarme y escucharme.

Agradezco especialmente la amabilidad y el apoyo que me brindó Estela Méndez, como secretaria del Posgrado.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera (ISIMA) de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), por el apoyo brindado para mi formación profesional.

A las personas de la empresa Forestal Vizcaya S. de R. L. de C. V., que me recibieron y respondieron mis consultas, además de su apoyo en la recolección de datos y muestras para el desarrollo de la tesis. Un especial agradecimiento a los hermanos Andrade por su cooperación, disponibilidad y amabilidad para el logro de los objetivos del proyecto.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, División de Estudios de Posgrado de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en sus instalaciones.

El proyecto de tesis se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Química de la Madera, en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, bajo la dirección del Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones y con el apoyo de la M.C. Fabiola E. Pedraza Bucio.

Al Dr. José René Rangel Méndez, investigador IPICYT, por su valiosa colaboración en el microanálisis de las sustancias inorgánicas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada, con el número de becario 444169, para el estudio de maestría.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	ivii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE ESQUEMAS.....	ivii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 Descripción de la industria maderera	2
2.2 La industria del aserrío	3
2.3 Tipos de aserraderos.....	4
2.4 Tipos de residuos generados en el proceso de aserrío	5
2.5 Biomasa.....	6
2.6 Biomasa forestal	9
2.7 Caracterización de la biomasa.....	12
2.8 Marco Legal en México referente a las Energías Renovables.....	17
3.ANTECEDENTES	19
3.1 Proyectos que entraron en funciones en el transcurso del año 2010	20
3.2 Proyectos que entraron en funciones en el transcurso del año 2011	21
3.3 Proyectos realizados en el transcurso del año 2012	21
3.4 Proyectos que entraron en funciones en el transcurso del año 2012	22
4.JUSTIFICACIÓN.....	23

5.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
6.HIPÓTESIS	24
7.OBJETIVOS.....	24
7.1 Objetivo General.....	24
7.2 Objetivos Específicos	24
8.MATERIALES Y MÉTODOS	25
8.1 Descripción del área de interés	25
8.2 Cuantificación de la biomasa generada (corteza, aserrín, virutas) para su posible uso en la cogeneración de energía.	28
8.3 Análisis de la viabilidad técnica de la cogeneración de energía a través de la biomasa forestal generada en la industria.	42
9.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
9.1 Cuantificación de la biomasa	43
9.2 Caracterización física de biomasa del proceso de aserrío	45
9.3 Caracterización química de biomasa del proceso de aserrío	54
9.4 Análisis de la viabilidad técnica de la cogeneración de energía a través de la biomasa forestal generada en la industria.	68
10.CONCLUSIONES	69
11.BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad instalada para la generación de energía eléctrica con fuentes renovables en México -----	7
Tabla 2. Productividad neta de biomasa en la tierra. -----	8
Tabla 3. Composición media del árbol. -----	10
Tabla 4. Características físicas, químicas y físico-químicas de los biocombustibles y sus unidades de medida (Camps y Marcos, 2008). -----	13
Tabla 5. Poderes caloríficos de diversos combustibles y biomasa. -----	16
Tabla 6. Proyectos bioenergéticos relevantes dentro del sector foresto-industrial en Argentina. -----	20
Tabla 7. Principales resultados de los estudios de generación de energía eléctrica a partir de residuos de aserrío y aprovechamiento forestal (SENER, 2012). -----	22
Tabla 8. Total de muestras de subproductos obtenidas en el aserradero. -----	30
Tabla 9. Factor de abultamiento residual. -----	34
Tabla 10. Cuantificación de los residuos de la empresa Forestal Vizcaya. -----	43
Tabla 11. Coeficiente de residuos (CR) y coeficiente de disponibilidad (CD) de biomasa generada en el aserradero. -----	44
Tabla 12. Potencial energético de los residuos cuantificados en la empresa Forestal Vizcaya. -----	44
Tabla 13. Porcentaje de humedad promedio de los subproductos obtenidos del proceso de aserrío de la empresa Forestal Vizcaya. -----	47
Tabla 14. Prueba de rango múltiple 95% LSD para % de humedad. -----	48
Tabla 15. Densidad básica obtenida al saturar la muestra en los tiempos de 24, 48 y 144 horas. -----	48
Tabla 16. Test de rango múltiple 95% LSD de la densidad básica saturando en agua por espacio de 24 h. -----	49
Tabla 17. Prueba de rango múltiple 95% LSD. Densidad básica saturada en agua por un tiempo de 48 horas. -----	50
Tabla 18. Prueba de rango múltiple 95% LSD para densidad básica saturada la muestra en agua por 144 h. -----	51

Tabla 19. Determinación de la Densidad a granel en relación con la Densidad básica. -----	52
Tabla 20. Prueba de rangos múltiples LSD 95% para densidad a granel con base a la densidad básica.-----	53
Tabla 21. Determinación de la Densidad a granel según la norma EN 15103:2009.	53
Tabla 22. Prueba de rangos múltiples LSD, para densidad a granel. -----	54
Tabla 23. Prueba de rangos múltiples LSD para el porcentaje de cenizas. -----	55
Tabla 24. Contenido químico elemental (%) de la corteza y aserrín de <i>Pinus spp.</i> --	56
Tabla 25. Contenido de minerales (%) de la corteza y aserrín de <i>Pinus spp.</i> -----	57
Tabla 26. Test de rangos múltiples 95% LSD para pH. -----	58
Tabla 27. Prueba de rangos múltiples 95% LSD para sustancias extraíbles.-----	60
Tabla 28. Prueba de rangos múltiples 95%, para lignina. -----	61
Tabla 29. Prueba de rangos múltiples con el método LSD para holocelulosa. -----	62
Tabla 30. Prueba de rangos múltiples LSD para α -celulosa. -----	63
Tabla 31. Contenido de taninos etanólicos y taninos acuosos en porcentaje. -----	64
Tabla 32. Poder Calorífico Neto a diferentes porcentajes de humedad.-----	65
Tabla 33. Potencia instalable teórica y potencia instalable factible para Forestal Vizcaya. -----	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la empresa. -----	25
Figura 2. Patrones de asierre. De izquierda a derecha, asierre tangencial y asierre al cuarto. -----	26
Figura 3. Aspectos considerados en el análisis de la empresa forestal. -----	28
Figura 4. Muestras recolectas en la empresa Forestal Vizcaya para su caracterización. -----	31
Figura 5. a, Agitador de tamices. b, Partículas de aserrín y corteza retenidas en los tamices. -----	32
Figura 6. a, Muestras saturadas en agua, aserrín y corteza. b, centrifugado de las muestras. -----	33
Figura 7. Molino y tamices para la obtención de la harina a tamaño de partículas malla 20 y 40. -----	35
Figura 8. Potenciómetro para determinar el valor de pH. -----	35
Figura 9. a, Crisoles de níquel sobre placa de calentamiento. b, Crisoles dentro de la mufla. -----	36
Figura 10. a, Extracción de corteza y madera en equipo Soxhlet. b, Destilación de solventes en rotavapor. c, Extracto en matraces dentro del desecador. -----	37
Figura 11. a, Proceso de obtención de Lignina. b, Lignina en papel filtro dentro del desecador. -----	37
Figura 12. a, Muestras en baño María para la obtención de Holocelulosa. b, Holocelulosa en vasos de precipitado. -----	38
Figura 13. Determinación de la α -Celulosa. -----	39
Figura 14. a, Extracto total. b, Filtrado al vacío para obtener No de Stiasny. c, Taninos hidrolizables (sin presencia de coloración). -----	40
Figura 15. Distribución granulométría de las muestras corteza y aserrines de Pinusspp en porcentaje. -----	46
Figura 16. Comparación de medias con el método LSD para % de Humedad de las muestras de biomasa. -----	47
Figura 17. Comparación de medias de Densidad básica con el método LSD saturando de humedad las muestras de biomasa por 24 horas. -----	49

Figura 18. Método LSD muestra las medias de Densidad básica a 48h de las muestras de biomasa.-----	50
Figura 19. Método LSD para densidad básica saturada la muestra por un tiempo de 144 horas. -----	51
Figura 20. Diagrama de medias de la densidad a granel saturando de humedad la muestra en tiempo de 24, 48 y 144 h. -----	52
Figura 21. Se utilizó el método LSD mostrando las medias de los datos obtenidos con la norma EN 15103:2009. -----	54
Figura 22. Medias del método LSD del porcentaje de cenizas con un intervalo de confianza de 0.95, F=18.52 y p=0.00001. -----	55
Figura 23. Muestra las medias del método LSD del pH de las siete muestras en estudio. -----	58
Figura 24. Medias del método LSD del porcentaje de sustancias extraíbles. -----	59
Figura 25. Se muestran las medias del método LSD del porcentaje de lignina. -----	61
Figura 26. Medias del porcentaje de holocelulosa con el método LSD. -----	62
Figura 27. Medias del porcentaje de α -Celulosa con el método LSD. -----	63
Figura 28. Disminución del Poder Calorífico Neto de la biomasa forestal residual en función del porcentaje de humedad. -----	66
Figura 29. Composición química y su relación con el poder calorífico en las muestras de corteza y aserrín analizadas. -----	67

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1. Croquis de un aserradero permanente tradicional. -----	4
Esquema 2. Flujo de la industria de la madera y su aprovechamiento (Camps y Marcos, 2008). -----	11
Esquema 3. Principales características físicas, químicas y físico-químicas de los combustibles sólidos (Campsy Marcos, 2008). -----	12
Esquema 4. Principales variables físicas y químicas de los combustibles sólidos (Camps y Marcos, 2008). -----	14
Esquema 5. Croquis del aserradero permanente elevado de la empresa Forestal Vizcaya. -----	27
Esquema 6. Esquema general de la caracterización de biomasa del proceso de aserrío. -----	31

RESUMEN

En el ámbito forestal, la industria de la madera tiene la característica de generar grandes volúmenes de residuos durante el proceso de explotación y elaboración de la misma. El principal objetivo de este estudio es evaluar la biomasa forestal generada en el proceso de aserrío de la empresa Forestal Vizcaya para su posible uso dendroenergético. Para ello, se cuantificaron los residuos de biomasa (aserrín, corteza, puntas y astillas). Luego se tomaron muestras de los residuos de desecho (aserrín y corteza) obtenidos de las diferentes máquinas del proceso de aserrío, para determinar las características físicas (granulometría, % de humedad y densidad básica y densidad a granel) y características químicas (composición química y poder calorífico). Los análisis se realizaron por duplicado, se aplicó un análisis de varianza a 95% de confianza estadística y los valores medios se compararon con prueba LSD.

El resultado de la cuantificación fue de 5,297.39 Ton/año de residuos de desecho, con una disponibilidad horaria residual de 1.17 Kg/s. La granulometría en corteza fue de 39% (16mm) y el aserrín tuvo un porcentaje de 68 (entre 1.40-0.50 mm.) La humedad media de los aserrines y corteza es 42.31% y 20.75% respectivamente. En la densidad básica los resultados variaron de 172.4 a 298.3 Kg/m³, presentando los valores más altos la corteza y el aserrín de la astilladora. La densidad a granel es 143.74 kg/m³ de aserrín y de corteza 183.36 kg/m³ en promedio. La descortezadora y la astilladora presentaron los valores más altos de cenizas con 1.73 y 0.94 %, estadísticamente si tienen diferencias significativas respecto a los demás aserrines. La composición elemental fue semejante entre las muestras. Los principales constituyentes fueron Ca, K y Mg. Los valores promedio mayores para todos los minerales se presentaron en los aserrines de la sierra banda y la canteadora. El pH en la descortezadora es 3.70% y la astilladora de 3.93% menos ácido comparado con los aserrines de las demás máquinas (4.70%). La lignina muestra sus mayores valores en la descortezadora y la astilladora(50.32 y 39.89%),con diferencias estadísticas. El contenido medio de lignina de las otras muestras de aserrín es de 24.65%. La holocelulosa presentó valores de 33.59% en corteza y en promedio de los aserrines de 69.02%. La α -celulosa en descortezadora y astilladora fue menor respecto al aserrín de las otras máquinas. La astilladora presentó el mayor porcentaje en los taninos etanólicos y en los acuosos. La corteza y el aserrín de *Pinus spp* presentaron un Poder Calorífico Neto de 18 MJ/kg. La combustión de estos desechos permitirá generar 13 millones de KWhde electricidad.

PALABRAS CLAVES: Biomasa forestal, caracterización residual, poder calorífico.

ABSTRACT

In the field forestry, the timber industry has the characteristic of generating large volumes of waste during the process of exploitation and elaboration of the same. The aim objective of this study is to evaluate forest biomass generated in the sawmilling process of Forestal Vizcaya for possible wood energy use. For it, that biomass residues (sawdust, bark, tips and chips) were quantified. Then samples of waste residues (sawdust and bark) obtained from different machines sawing process were taken to determine for physical characteristics (particle size, % moisture and basic density and bulk density) and chemical characteristics (chemical composition and calorific). Analyzes were performed in duplicate, an analysis of variance at 95% confidence and the mean values were compared with LSD test was applied.

The result of quantification was 5297.39 tons/year of waste residues, with a residual hourly availability of 1.17 kg/s. The particle size bark was 39% (16mm) and sawdust had a percentage of 68 (between 1.40-0.50 mm). The average humidity of sawdust and bark is 42.31% and 20.75% respectively. The basic density results varied from 172.4 to 298.3 kg/m³, presenting higher values bark and sawdust chipper. Bulk density is 143.74 kg/m³ of sawdust and bark 183.36 kg/m³ on average. The debarker and chipper presented the highest values of ash 1.73 and 0.94%, if they are statistically significant differences from others sawdust. The elemental composition was similar between samples. The main constituents were Ca, K and Mg. The higher average values for all minerals occurred in the sawdust band saw and edger. The pH in the debarker is 3.70% and 3.93% chipper less acid compared to the other machines of sawdust (4.70%). Lignin shows its greatest values in the debarker and chipper (50.32 and 39.89%) with statistical difference. The average lignin content of the other samples sawdust is 24.65%. The holocelulosa presented values of 33.59% on bark and sawdust average of 69.02%. The α -cellulose debarker and chipper was lower compared to sawdust from other machines. The chipper had the highest percentage in the ethanolic and aqueous tannins. The bark and sawdust of *Pinus spp* showed a net calorific value of 18 MJ/kg. The combustion of these wastes could to generate 13 million KWh of electricity.

KEYWORDS: Forest biomass, waste characterization, calorific value.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, se escucha y lee que el mundo atraviesa por una crisis energética, en la que es necesario buscar nuevas alternativas de generación de energía, ya que se presume que en un futuro la demanda podría superar la oferta (Quispe, 2010). Esta generación de energía deberá abrirse a nuevos procesos que utilicen fuentes de combustión de biomasa, por ejemplo, agrícola, forestal, urbana e industrial.

En el ámbito forestal, la industria de la madera tiene la característica de generar grandes volúmenes de residuos durante el proceso de explotación y elaboración de la misma, es decir, esto sucede desde la etapa de abastecimiento, hasta la obtención del producto final. El aprovechamiento de estos residuos en los procesos industriales, de servicios, así como en la esfera residencial, es una necesidad social, en aras de disminuir el consumo de combustibles fósiles y el impacto ambiental que ellos producen (Lesme y Roca, 2001).

Dada esta circunstancia, surge el interés de estudiar la posibilidad de implementar un sistema de cogeneración de energía en una empresa forestal, utilizando los subproductos del aserrío como aserrín y pedazos de madera de pequeñas dimensiones (astillas, virutas, costaneras), como una forma de aprovechamiento integral de la madera.

La cogeneración, se define como la producción secuencial de energía eléctrica y/o mecánica de energía térmica aprovechable en los procesos industriales a partir de una misma fuente de energía primaria. Y es hoy, una alternativa como método de conservación de energía para la industria, acorde con las políticas de globalización económica-regional y a la política internacional orientada a lograr un desarrollo sostenible (Lang, 2013).

Esta técnica planteada se convierte en el objetivo del presente trabajo; al aplicarla para evaluar la mejora en los parámetros energéticos del proceso de cogeneración de energía a través de los subproductos del aserrío para la producción de vapor, para los procesos industriales de la madera, en una empresa forestal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción de la industria maderera

La industria maderera es el sector de la actividad industrial que se ocupa del procesamiento de la madera, desde su plantación hasta su transformación en objetos de uso práctico, pasando por la extracción, corte, almacenamiento o tratamiento bioquímico y moldeo. El producto final de esta actividad puede ser la fabricación de mobiliario, materiales de construcción o la obtención de celulosa para la fabricación de papel, entre otros productos derivados de la madera.

La infraestructura de la industria forestal establecida en México se ha incrementado en el año 154.6% en los últimos 7 años. El cálculo se obtiene comparando el período de 1999 donde había 3,497 centros de transformación con una capacidad instalada de 16, 514,461 m³r contra 8,903 establecidos en el año 2005 con una capacidad instalada de 28, 929,512 m³r. De la cual, sólo se utiliza el 30.1% y siendo los estados de Michoacán (3,756) y Durango (1,134) los que cuentan con el mayor número de industrias (SEMARNAT, 2007).

La producción de madera ha mostrado una disminución durante el periodo 2004-2013, iniciando con 6.7 millones de metros cúbicos rollo (m³r) en 2004 y finalizando este periodo con 5.9 millones de m³r. En los años 2010 y 2011 se registraron las más bajas producciones durante el periodo ya que se obtuvo un volumen de 5.6 y 5.5 millones de m³r, respectivamente, con una disminución del 3.1% y 2.2% en relación al año anterior. Para el año 2013, la producción forestal maderable se mantuvo prácticamente estable en relación al año anterior con 5.88 millones de m³r lo que significó un decremento del 0.5% (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014).

Los principales Estados productores en el año 2013 fueron: Durango (32.80%), Chihuahua (16.79%), Michoacán (7.76%), Oaxaca (7.13%) y Veracruz (4.93%) que contribuyeron con el 69.41% de la producción total, equivalente a 4.1 millones de m³r. Cabe resaltar que los dos estados con mayor producción fueron Durango y Chihuahua, con una participación conjunta del 49.60% de la producción forestal maderable total.

Los principales productos que se obtuvieron durante el año 2013 fueron: la madera para aserrío (escuadría y durmientes) con el 74.9% de la producción (4.4 millones de m³r), los combustibles (leña y carbón) con el 11.3% (662.0 mil m³r) y el

restante 13.8% (813.1 mil m³r) se destinó a celulósicos, chapa y triplay y postes, pilotes y morillos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014).

2.2 La industria del aserrío

El proceso de aserrío se considera una de las actividades más importantes de la industria forestal en México y una de las formas más sencillas de transformar la trocería. Comprende un cierto número de operaciones que van desde la manipulación y transporte de las trozas al secado de la madera, su selección y clasificación, para lo cual se necesitan diferentes tipos de energía. Mientras, en los países en desarrollo la mayor parte de estos procedimientos están muy poco mecanizados y las necesidades energéticas se cubren fundamentalmente con la producción de algunos kilovatios para operar las sierras principales, los demás procesos se llevan a cabo empleando energía animal y mano de obra barata.

No obstante, independientemente de la naturaleza de los procedimientos y de las actividades correspondientes, todas las medidas tendientes a ahorrar energía exigen un análisis minucioso de los procesos actuales y de las soluciones posibles (FAO, Departamento de Montes, 1991).

En México, el aserrío es una de las actividades más importantes de la industria forestal. Además de producir madera aserrada de calidad, debe procurarse de aprovechar al máximo la materia prima, con el propósito de incrementar su rentabilidad. Para ello, se requiere controlar la eficiencia del aprovechamiento del producto, en función del rendimiento o de la capacidad productiva y de los costos de producción de madera aserrada.

Cruz (2012) menciona que históricamente la industria forestal en México se ha concentrado en las regiones donde se ubican los boques de coníferas, particularmente en Durango, Chihuahua, Michoacán, Oaxaca, Estado de México y Jalisco, mientras que en el trópico se localiza el menor número de plantas industriales.

El sector y la industria forestal de México, así como el mercado de sus productos en los últimos años han atravesado por una seria crisis como consecuencia de la globalización, la apertura comercial y la competitividad internacional (Cruz 2012).

La industria de aserrío a nivel nacional ha sido la que mayor peso relativo ha tenido tradicionalmente, 74.9 % de la producción del año 2013 se destinó a aserrío (4, 407, 753 m³r). La producción de aserrío se encuentra en primer lugar, donde el

estado de Durango y Chihuahua son los principales productores (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014).

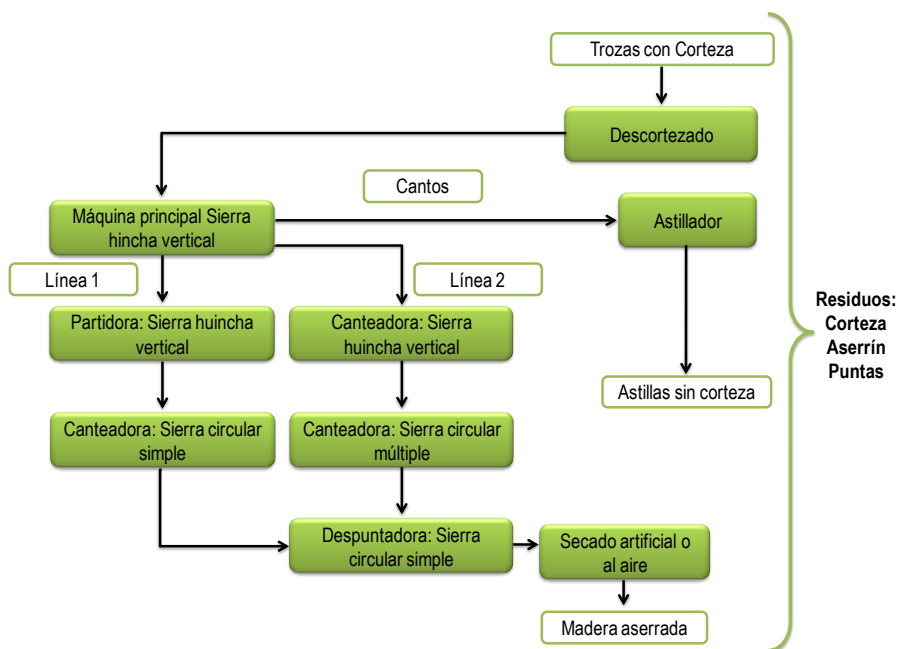
2.3 Tipos de aserraderos

Los tipos de aserraderos que se presentan en la industria forestal se clasifican en dos, según González, et al (2007):

Aserraderos móviles: corresponde a unidades muy básicas, compuestas por un banco con una sierra circular simple o sierra huincha horizontal, que cumple la función de aserrar y partir. La fuerza motriz es dada por un motor estacionario, generalmente diesel. Su característica principal es que su estructura transportable le permite instalarse cercano o en el bosque.

Aserraderos permanentes: corresponde a unidades más complejas localizadas en un mismo lugar físico. Los procesos pueden ir desde la producción de madera aserrada, hasta su secado artificial y elaboración posterior para obtener productos con mayor valor agregado.

En el Esquema 1, se observa un croquis de un aserradero permanente tradicional con sierra huincha vertical como máquina principal, con descortezador y astillador (González, et al, 2007).



Esquema 1. Croquis de un aserradero permanente tradicional.

2.4 Tipos de residuos generados en el proceso de aserrío

Los residuos generados en aserraderos corresponden a (Gonzales, *et al*, 2007 y Reyes, 2013):

- **Corteza:** capa externa de la madera rolliza. Se obtiene en aserraderos que poseen descortezadores, quedando la corteza como residuo maderero. En los aserraderos que no disponen de esta tecnología, la corteza forma parte de las costeras.
 - **Costeras:** corresponden a secciones laterales de la troza obtenidos en el proceso de aserrío. Se caracterizan por tener una cara limpia (libre de corteza). En aserraderos que poseen descortezador y astillador, las costeras son reducidas a astillas sin corteza, las que se comercializan a la industria de tableros, celulosa u otras.
 - **Aserrín:** conjunto de partículas de tamaño pequeño obtenido en el proceso de aserrado y dimensionado de la madera.
 - **Viruta:** cinta delgada de espesor variable en dirección de la fibra, obtenida por medio del cepillado de piezas de madera; se obtiene en aserraderos con elaboración y remanufactura.
 - **Despuntos:** residuos de tamaño variable provenientes de secciones terminales de piezas y que resultan del proceso de dimensionado en largo de la madera. En la mayor parte de los aserraderos se producen muy pocos despuntos, y más bien estos corresponden al margen de tolerancia en longitud con el que vienen los trozos (generalmente 2-3 cm), lo que en general es difícil de cuantificar porque las empresas registran el volumen de trozas efectivo.
- Tiras:** en aserraderos algunos residuos han dejado de considerarse como tales, pasando a ser con el tiempo subproductos, dado que se orientan a un mercado formal y específico con precios estables conocidos, transándose en condiciones competitivas.

En México, los aserraderos han considerado los residuos de madera (biomasa) como un subproducto engorroso de la operación de aserrío, con su consiguiente eliminación para relleno de terrenos o incinerándolos. Sin embargo, estos dos destinos se han convertido últimamente en problemas ambientales y, combinado con el aumento de los costos energéticos, ha hecho que se busquen alternativas para emplear los residuos forestales como fuente alternativa de combustible (Benjamín, 2006).

De la Cruz y Pairán (2004) indican que la utilización de los residuos de madera como fuente alternativa de combustible, justifica que se investiguen su máxima utilización con el objetivo de aumentar la auto eficiencia energética de la instalación y aprovechar las ventajas de su empleo, frente al suministro de energéticos tradicionales.

2.5 Biomasa

En la Tecnología de Energías Renovables (TER), la biomasa es la más importante en la contribución a la energía total consumida. Los combustibles principales están constituidos por biomasa residual, biogás y biocarburantes, dependientes principalmente de los sectores agrícola y forestal donde el consumidor fundamental de biomasa es el sector doméstico (Camps y Marcos, 2008).

La biomasa en general, es una fuente de energía renovable debido a que su contenido energético proviene de la energía solar transformada en los procesos fotosintéticos, la cual se libera al romperse los enlaces de los compuestos orgánicos durante el proceso de combustión, emitiendo bióxido de carbono y agua (SENER, 2012).

La biomasa procedente de los sectores agrícolas y forestales, se encuentra disponible en estado sólido, líquido o gaseoso y puede tener distintas aplicaciones, tales como la generación de energía térmica, la generación de energía eléctrica o el uso directo para la generación de calor; en este último caso el calor específico de la biomasa va a depender del origen de la misma y de su humedad (SENER, 2012).

En la actualidad se han desarrollado aplicaciones eléctricas de la biomasa para usos industriales, especialmente a través de la cogeneración aprovechando la combustión de la madera y el papel (Secretaría de Energía. 2008).

De acuerdo con lo anterior, se puede citar como ejemplo, que la capacidad de generación eléctrica a partir de biomasa alcanzó los 72 GigaWatts (GW) en el mundo a finales del año 2011. En el período comprendido entre 2000 y 2010, la producción de electricidad a partir de biomasa se incrementó 7% en promedio anual, pasando de 101.5 TeraWatt/hora (TWh) a 196.5 TWh. Al cierre del año 2010, Estados Unidos contribuyó con 56.1 TWh de generación de energía – 28.5% de la producción mundial, la producción en 2011 en comparación con el año anterior incremento ligeramente para alcanzar 56.7 TWh logrando una capacidad instalada de 13.7 GW; seguido por la unión Europea (encabezada por Alemania, Suecia y Reino Unido) con 26.2 GW; Brasil, China, India y Japón (SENER, 2012).

De igual manera, la capacidad instalada para la producción de energía eléctrica a partir de biomasa sólida está aumentando rápidamente en Europa, donde la producción bruta casi se ha triplicado en la región desde 2001 hasta 2011 (SENER, 2012). Esto se debe al desarrollo de plantas que generan calor y electricidad, conocidas como plantas cogeneradoras. Por ejemplo, Alemania y el Reino Unido están generando cada vez mayores cantidades de electricidad con biomasa sólida, a través de la combustión conjunta con combustibles fósiles (SENER, 2012).

Con respecto en México, la capacidad instalada de generación eléctrica basada en energías renovables contó con 14,324 MW a febrero de 2012 (Tabla 1) incluyendo grandes hidroeléctricas, lo que representó el 22.3% de la capacidad total de generación eléctrica en el país (CONUEE, S/F).

Tabla 1. Capacidad instalada para la generación de energía eléctrica con fuentes renovables en México

Hidráulica	Eólica	Geotérmica	Biomasa
11,603.4 MW	1,214.7 MW	958 MW	547.9 MW
81.0%	8.5%	6.7%	3.8%

Fuente: PROMEXICO 2012.

Concepto y cualidades de la energía de la biomasa

La biomasa se define como... “el conjunto de plantas terrestres y acuáticas, junto con sus derivados, subproductos y residuos producidos en su transformación” (Camps y Marcos, 2008). Según Jiménez (1991) el <<término biomasa comprende, a las materias hidrocarbonadas, no fósiles, en las que mediante el proceso básico de la fotosíntesis, se ha producido la reducción y fijación del CO₂>>. La energía de la biomasa es una energía que cumple con las siguientes características:

1. Es una energía autóctona, lo cual conlleva su no dependencia de otros países por lo menos en su fase de obtención.
2. Es una energía renovable, ya que procede del sol.

En la Tabla 2 se pone de manifiesto la importancia de los bosques y montes como productores de biomasa, seguido de los océanos. La cantidad de biomasa producida por los bosques y montes (75.500 millones de toneladas) (Camps y Marcos, 2008) suponiendo que se trata de masa verde, de la que la mitad está compuesta de agua, quedaría en materia seca la cantidad de 37.750 millones de

toneladas, que suponiendo un poder calorífico de 4.200 Kcal/Kg, se obtendría la cantidad de $158.550 \cdot 10^5$ tep (tonelada equivalente de petróleo) Camps y Marcos, 2008).

Tabla 2. Productividad neta de biomasa en la tierra.

Región	Wittaker (1975)		Bassham (1975)		Promedios	
	10 ⁹ t/año	%	10 ⁹ t/año	%	10 ⁹ t/año	%
Bosque y montes bajos	79.9	47.0	71.1	45.8	75.5	46.0
Prados y estepas	18.9	11.1	15.1	9.7	18.5	11.4
Desiertos	2.8	1.6	0	0	1.4	0.6
Cultivos agrícolas	9.1	5.4	9.2	6.6	9.1	5.6
Aguas continentales	4.5	2.6	5.0	3.2	4.7	2.9
Océanos	55.0	32.3	54.9	35.3	54.9	33.5
Total	170.2	100.0	155.3	100.0	164.1	100.0

Residuos de biomasa aptos para obtener energía

Según Jiménez (1991), existen cinco opciones para usar los residuos de biomasa las cuales se mencionan a continuación:

La primera es la fertilización y conservación de los suelos, la cual sería un uso agrícola, silvícola y de recuperación de terrenos. La segunda es utilizarlos como sustrato productivo; como materia prima que forma la base prioritaria sobre la que crecen las lombrices, setas, levaduras o bacterias. La tercera es para la alimentación humana; ya que existen algunos residuos de origen vegetal que aún pueden ser consumidos por el hombre como alimento. La cuarta es para la alimentación ganadera; también existen residuos que se pueden utilizar para alimentar el ganado. La quinta y más importante es la producción de energía; el residuo, si su poder calorífico superior anhidro supera las 3.200Kcal/Kg puede ser estudiado como fuente de energía. De hecho a lo largo de la historia el hombre ha consumido con este fin las leñas procedentes de podas de diferentes especies arbóreas y arbustivas.

Un aspecto ambiental importante que significa utilizar biomasa es que se presenta un balance de dióxido de carbono (CO₂) emitido a la atmósfera, siendo neutro su efecto. La combustión de biomasa, en condiciones adecuadas produce agua y dióxido de carbono, siendo este último principal responsable del efecto invernadero; pero la cantidad emitida de este gas es captada por las plantas en la fotosíntesis para su crecimiento. Con este ciclo cerrado, se consigue que la

vegetación se renueve a la misma velocidad que se degrada, sin que exista un gran aumento de CO₂ en la atmósfera (Quispe, 2010).

Para centralizar el término de biomasa a continuación se muestran los tipos de biomasa generados por el hombre (Quispe, 2010):

Tipos de biomasa

- ◆ Biomasa forestal, prácticamente es la única explotada en la actualidad, y consiste en los residuos de explotaciones forestales, como desechos de la tala, poda, etc. También se puede incluir residuos de industrias forestales como madera, aserrín, corteza, etc.
- ◆ Biomasa agrícola, que contiene a los residuos de cultivos leñosos y de cultivos herbáceos.
- ◆ Residuos industriales agrícolas y agroalimentarios.
- ◆ Residuos biodegradables, como desechos de instalaciones agropecuarias y lodos de depuradoras de aguas residuales.
- ◆ Residuos sólidos urbanos.
- ◆ Cultivos energéticos y biocarburantes.

2.6 Biomasa forestal

Primeramente la biomasa forestal se define como la materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal, tanto por encima como por debajo del suelo. Es una de las energías renovables no convencionales (ERNC), y es representada principalmente por leña cuyo consumo asciende a más de 12 millones de m³ /año (Gómez y Vergara, 2011).

La madera de los aprovechamientos forestales, medida en metros cúbicos con corteza, representa el 28% (Camps y Marcos, 2008). Los Residuos Forestales son la suma de los residuos que pueden proceder de trabajos silvícolas (son agrupados en residuos de claras y aclareos, residuos de podas y residuos de cortas finales), más residuos que proceden de la industria forestal de primera y segunda transformación.

La proporción de la masa seca en un árbol es variable según se desprende de la Tabla 3, se consideran los datos para la composición media de un árbol, en masa (Camps y Marcos, 2008).

Tabla 3. Composición media del árbol.

Pino silvestre		Datos medios*	
Parte del árbol	% en masa seca	Parte del árbol	% en masa seca
Hojas	6	Tronco	65-76
Ramillas de diámetro menor a un cm+		Ramas	14-16
Ramas de diámetro mayor de un cm y	7	Hojas	3
Menor de 7 cm	55	Tocones	13-16
Tronco	14		
Corteza total	9		
Cuello de la raíz	9		
Resto de la raíz			
Total	100	Total	95-102

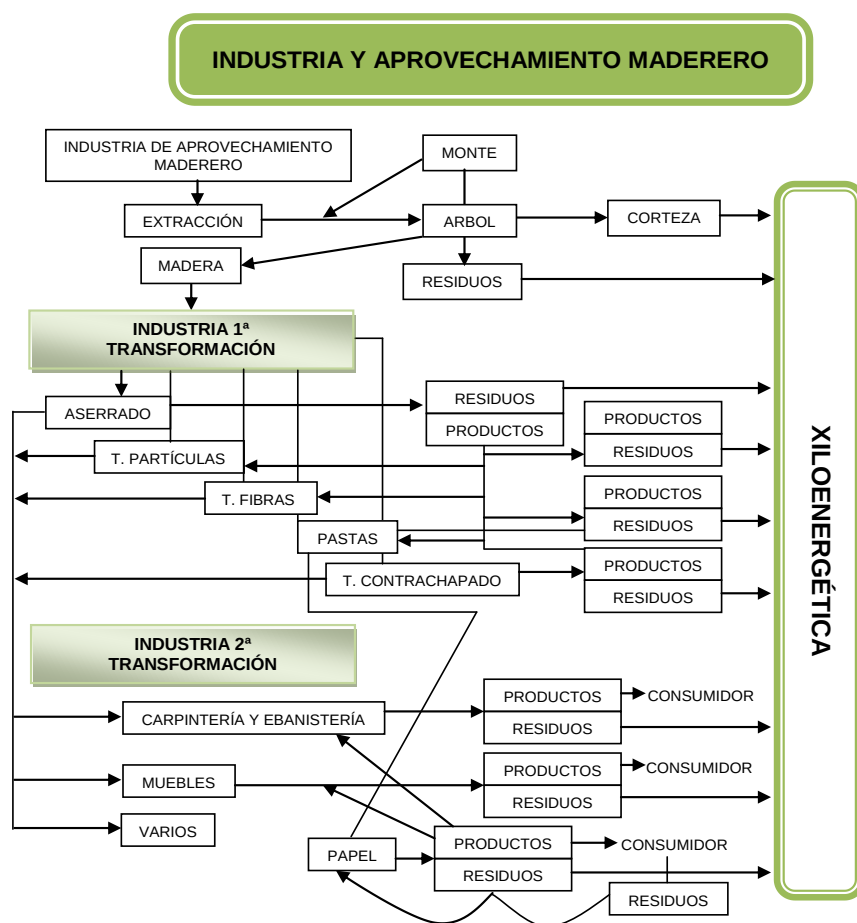
En la comparación de la columna Pino silvestre y la columna de Datos medios de la tabla anterior, al cotejar los valores obtenidos en la corteza, este es ligeramente menor (65-67%), frente al 69% que sería el dato de tronco + corteza (55+14%). El tocón presenta menos valores (13-16%, columna de Datos medios) que la suma de cuello de la raíz y otras partes de la raíz (suman 18%, columna de Pino silvestre), ya que no se consideran las raicillas, pues desde un punto de vista ecológico debemos pensar que nunca deben extraerse ya que en zonas de pendientes retienen la erosión. La suma de ramas y hojas de la columna de Datos medios (14+3=17% ó 16+3=19%) es ligeramente superior a la suma de hojas y ramas (13%) más su correspondiente corteza (podría ser de un 3% más) datos de la columna Pino silvestre; esta relación da como respuesta que de un solo árbol se puede obtener un cien por ciento de masa seca, al igual que si sólo se utilizarán unas partes de los árboles. Pero esta diferencia está totalmente justificada ya que los pinos silvestres de los países nórdicos crecen en espesura, con pocas ramas, en comparación con los arboles forestales españoles que, por falta de agua crece en menor espesura por lo que llega más luz y generan más ramas (Camps y Marcos, 2008).

Los residuos de las industrias forestales son más fáciles de cuantificar pero su calidad y cantidad son también muy variables. Dependen del tipo de industria, el precio relativo mano de obra/energía, el precio relativo mano de obra/amortización de maquinaria que maneje cada industria, la tecnología empleada, la legislación ambiental de cada país, que permita o no la evacuación de residuos forestales (con su alta carga energética), la capacidad inversora de la industria. Cuanto mayor sea esta capacidad de inversión mejor uso hará de su materia prima y de sus residuos, el

precio de mercado del kWh de energía eléctrica y el precio del mercado de la Kcal o de la termia de energía térmica (Camps y Marcos, 2008).

En el Esquema 2 se señala, el flujo de las industrias de la madera y de su aprovechamiento. Se observa que son abundantes los restos que se dedican a la xiloenergética, es decir, al uso energético.

Para el Protocolo de Kyoto, la biomasa tiene un factor de emisión de dióxido de carbono (CO_2) igual a cero. La combustión de biomasa produce agua y CO_2 , pero la cantidad emitida de dióxido de carbono fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento. Es decir, el CO_2 forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación por lo que no representa un incremento en las emisiones de CO_2 . Su uso contribuye a reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera siempre y cuando sustituya a un combustible fósil (Gómez y Vergara, 2011).



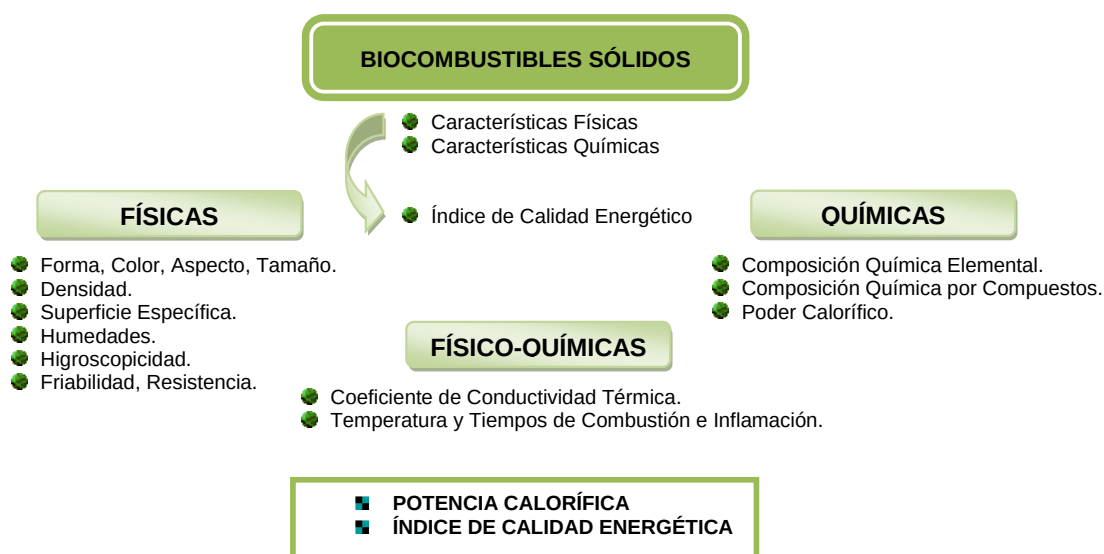
Esquema 2. Flujo de la industria de la madera y su aprovechamiento (Camps y Marcos, 2008).

2.7 Caracterización de la biomasa

Existen aspectos a considerar al plantear un aprovechamiento energético de la biomasa. En primer lugar se debe de determinar una caracterización detallada de las características fisicoquímicas del biocombustible que se quiere utilizar, como su estado, densidad, humedad y composición química. La existencia de normas nacionales permite una evaluación clara y homologable que determina los parámetros para efectuar dichas pruebas (Castells, 2012).

Las características físicas y químicas que definen un combustible y las unidades en que se miden se recogen en la Tabla 4. Algunas de ellas como la superficie específica sólo es interesante su consideración en biocombustibles sólidos. Otras como el porcentaje de corteza, son sólo características de un biocombustible (la leña). Otras sólo se pueden determinar en combustibles líquidos (viscosidad) (Camps y Marcos, 2008).

En el siguiente Esquema 3, se presentan las principales características físicas, químicas y físico-químicas que deben considerarse para la caracterización de los biocombustibles sólidos.



Esquema 3. Principales características físicas, químicas y físico-químicas de los combustibles sólidos (Campsy Marcos, 2008).

Tabla 4. Características físicas, químicas y físico-químicas de los biocombustibles y sus unidades de medida (Camps y Marcos, 2008).

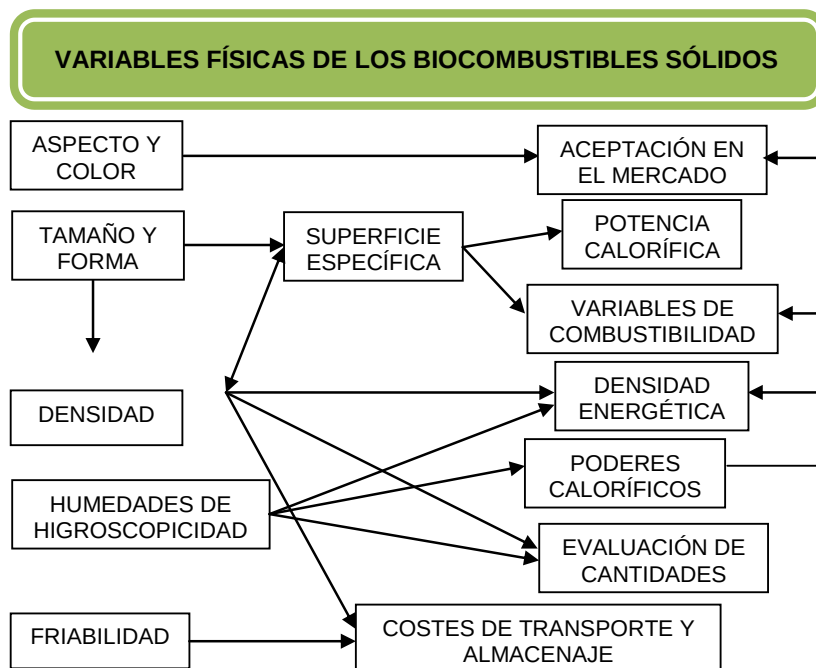
Físicas	1. Forma	--
	2. Aspecto (color, brillo)	--
	3. Densidades	Kg/dm ³
	1. Peso del estereo ¹	Kg/estéreo
	2. Humedades	%
	3. Superficie específica ¹	Cm ² /dm ³
	4. Porcentaje de corteza ²	%
	5. Friabilidad	Índices
	6. Resistencia a la compresión	Kg/cm ²
	7. Viscosidad ³	Poise
Químicas	8. Índice de Kuop ³	Índice de Kuop
	9. Temperatura de ebullición ³	°C
	10. Otros índices físicos exclusivos de combustibles líquidos y gaseosos	Índices
	1. Composición química elemental	%
	2. Composición química por compuestos	%
	3. Composición química de cenizas	%
	4. Composición química de gases de escape	%
	5. Poderes caloríficos	kJ/kg, kcal/kg
Físico-Químicas	6. Índice de yodo (3)	Índice de yodo
	7. Índices de octano y cetano (3)	Índices
	8. Otros índices químicos exclusivos de combustibles líquidos y gaseosos	Índices
	1. Coeficiente de conductividad térmica	W/m. s
	2. Combustibilidad: Temperaturas y tiempos de combustión	°C, s
	3. Inflamabilidad: Temperatura y tiempo de inflamación, temperatura máxima de llama	°C, s, °c
	4. Potencia calorífica	W/s
	5. Densidad energética y energía del estereo ¹	kJ/dm ³ , kJ/est

¹ solo en combustibles sólidos

² sólo en leñas, podría emplearse en biocombustibles sólidos densificados

³ sólo en biocombustibles líquidos

En el Esquema 4, se muestran las relaciones entre las principales variables físicas y químicas de los biocombustibles sólidos.



Esquema 4. Principales variables físicas y químicas de los combustibles sólidos (Camps y Marcos, 2008).

Desde el punto de vista energético, uno de los aspectos más importantes es la determinación del poder calorífico, ya que permite estudiar las posibilidades de aplicación de la biomasa como combustible. La definición clásica de Kollmann (1959) sobre el poder calorífico como... "El calor desprendido por kilogramo de combustible en combustión completa a la presión constante de 1 kg/cm²". Generalmente este parámetro se expresa en Kcal/kg de combustible ya sea líquido o sólido. Algunos autores han distinguido los conceptos de poder calorífico superior y poder calorífico inferior. Podemos distinguir, por tanto, los siguientes conceptos, según el autor Marcos (2001).

Poder Calorífico Superior (PCS): también es llamado calor de combustión superior. Es la cantidad de calor desprendido por un kilogramo de biomasa forestal y su valor se mide en bomba calorimétrica. La combustión se realiza a volumen

constante. El agua de combustión se recogía en forma líquida. Su valor depende de la humedad de la muestra.

Poder Calorífico Inferior (PCI): es la cantidad de calor desprendido por un kilogramo de combustible, en una combustión en la que el agua del combustible se libera en forma de vapor. Si esta agua se condensa desprendería calor y obtendríamos entonces, poder calorífico superior, añadiendo al poder calorífico inferior este calor desprendido. Por lo tanto, el poder calorífico inferior es menor que el poder calorífico superior, y a mayor humedad del combustible, mayor resulta ser esta diferencia.

El poder calorífico inferior como el superior, dependen de la humedad. Merece especial importancia el poder calorífico inferior a la humedad cero.

Poder calorífico real efectivo: también llamado Poder Calorífico neto, denominación poco aconsejable pues no depende sólo del combustible. Se obtiene multiplicando el poder calorífico inicial por el rendimiento de la combustión que, a efectos prácticos, suele ser de 0,85.

En las aplicaciones industriales, sólo tiene sentido hablar de PCI, ya que los gases de combustión se emiten a la atmósfera a una temperatura superior a la de condensación del vapor de agua y, por lo tanto, no se aprovecha el calor latente del vapor. En la tabla 5 se muestran los poderes caloríficos de diversos combustibles (Castells, 2012).

Tabla 5. Poderes caloríficos de diversos combustibles y biomásas.

Combustible	PCS (Kcal/kg)	PCI (Kcal/kg)
Biomasa de chapa seca	4.700	4.392
Madera de pino (15% de Humedad)	4.800-5.000	4.500-4.700
Madera de fresno y encino	4.700	4.300
Madera de eucalipto	4.950	4.630
Astillas de eucalipto	4.800	4.500
Carbón de residuos agrícolas	6.400-7.100	6.100-6.800
Carbón vegetal	7.500-8.300	7.200-8.000
Biomasa de cerdo seca	3.900	3.600
Pasto	4.300-4.600	4.000-4.300
Girasol	4.600-4.900	4.300-4.600
Maíz	4.550-4.600	4.250-4.300
Cáscara de arroz	3.400-4.100	3.200-3.850
Cáscara de café	3.400	3.200
Cáscara de coco	4.300-4.800	4.050-4.550
Bagazo de caña de azúcar	4.400	4.150
Ramas de algodón	4.750	4.500
Combustóleo	10.150	9.450
Gasolina	11.200	10.500
Etanol de 96% (4% agua en volumen)	6.740	6.420
Metano	12.738	11.950
Propano	12.900	11.080
Butano (gas)	11.800	10.932

Nota: 1Kcal = 4,184Kj

2.8 Marco Legal en México referente a las Energías Renovables

Marco legal vigente en México reconoce la cogeneración eficiente dentro del mismo ámbito que las energías renovables, otorgándole los mismos beneficios (SENER y Gobierno Federal, 2012).

En el año 1917 la **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**, en el art 27 establece que toda actividad de la industria eléctrica que tenga por objeto la prestación de un servicio público estará reservada exclusivamente al Estado.

En el año 1958 la **Ley Reglamentaria del art 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo** (*reformada en el año 2008*), se establece que PEMEX, los organismos subsidiarios y sus empresas podrán cogenerar energía eléctrica y vender sus excedentes a Comisión Federal de Electricidad, mediante convenios con las entidades mencionadas.

La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su reglamento (LSPEE) (1975, *reformada en el año 1992*), no considera servicio público el autoabastecimiento, la cogeneración, el pequeño productor, el productor independiente de energía, la importación para uso propio y la exportación.

En el año 2008 la **Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía y su Reglamento**, se menciona que el objeto de propiciar un aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo.

La **Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética y su Reglamento** (en el año 2008, *reformada en el año 2012*), tiene como objetivo regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y tecnologías limpias. Específicamente en su artículo 20 indica que a la cogeneración aplicarán las mismas ventajas establecidas para las energías renovables.

En el año 2012 la **Ley General del Cambio Climático**, tiene como objetivo garantizar el derecho a un ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades

en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto Invernadero, entre otros.

Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, publicada en el diario oficial de la federación en el año 2008, tiene por objeto la promoción y desarrollo de los Bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano. Promoviendo la producción de insumos para Bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país.

3. ANTECEDENTES

En la búsqueda bibliográfica realizada se dispuso de poca información relativa a investigaciones llevadas a cabo con el objetivo de usar residuos del proceso de aserrío nacional para la cogeneración de energía, sin embargo se encontraron algunos ejemplos de diversas empresas extranjeras, que utilizan los residuos generado en el abastecimiento y en la industria forestal.

Arauco, la compañía forestal más grande de Chile, tiene una capacidad instalada de 504 Megawatts (MW) de electricidad incluyendo un excedente de 134 MW, generados a partir de biomasa forestal que Arauco puede enviar al sistema central y que equivale a los requerimientos energéticos de una ciudad de 500.000 habitantes.

Tres de las plantas de cogeneración de Arauco ubicadas en la Región de BioBio, una en la planta Trupán y dos en el complejo de Nueva Aldea están registradas como proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto (Issues y Answers, 2002).

Benjamín (2006) menciona que, en los procesos de transformación en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, ubicado en el estado de Michoacán, se generan 96,701 m³/año en residuos de biomasa entre el aserradero y el bosque, los cuales pueden ser aprovechados para satisfacer las demandas térmicas y eléctricas de la empresa. El volumen de generación en biomasa, fácilmente lo alcanza a cubrir una planta de cogeneración de 2,120 kW eléctricos, con suministros de energía térmica de 4,216 kW, lo cual podría efectuarse empleando un arreglo con turbina de vapor de extracción y condensación.

En Argentina, existen proyectos de cogeneración utilizando biomasa forestal, provenientes del proceso mecánico de la madera (aserrín, corteza, costaneros) y de desecho (despuntos, ramas y tocones). La mayoría de estos proyectos se encuentran en la provincia de Misiones (Tabla 6). También se encuentran aserraderos que secan su madera aserrada, generando su propio calor con calderas que son alimentadas con los residuos que ellos mismos generan (Uasuf y Hilbert, 2012).

Tabla 6. Proyectos bioenergéticos relevantes dentro del sector foresto-industrial en Argentina.

Proyectos bioenergéticos	Actividad principal	Provincia
Forestadora Tapebicuá	Procesamiento industrial de madera-Cogeneración	Corrientes
Pindó SA	Procesamiento industrial de madera-Cogeneración	Misiones
Alto Paraná	Procesamiento industrial de madera-Cogeneración	Misiones

Fuente: Uasuf y Hilbert, 2012

En la provincia de Entre Ríos, Argentina, se realizó un pre-estudio de factibilidad para la utilización de residuos derivados de la industria forestal; obteniendo que para la Central Concordia y la Central Federación se puede generar 25 MW cada una, de energía eléctrica por medio de gasificación y combustión (Secretaría de energía, 2008).

En las provincias de Misiones y Corrientes, Argentina, se realizaron evaluaciones de los recursos de biomasa, para el estudio de factibilidad de la instalación de un proyecto de generación, resultando la Central de San Antonio Islas (Corrientes) con la generación de 10 kW de energía eléctrica mediante gasificación con residuos de la industria forestal, al igual que la Central en picada Unión (Misiones) con una generación de electricidad de 20 kW (Secretaría de energía, 2008).

3.1 Proyectos que entraron en funciones en el transcurso del año 2010

En Xátiva, Valencia se encuentra una planta de cogeneración por gasificación de biomasa, que entró en funcionamiento en 2010, alimentada con residuos forestales; consume 33.000 kg de biomasa/día, 11.000 t biomasa/año, tiene una producción eléctrica anual de 13.000 MW y evita la emisión de 4.000 t CO₂/año (Ecoticias.com, 2012).

3.2 Proyectos que entraron en funciones en el transcurso del año 2011

En junio de 2010, Arauco Bioenergía inició la construcción de la planta de cogeneración Viñales, esta unidad, utilizará biomasa forestal para generar electricidad. Ubicada a 3 km de Constitución, el proyecto se compone de una caldera de poder con una capacidad de producción de 210 ton/hora de vapor para producción interna, para lo cual, tendrá una disponibilidad de biomasa forestal que fluctuará en un rango aproximado de 2,6 millones de m³/año.

El vapor generado en el proceso será enviado al aserradero, para su uso principalmente en los secadores de madera. El vapor remanente de estos consumos será descargado finalmente en el condensador de la turbina, la cual permitirá producir energía eléctrica con una capacidad de 41 MW para el consumo propio de la planta de cogeneración, para el suministro de Aserradero Viñales y/o para su inyección al Sistema Interconectado Central (SIC). La empresa Viñales, fue inaugurada en diciembre de 2011 (Castellanos, 2011).

3.3 Proyectos realizados en el transcurso del año 2012

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), a efecto de dar cumplimiento a la estrategia de desarrollo y transferencia de tecnología de producción de energía a partir de biomasa forestal, impulsó el desarrollo de cuatro estudios que determinan las opciones más viables para el uso con fines energéticos de los residuos de aprovechamientos y aserraderos, resultando como principales zonas con potencial el Ejido El Largo, Chihuahua; la Región El Salto, Durango; Ejido El Balcón, Guerrero, y Ejido Noh-Bec (Quintana Roo). A continuación de muestran los resultados (Tabla 7) de los estudios de generación de energía eléctrica a partir de residuos de aserrío y aprovechamiento forestal (SENER, 2012).

En la ciudad de Durango, Dgo., se aprobó en proyectos PROINNOVA-CONACYT una empresa llamada Bioenergía Forestal S. A. de C. V. la cual generará energía eléctrica de 10 MW/e de capacidad (Programa de estímulos a la innovación propuestas aprobadas, 2012).

Tabla 7. Principales resultados de los estudios de generación de energía eléctrica a partir de residuos de aserrío y aprovechamiento forestal (SENER, 2012).

	Ejido El Largo (Chihuahua)	Ejido el Balcón (Guerrero)	Ejido Noh-Bec (Q. Roo)	Región El Salto (Durango)
Volumen promedio aserrado anualmente (m ³)	72, 814	18, 000	7, 200	229, 000
Residuos de aserrío disponibles (ton/año)	7300	4500	1136	31000
Residuos de aprovechamiento recuperables (ton/año)	---	---	---	55000
Consumo de Electricidad de las instalaciones industriales (millones de kWh)	1.5	1.3	0.14	---
Gasto por consumo de electricidad de las instalaciones industriales (millones de pesos)	3	2.8	0.3	---
Propuesta de generación de energía eléctrica	Quema de biomasa	Quema de biomasa	Gasificación de carbón	Gasificación de biomasa
Posibilidad de generación de energía eléctrica con los residuos disponibles (millones de kWh)	7.3	3-5	0.6	7-11MW
Potencia a instalar (kW)	200	200	92	---
Viabilidad técnica	Viable	Viable	Viable	Viable
Inversión necesaria para ejecutar el proyecto (millones de pesos)	9.4	14	1.7	---
Costo anual de operación (millones de pesos)	0.97	1.08	0.08	---
Viabilidad financiera	Viable	Viable	Viable	---
Reducción de emisiones (tonCO ₂ e/año)	1, 100 – 1, 200	1, 100 – 1, 200	123.5	46000

3.4 Proyectos que entraron en funciones en el transcurso del año 2012

La primera planta de electricidad con biomasa de Cantabria, España, se inauguró el 31 de mayo en Reocín, tras haber entrado en funciones en el cuarto trimestre de 2012. Esta planta presenta una potencia de 10 MWe, una energía eléctrica exportada de 73.000 MWe h/año, un consumo medio de biomasa de 100.000 t/año y una humedad biomasa de 40%-50% (Burgo, 2013).

4. JUSTIFICACIÓN

Lamentablemente en la actualidad, no se dispone de datos acerca de capacidad instalada de generación a partir de residuos forestales en México. Sin embargo, se han realizado estudios que sirven como punto de referencia para el desarrollo de información para el presente trabajo.

La biomasa, en contraste con los combustibles fósiles, tiene un potencial positivo único en el impacto medioambiental, puesto que el dióxido de carbono (CO_2) emitido es fácilmente absorbido de manera natural, evitando así la emisión de grandes cantidades de óxidos nitrosos (N_2O) y de dióxido de sulfuro (SO_2), ya que el contenido de sulfuro es casi nulo.

Es por esto que se pretende alentar a la empresa Forestal Vizcaya en Durango, para que adopte la cogeneración a partir de biomasa forestal, un combustible que hasta ahora no se ha aprovechado en su totalidad. La cogeneración es de gran importancia por las grandes ventajas que ofrece dicha tecnología, aprovechando la energía térmica sobrante del proceso de la generación de energía, ocasionando con ello una mejor utilización de los recursos energéticos y en consecuencia mejorando notablemente la eficiencia de los procesos productivos de la industria.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un aserradero genera anualmente un volumen promedio de 229,000 m^3 y genera 31,000 ton/año de residuos disponibles (SENER, 2012), estos desechos podrían ser aprovechados en los procesos industriales forestales con el objeto de combinar la producción de electricidad y calor, aprovechando la energía que de otra forma se desecharía; a esta forma de utilizar el calor de desecho, según se mencionó anteriormente, se le conoce como cogeneración. Proceso que es importante promover debido a que representa una necesidad social, en aras de disminuir el consumo de combustibles fósiles y el impacto ambiental que ellos producen.

Por lo que el estudio de este tema es brindar una nueva visión para el uso racional y eficiente de los recursos energéticos con los que cuenta la industria forestal, a partir de la aplicación de tecnologías innovadoras como la cogeneración de energía.

6. HIPÓTESIS

¿Es factible el desarrollo de un proceso de cogeneración de energía a partir de la biomasa forestal, en la empresa Forestal Vizcaya S. de R. L. de C. V.?

7. OBJETIVOS

7.1 Objetivo General

Evaluar la biomasa forestal generada en el proceso de aserrío de la empresa Forestal Vizcaya para su uso dentroenergético.

7.2 Objetivos Específicos

- 1.- Cuantificar la biomasa generada (corteza, astillas, aserrín, virutas) para su posible uso en la cogeneración de energía.
- 2.- Caracterizar la biomasa generada en la empresa de estudio (características físicas, químicas y físico-químicas).
- 3.- Analizar la viabilidad técnica de la cogeneración de energía a través de la biomasa forestal generada en la empresa.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 Descripción del área de interés

En la Ciudad de Durango, se ubica la empresa maderera Forestal Vizcaya S. de R. L. de C.V. carretera Durango-Rodeo con coordenadas latitud 24.060954, longitud 104.656406 y 36 m E (Figura 1), empresadedicada al aprovechamiento de madera, por lo que, se encuentra seccionada por dos áreas:

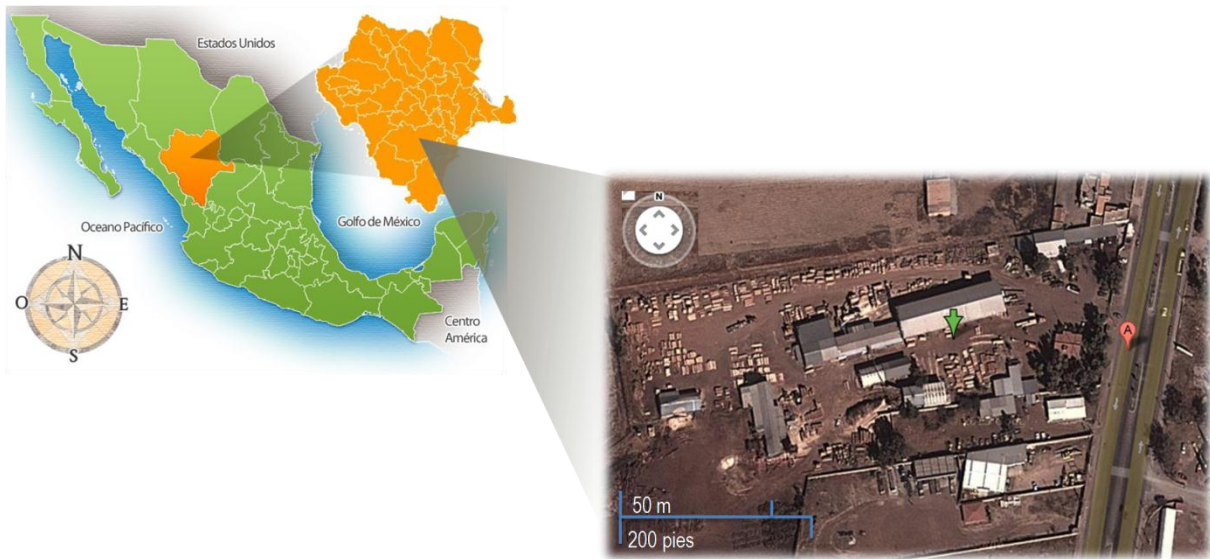


Figura 1. Localización de la empresa.

Área de aserrío

Zona de transformación de madera en rollo a madera aserrada, el cual está conformado por dos aserraderos uno grande y otro chico, los dos están en funcionamiento, sin embargo, el aserradero chico asierran para tableros y el grande es conforme el cliente lo pide tablas y/o tablones. Por consecuente, la evaluación de los residuos realizada en el aserradero grande, que posee una capacidad de aserrío de unmetro cubico por cada millar por turno de trabajo, con una capacidad de producción mínimo de 18 a 22 mil m³. Este aserradero utiliza sierras cintas de las siguientes medidas: para la torre principal de ocho pulgadas de calibre 17, con diente

astillador y un paso del diente 1 $\frac{3}{4}$ ". Para la reaserradora de seis pulgadas calibre 18 con paso 1 $\frac{3}{4}$ " sin diente.

El tipo de aserrío que se emplea es para lograr un asierre óptimo, empleando diferentes métodos y técnicas para elaborar diagramas de corte. En el aserradero en estudio se utiliza el patrón de asierre por volteo, ya sea por el método de cortes tangenciales o el de asierre al cuarto (Figura 2). El primer método es el más común para procesar la madera de pino debido a que maximiza la producción de piezas de clase N° 3 y mejores, y se emplea para especies que exhiben en la cara de las piezas de la veta de la madera. El asierre al cuarto o radial se aplica para algunas maderas duras o cuando se desea que la cara de la pieza exhiba los radios medulares de la madera, como en el caso de la madera de encino. Sin embargo, los cortes que se realizan en el aserradero de forestal Vizcaya dependen de dos factores principales: las características de la troza y los pedidos de los clientes; en este último caso y debido a que, Forestal Vizcaya maquila a seis empresas: "TODO EN TABLEROS", "FER" (Forestal Vizcaya y Ernesto Rosas), "FORESTAL LÍDER", "PRODUCTORA DE TRIPLAY", "TEODORO RODRÍGUEZ" y "FORESTAL LOBO", es común realizar un aserrío en función de las características contratadas. Además hay que destacar en este punto que la producción diaria de la madera en rollo depende de la calidad de la troza ya que esta puede variar considerando el cliente, ejemplo: la empresa "TODO EN TABLERO" la troza es de calidad con una producción en un turno de 99,486 m³ año 2014, en comparación con el producto de la empresa "PRODUCTORA DE TRIPLAY" con una producción de 61,816 m³ año 2013.

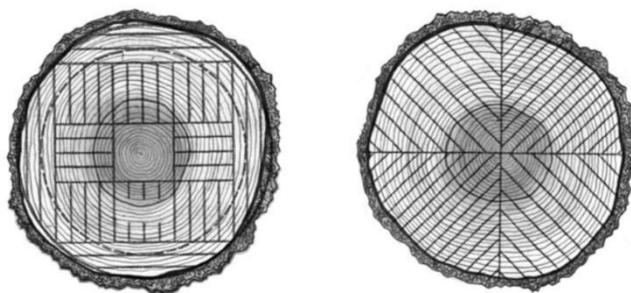


Figura 2. Patrones de asierre. De izquierda a derecha, asierre tangencial y asierre al cuarto.

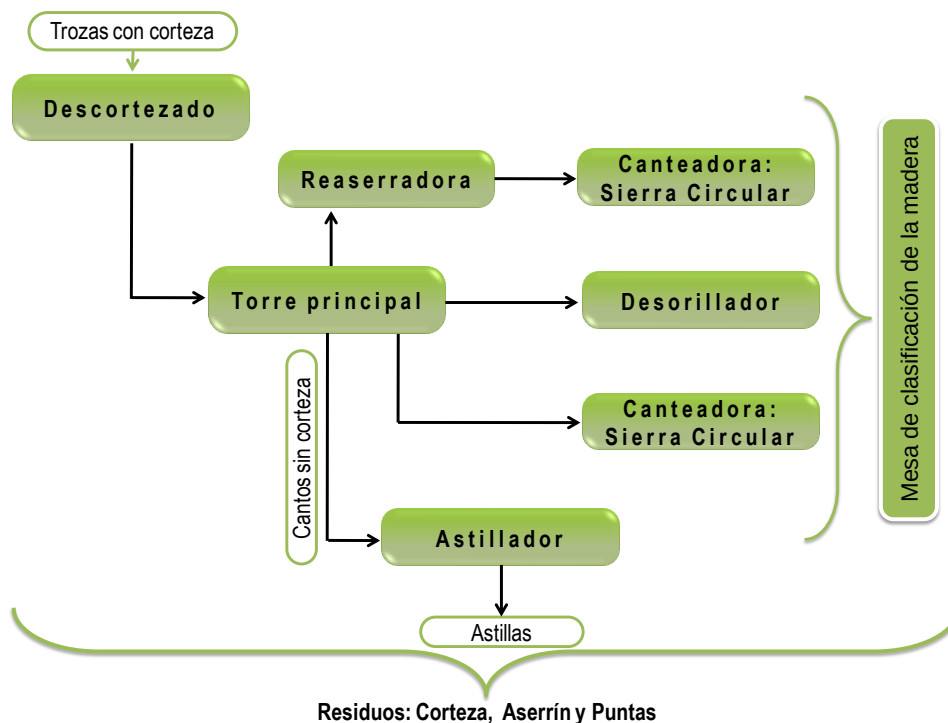
Las etapas del proceso de aserrío empleadas son: aserrío, saneamiento, dimensionado, clasificado y apilado. En la clasificación, la mesa de clasificación está acondicionada únicamente para recibir la madera de largas longitudes, la madera de cortas longitudes se empaqueta antes de pasar por esta área de trabajo sin hacer

una separación en clases y se vende toda junta como *millrun*. Para la clasificación se realiza una inspección rápida y completa de la pieza de madera bajo normas y criterios establecidos para su comercialización. El clasificador observa la pieza por ambas caras, los cantos y los extremos para verificar que los espesores y anchos coincidan con las medidas comerciales frecuentes, incluidos los refuerzos.

Área de secado

El proceso de secado de la madera permite cumplir con la normatividad y las exigencias de los estándares de los mercados, así como acceder a otros nichos comerciales: molduras, muebles, pisos, tarimas y otros productos. Para realizar el secado de la madera existen dos formas: al aire libre y en cámaras de secado (estufado), en las cuales la madera es ingresada en paquetes y variando las condiciones de temperatura y humedad se logra la disminución del contenido de humedad en rangos entre el 8 y 12%. Por lo que Forestal Vizcaya cuenta con dos estufas con capacidad de 10 000 a 20 000 pies tabla, con controles automatizados.

En el Esquema 5, se muestra el croquis del aserradero permanente elevado de la empresa Forestal Vizcaya incorporando la descortezadora y la astilladora.



Esquema 5. Croquis del aserradero permanente elevado de la empresa Forestal Vizcaya.

8.2 Cuantificación de la biomasa generada (corteza, aserrín, virutas) para su posible uso en la cogeneración de energía.

Este estudio se basa en la obtención de información sobre el estado actual de los residuos de la empresa maderera Forestal Vizcaya en la que se enfoca el presente trabajo. Para determinar la cuantificación de los residuos del proceso de aserrío, se estructuró una entrevista dirigida al jefe de aserradero, con el objeto de conocer como han sido utilizados dicho residuos; se contemplaron los siguientes aspectos: abastecimiento de materia prima, infraestructura, maquinaria y equipos, producción, productos elaborados, personal, capacitación, detección de problemas frecuentes, y la utilidad de los residuos de aserrío (Figura 3).



1. Abastecimiento de madera



2. Infraestructura, maquinaria y equipo



3. Producción



4. Productos elaborados



5. Utilidad de los residuos

Figura 3. Aspectos considerados en el análisis de la empresa forestal.

Estimación residual.

Estimación del volumen de corteza.

Estimar el volumen de corteza que se genera en esta empresa, permitirá conocer de cuanta materia se dispone para proponer alguna vía de aprovechamiento. El cálculo del volumen se realizó al finalizar el primer turno de dos en un periodo de 24 horas, el residuo corteza fue colocado en la caja de un camión, el cual tiene una capacidad de 30 m³, esto con la finalidad de no entorpecer con las actividades de la empresa.

Estimación del volumen de costeras y despuntes

El volumen de costeras y despuntes se consideraron de forma separada, dado que en su conjunto se le denominan residuos sólidos. La estimación de cada uno de ellos se realizó con la fórmula para cubicar leña, aplicándole un factor de espacio (Reyes, 2013).

La fórmula es la siguiente:

$$V = a * l * h * fe$$

Dónde:

V = volumen de residuo (m³).

a = ancho del apilamiento del residuo en metros

l = longitud del residuo en metros

h = altura del residuo en metros

fe = factor de espacio (0.784).

Estimación del volumen de aserrín.

El aserrín es uno de los residuos más complejos de estimar debido a su tamaño, para ello se optó el mismo procedimiento realizado en el residuo corteza. Todo el aserrín generado en el aserradero es transportado por una banda hacia una tolva la cual estaba abierta para que este fuera depositado directamente en la caja del camión.

Una vez determinado el volumen de los residuos, según Lesme y Oliva (S/F), se utilizan determinados conceptos y coeficientes que estiman la relación entre la cantidad de subproductos y el producto final obtenido, como: el coeficiente de residuo y el coeficiente de disponibilidad, los cuales varían con las prácticas culturales y las características climáticas de cada región.

Coeficiente de residuos (C_R): relación entre las cantidades de residuos totales y la masa de cosecha con humedad de campo.

Coeficiente de disponibilidad (C_D): relación entre la cantidad de residuos disponibles y la masa total de residuos.

Para determinar la masa de residuos (M) por unidad de volumen, se tomó la densidad aparente del aserrín y la densidad de corteza. Para la determinación del volumen de residuos se multiplicó la cantidad de madera elaborada en el año por el coeficiente total de residuos.

Muestreo de la biomasa generada en el aserradero.

Para los estudios de caracterización de biomasa se tomaron muestras de la maquinaria existente en el aserradero; sierra banda, canteadora, desorilladora, transportadora y astilladora, debido al tipo de aserrín que se genera en cada una de ellas, también se tomaron muestras de la descortezadora. Por lo que se obtuvo un total de 40 muestras (Tabla 8). Las muestras fueron recolectadas en bolsas con cierre hermético y etiquetadas para su transporte.

Tabla 8. Total de muestras de subproductos obtenidas en el aserradero.

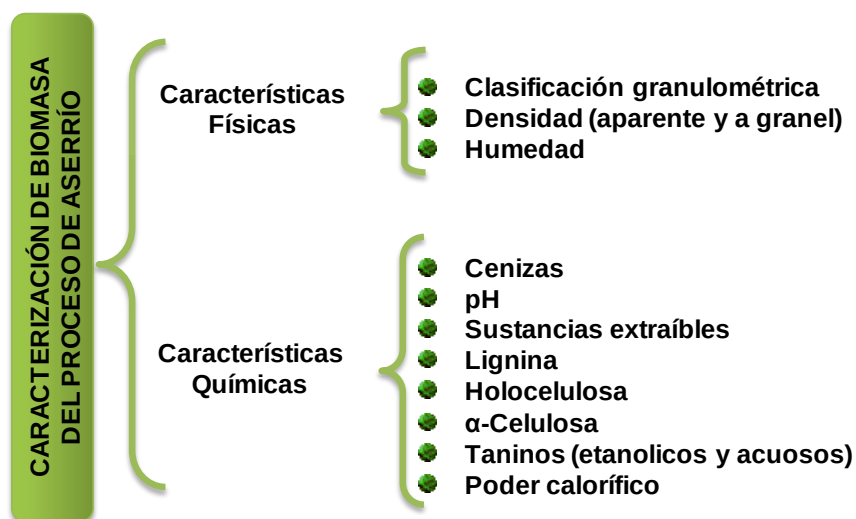
Muestras	Número de muestras
Aserrín- Astillador	11
Aserrín-Sierra banda	5
Aserrín-Desorilladora	5
Aserrín-Canteadora	5
Aserrín-Transportadora	3
Corteza	11
Total	40



Figura 4. Muestras recolectas en la empresa Forestal Vizcaya para su caracterización.

Caracterización de la biomasa generada en la industria.

Las pruebas de caracterización química de biomasa son básicas en los análisis de los procesos de transformación de energía, debido a que determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar. Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar. Por lo tanto, en el Esquema 6 se observa la caracterización para la biomasa residual del proceso de aserrío:



Esquema 6. Esquema general de la caracterización de biomasa del proceso de aserrío.

Características Físicas.

1. Clasificación Granulométrica. Para su realización se basó en la Norma UNE-EN 15149-2:2011. Biocombustibles sólidos. Se utilizaron una serie de tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agregó 50 g de muestra de aserrín y corteza según lo marca la norma UNE-CEN/TS 14778-1:2007 EX. La columna de tamices se sometió a vibración y movimientos rotatorios intensos en un agitador de tamices Marca RC-TAP modelo RX-29. Pasando un minuto, se retiraron los tamices y se desensamblaron, tomando por separado los pesos de la muestra de aserrín y corteza retenida en cada uno de ellos (Figura 5).



Figura 5. a, Agitador de tamices. b, Partículas de aserrín y corteza retenidas en los tamices.

2. Densidades. Para valorizar la biomasa residual del proceso de aserrío, se determinaron dos tipos de densidades:

- ◆ **Densidad básica.** En la determinación de la Densidad básica se utilizó la norma SCAN-CM 43:95, y la técnica de Diana Smith (1954). Tomando de cada muestra cuatro gramos, los cuales, se colocaron en un vaso de precipitado agregando agua hasta saturarla. Para retirar el exceso de humedad se realizó un centrifugado, en una centrifuga digital a 2000 rpm en un tiempo de dos segundos y así obtener el peso verde. Seguido se colocó la muestra saturada en una estufa de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ por un periodo de 24 horas, obteniendo así el peso seco. Se realizaron tres repeticiones de 24, 48 y 144 horas (Figura 6). El cálculo de la Densidad básica se realizó con la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{1}{\frac{P_m + P_{es}}{P_{es}} + \frac{1}{G_s}}$$

Dónde:

ρ_b . Densidad básica

P_m . Peso al máximo contenido de humedad.

P_{es} . Peso seco a la estufa

G_s . Densidad específica de 1.53 g/cm³ (Panshin y De Zeeuw, 1970).

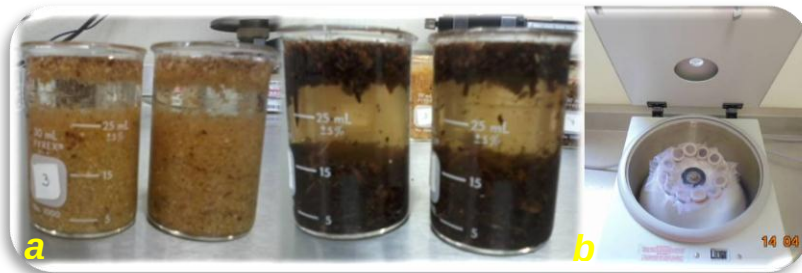


Figura 6.a, Muestras saturadas en agua, aserrín y corteza. **b,** centrifugado de las muestras.

- ◆ **Densidad a granel**(BulkDensity). Para su determinación se utilizó la metodología de Suzhou (2008), empleando los datos obtenidos de la Densidad básica y con el factor de abultamiento (Tabla 9) determinando la densidad con la fórmula siguiente. También con base a la norma europea EN 15103:2009, se determinó la densidad a granel mediante el uso de un recipiente con un volumen de 1050 cm³. El cálculo se realizó a partir del peso neto entre el volumen.

$$B_D = \frac{1}{F} * D_{basic} \left(\frac{100}{100 - MC_{wt}} \right)$$

Dónde:

B_D . Bulkdensity (Densidad a granel)

D_{basic} . Densidad básica

MC_{wt} . Contenido de humedad base seca.

F . Factor de abultamiento (Tabla 9).

Tabla 9. Factor de abultamiento residual.

Combustible de Madera	Tamaño de partículas	F
Virutas	Medio (<60 mm)	2-3 (2.50)
Virutas	Fino (<30 mm)	2-3 (2.50)
Virutas	Grande (<1000 mm)	3
Residuos de muebles		6.0
Corteza triturada		3.3–4.0
Virutas para pulpeo (suelta)		2.86
Virutas para pulpeo(compactada)		2.50
Aserrín		2.50
Cepillo		4.00

Suzhou, 2008 y www.ruraltech.org

3. Porcentaje de humedad. Para la determinación del porcentaje de humedad se apoyó con la norma T 264 cm-97 (TAPPI, 2000a), tomando muestras de cada biomasa generada en los diferentes proceso del aserrío, registrando un peso inicial, posteriormente se colocaron en la estufa de secado a $105^{\circ}\text{C} \pm 5$ por un tiempo de 24 horas, hasta peso constante. El cálculo se determinara con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Peso inicial} - \text{Pesofinal}}{\text{Peso inicial}} \right) 100$$

Características Químicas.

Para la composición química, los análisis químicos se realizaron a partir de las muestras obtenidas de las diferentes maquinarias del proceso de aserrío incluyendo el descortezador. Los aserrines y la corteza se secaron a temperatura ambiente y se molieron en un mini molino Wiley modelo 3383-LO, de acuerdo con la norma T 257 om-85 (TAPPI, 1985), se tamizaron con tamices de acero inoxidable Montinox (Figura 7), los análisis químicos se realizaron con la harina que paso por la malla 20 y 40. La harina se almacenó en envases pet debidamente cerrados para evitar cualquier contaminación y absorción de humedad. Cada uno de las determinaciones se realizó por duplicado.



Figura 7. Molino y tamices para la obtención de la harina a tamaño de partículas malla 20 y 40.

Antes de iniciar la caracterización química se determinó el porcentaje de humedad de las harinas, según lo marca la norma T 264 cm-97 (TAPPI, 2000a). La humedad sirvió para presentar los resultados de los análisis químicos con base a su peso seco.

1. pH. Para su determinación se basó en el método de Sandermann y Rothkamm (1959); dos gramos de harina sin extraer, se colocaron en un vaso de precipitado con 20 ml de agua destilada, registrando la lectura inicial del pH con un potenciómetro marca HANNA (Figura 8) y se volvió a tomar a los cinco minutos, a las cuatro horas, a las 24 horas y a las 48 horas de comenzada la medición.



Figura 8. Potenciómetro para determinar el valor de pH.

2. Materia inorgánica. El contenido de este material inorgánico se calculó gravimétricamente, una vez quedadas cuidadosamente dos gramos de harina de madera sin extraer en un crisol de níquel, sobre una placa de calentamiento hasta el cese de desprendimiento de humo, para su posterior calcinación en una mufla a 525

°C por un periodo de cuatro horas (Figura 9), el proceso y cálculo del material inorgánico se realizó de acuerdo con la norma T 211 om-93 (TAPPI, 2000b).

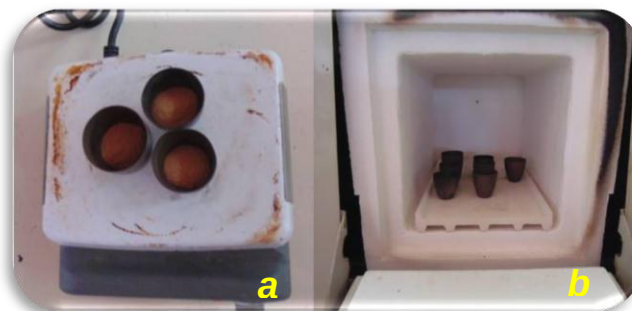


Figura 9.a, Crisoles de níquel sobre placa de calentamiento. b, Crisoles dentro de la mufla.

Contenido de minerales

Para la identificación de los elementos presentes en la materia inorgánica, se realizó el microanálisis cualitativo en un espectrómetro de rayos X acoplado a un microscopio electrónico de barrido (Jeol, modelo JSM6400). Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 kV y 8.5 segundos, obteniéndose los espectros respectivos en puntos aleatorios eliminando el Carbono y el Oxígeno que pudieran haber quedado como residuos de los componentes orgánicos.

3. Sustancias Extraíbles. Para determinar la cantidad total de sustancias extraíbles, en 9.500 g de harina de madera se aplicó una secuencia de extracción Soxhlet con solventes de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol, finalizando el ciclo de extracciones con agua caliente a reflujo. Los periodos de extracción fueron de seis horas. Los solventes se recuperaron en unrotavaporaplicando vacío y el extracto respectivo se colocó en un desecador con gel de sílice como agente desecante, hasta obtener peso constante (Figura 10). El contenido de extraíbles para cada solvente se calculó dividiendo el peso del extracto anhidro entre el peso de la harina anhidra referido porcentualmente. Los extraíble totales se calcularon con la suma de los porcentajes de los extraíbles de cada solvente. La harina de madera después de cada extracción sucesiva, se designó como harina libre de extraíbles (Holmbom, 1999). La harina libre de extractos se empleó para determinar lignina y holocelulosa.



Figura 10. a, Extracción de corteza y madera en equipo Soxhlet. b, Destilación de solventes en rotavapor. c, Extracto en matraces dentro del desecador.

4. Lignina. Se utilizó la técnica de Runkel y Wilke (1951), para determinar el contenido de lignina del aserrín y corteza. A una muestra de dos gramos de harina libre de extractos se le agregaron 50 ml de ácido sulfúrico al 72% y 5 ml de ácido bromhídrico al 40%, manteniéndose en reposo por un tiempo de dos horas. Pasado el tiempo se le añadió 200 ml de agua destilada y se estuvo agitando con una vara de cristal. Posteriormente, se hirvió por cinco minutos. La solución se decantó y se filtró a través de un crisol de porcelana ajustándole papel filtro. Se lavó la muestra con agua caliente y se aplicó vacío para retirar el excedente de agua, luego se colocó la muestra en la estufa a una temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ por un lapso de 12 horas. y al finalizar la muestra se colocó en un desecador con gel de sílice como agente desecante, hasta obtener peso constante (Figura 11).

El porcentaje de lignina se calculósiguiendo la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Lignina} = \frac{\text{Peso Lignina}}{\text{Pesoanhidrodelamuestra}} \times 100$$

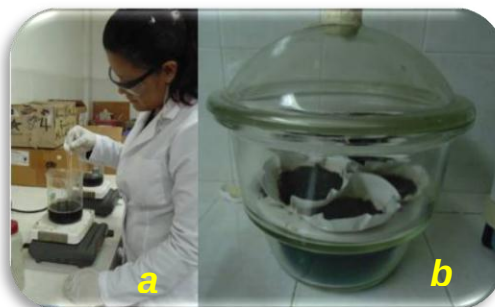


Figura 11. a, Proceso de obtención de Lignina. b, Lignina en papel filtro dentro del desecador.

5. Holocelulosa. Se pesaron dos gramos de harina libre de extractos en una balanza con precisión de 0.0001 gramos, en un Erlenmeyer de 250 ml de capacidad y se le añaden 64 ml de agua destilada agregando cuatro gotas de ácido acético glacial (CH_3COOH) y 0.6 g de clorito de sodio (NaClO_2). Se cubrió con papel contac y se pusieron en baño María a una temperatura de 75 °C, se agitaron esporádicamente. Este proceso se repitió hasta que la muestra se tornó blanca. Se filtró a través de un crisol de porcelana ajustándole un papel filtro se lavó con agua destilada caliente hasta eliminar la coloración amarillenta, posteriormente se selló la muestra con 15 ml de acetona se volvió a lavar y se dejó secar a 40 °C. Una vez seca la muestra se colocó en un desecador hasta obtener peso constante (Wise, 1946) (Figura 12). El porcentaje de holocelulosa se calculó de acuerdo con la expresión:

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{\text{Peso Holocelulosa}}{\text{Peso seco calculado de la muestra}} \times 100$$



Figura 12. a, Muestras en baño María para la obtención de Holocelulosa. b, Holocelulosa en vasos de precipitado.

6. α -Celulosa. Se tomó un gramo de holocelulosa y se transfirió a un vaso de precipitado de 200 ml, se agregó cinco mililitros de Hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5%, se agitó y dejó reposar por cinco minutos. Pasado el tiempo se le agregó 2.5 ml de NaOH al 17.5%, se agitó y dejó reposar cinco minutos. Nuevamente se le agregan 2.5 ml de NaOH al 17.5%, se agitó y dejó reposar cinco minutos. Se agregó de nuevo 2.5 ml de NaOH al 17.5%, se agitó y dejó reposar 30 min. Se agregó 16.5 ml de agua destilada, se agitó y dejó reposar por una hora. Se filtró al vacío con papel filtro previamente pesado, luego se lavado con 50 ml de NaOH al 83%, se volvió a lavar pero ahora con agua destilada, se dejó de aplicar vacío y se cubrió la muestra con 10 ml de ácido acético al 10% y después de tres minutos se

aplicóvacíoy se lavó con agua destilada hasta neutralizar (Figura 13). Terminado proceso la muestra se colocó en la estufa a $102\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5$ Una vez seca la muestra se colocó en un desecador hasta obtener peso constante (ASTM D1103-60, 1981). El porcentaje de α -Celulosa se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \alpha\text{Celulosa} = \frac{\text{Peso seco del residuo}}{\text{Peso seco calculado de la muestra}} \times 100$$



Figura 13. Determinación de la α -Celulosa.

7. Extracción de Taninos. Se obtuvieron extractos en etanol al 96% y en agua caliente. En los taninosetanólicos se utilizaron 10 g de harina base húmeda, se colocaron en un Erlenmeyer de un litro añadiendo además 50 ml de etanol al 96% y 50 ml de agua destilada (1:1), se dejó en agitación durante 24 h y se filtró sobre papel filtro y repitió el proceso una vez más. El licor obtenido se colocó en baño María hasta eliminar el olor del etanol y obteniendo un extracto acuoso concentrado, a partir del cual se realizaron los análisis (Pedraza y Rutiaga, 2011).

Para los taninos acuosos se utilizaron 20 g de harina base seca y 200 ml de agua destilada, se calentó a ebullición y reflujo durante una hora, se filtró sobre papel filtro, se repitió nuevamente el proceso y el extracto obtenido se concentró hasta obtener un volumen de 100 ml.

Extracto total

50 ml de filtrado se depositaron en un crisol de porcelana y se sometió a calentamiento en estufa de secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5$ hasta sequedad (Figura 14). El residuo obtenido se le conoce como extracto total y para obtener su porcentaje se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Extracto total} = \frac{\text{Peso del residuo} - \text{Factor de dilución}}{\text{Peso seco de la muestra}} \times 100$$

No. de Stiasny

Los 50 ml restantes de la extracción se hicieron reaccionar con 10 ml de formaldehído en medio ácido (5 ml de HCl) dentro de un matraz de fondo redondo bajo reflujo durante 30 minutos; el licor se filtró aplicando vacío y el filtrado se secó en estufa a 105 °C hasta peso constante (Figura 14). Para determinar el porcentaje de No. de Stiasny se aplicó la fórmula siguiente:

$$\% \text{ No de Stiasny} = \frac{\text{Peso del residuo}}{\text{Peso del residuo Extrato total}} \times 100$$

Y el porcentaje de Taninos se obtiene a partir de:

$$\% \text{ Taninos} = \frac{\% \text{ Extracto total} \times \% \text{ No de Stiasny}}{100}$$

Taninos hidrolizables

A 10 ml del filtrado de la prueba de Stiasny se le agregaron un mililitro de sulfato férrico al 1% y 0.05 g de acetato de sodio. Esta prueba es una determinación cualitativa de coloración, por lo que la aparición de un color azul violeta indica la presencia de estos taninos (Figura 14).

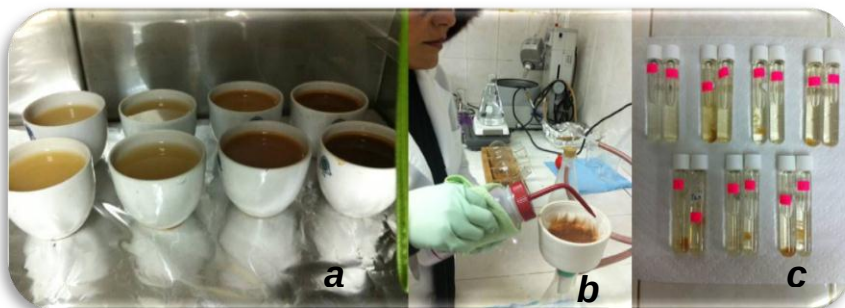


Figura 14. a, Extracto total. b, Filtrado al vacío para obtener No de Stiasny. c, Taninos hidrolizables (sin presencia de coloración).

8. Poder calórico. Las formulas empleadas para determinar el Poder Calorífico Neto (PCN) de los biocombustibles de origen forestal, medidos en MJ/kg, fueron en función a la metodología utilizada por Suzhou (2008), con base a las humedades medidas en base seca (h) y base húmeda (H):

$$h = \left(\frac{P_h - P_o}{P_o} \right) 100 \quad y \quad H = \left(\frac{P_h - P_o}{P_h} \right) 100$$

Obteniéndose para el PCN de un biocombustible solido medido en MJ/kg, en función de las humedades en base seca y base húmeda las siguientes fórmulas:

Poder calórico neto (base seca)

$$PCN = 18.67 - 0.02452\%H_{bs}$$

Poder calórico neto (base húmeda)

$$PCN = 18.67 \left(1 - \frac{\% H_{bh}}{100} \right) - 0.02452\%H_{bh}$$

Análisis estadístico.

Con el fin de determinar si existen diferencias entre cada una de las variables evaluadas, se aplicó un análisis de varianza a 95% de confianza estadística y los valores medios se compararon con una prueba de rangos múltiples con el método LSD ($p < 0.05$). Los resultados se procesaron mediante el programa STATISTICA 7.

8.3 Análisis de la viabilidad técnica de la cogeneración de energía a través de la biomasa forestal generada en la industria.

La siguiente metodología para el análisis de la viabilidad se realizó con base al documento “Potencial de biomasa forestal” por Bertrán y Morales (2008).

Con la información el volumen de biomasa y el poder calorífico, se puede obtener la energía eléctrica MWh atribuible a cada residuo forestal:

$$MWh_r = Gcal * 1.163 \frac{MWh}{Gcal} * FA * n_r$$

Dónde:

$Gcal$, Contenido de poder calorífico,

n_r , Eficiencia eléctrica de la CFE,

FA , Factor de Aprovechamiento de los residuos.

También se determinará la estimación de la potencia instalable teórica, con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Sumatoria } MWh_r}{X} = \text{Potencia Instalable Teórica}$$

Dónde:

X , es el número de horas anuales de operación.

Una vez determinada la potencia instalable teórica, se procede a determinar la potencia instalable factible. El factor de utilización refleja el porcentaje de biomasa que se estima viable de utilizar para la generación.

$$PotenciaInstalableFactible = PotenciaInstalableTeorica * FactordeUtilización$$

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Cuantificación de la biomasa

La compañía maderera Forestal Vizcaya, S. de R. L. de C. V., maquila a seis empresas, por lo que el volumen que ingresa al patio varía dependiendo del cliente, por ejemplo, la empresa “TODO EN TABLEROS” ingresó al patio en año 2014 193.111m³ de madera en rollo de buena calidad comparado con la compañía “PRODUCTORA DE TRIPLAY” que es de 113.348m³ de madera en rollo de mala calidad en el año 2013.

Los resultados obtenidos de la cuantificación de residuos, en un turno de ocho horas con una producción de madera aserrada son de 64.315 m³, se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Cuantificación de los residuos de la empresa Forestal Vizcaya.

Residuos	Cantidad (m ³)
Corteza	30.00
Puntas	8.14
Astillas	45.00
Aserrín	30.92
Total	114.06

El total de residuos que genera la empresa es de 114.06 m³, lo que anualmente correspondería a 29,769.66 m³. Cabe resaltar que algunos residuos son comercializados por la propia industria, como en el caso de las puntas son vendidas a los propios trabajadores y el producto astillas es vendida a la industria de primera transformación. Por ello, sólo se tomó en cuenta el residuo de desecho (corteza 30 m³ y aserrín 30.92 m³), que corresponde a 60.92m³ por día y anualmente sería un total de 31,800.76m³ (5,297.39 Ton/año). Comparando los resultados obtenidos con el estudio realizado al Ejido El Largo y al Ejido El Balcón con una cuantificación de residuos de 7,300 y 4,500 Ton/año respectivamente (CONAFOR, 2012), los 5,297 Ton/año de Forestal Vizcaya son aptos para la generación de energía eléctrica.

Coeficientes

Con la determinación del volumen de la biomasa forestal generada en la empresa Forestal Vizcaya, se arrojaron los coeficientes de residuo los cuales aparecen en la Tabla 11. Para la determinación de la masa total de residuos se tomó la densidad aparente del aserrín de 150.65 kg/m^3 y la densidad de la corteza 183 kg/m^3 .

Tabla 11. Coeficiente de residuos (CR) y coeficiente de disponibilidad (CD) de biomasa generada en el aserradero.

Residuo	Coeficiente
CR _{corteza}	0.466
CR _{Aserrín}	0.481
CR _{Total}	0.947
CD _{corteza}	0.822
CD _{Aserrín}	0.861
Masa total de residuos	
M _{corteza}	5,500.80 kg/m^3
M _{Aserrín}	4,658.25 kg/m^3
M _{Total}	10,159.05 kg/m^3

Los resultados muestran que en la empresa en estudio, existen residuos de desecho equivalentes a 5,297 Ton, que si los utilizara para la generación de energía eléctrica sustituiría 2,350 Ton de petróleo, las cuales equivaldrían a 98 Terajoules de energía al año (Tabla 12).

Tabla 12. Potencial energético de los residuos cuantificados en la empresa Forestal Vizcaya.

Indicadores	Valores
Volumen de corteza ($\text{m}^3/\text{año}$)	7,830.00
Volumen de aserrín ($\text{m}^3/\text{año}$)	8,070.38
Total de Residuos (Ton)	5,297.39
Disponibilidad horaria de residuos (Kg/s)	1.17
Potencial Anual (TJ)	98.38
Petróleo Equivalente (Ton)	2,350.03

9.2 Caracterización física de biomasa del proceso de aserrío

Granulometría

El porcentaje de corteza retenida en cuatro de seis tamices, no presentaron diferencias estadísticamente significativas correspondiente a las partículas entre los tamices 16.00 y 8.00 mm (Figura 15). El mayor número de partículas de corteza (39.11 %) corresponde al tamiz 31.50 mm que si bien podría ser aprovechado para la obtención de pellets. Las partículas obtenidas presentan grandes dimensiones comparadas con las reportadas por Correa (2014) de 6.5 mm (46.18 %).

En el caso de los aserrines, para las partículas de la astilladora se presentan tres grupos en donde no existen diferencias estadísticamente significativas, las cuales son entre los tamices de >3.35, 3.35 y 0.25 mm, el otro par es entre el 2.80 y 0.50 mm y el último es entre los tamices 2.00 y 1.40 mm (Figura 15), las partículas de 1.00 mm (31.05 %) son las que presentan el mayor porcentaje. Para la sierra banda y transportadora, no existen diferencias significativas entre partículas y entre muestras ($F=8.19$). Las partículas que si presentan diferencias estadísticas para la sierra banda son entre las partículas de 1.40 y 1.00 mm y en caso de la transportadora entre 2.00 y 1.00 mm. Presentando mayor número de partículas de aserrín 45.47 % y 40.04 % (1.00 mm) respectivamente. Para el caso de la canteadora se presentan dos grupos de partículas que no presentan diferencias significativas entre los tamices >3.35 y 3.35 mm y los de 2.00 y 1.40 mm ($F=426.36$). Con mayor presencia de partículas de 1.00 mm (26.08%). Por último, en la desorilladora el mayor porcentaje de partículas fue de 32.91 (1.00 mm) y estadísticamente solo se encontró que no hay diferencias estadísticamente significativa en las partículas retenidas entre los tamices de >3.35, 3.35 y 0.25 mm.

En los que se refiere a las virutas de la desorilladora estadísticamente sólo se presentó un grupo los cuales son 3.35, 2.80, 2.00, 1.40 y 0.50 mm que no presentan diferencias estadísticamente significativas ($F=5.71$), presentando mayor porcentaje de partículas en >3.35 mm (23.77%) (Figura 15).

Evaluación de la biomasa forestal generada en el proceso de aserrío en la empresa Forestal Vizcaya S. de R. L. de C. V. ubicada en la ciudad de Durango, Dgo. Mx.

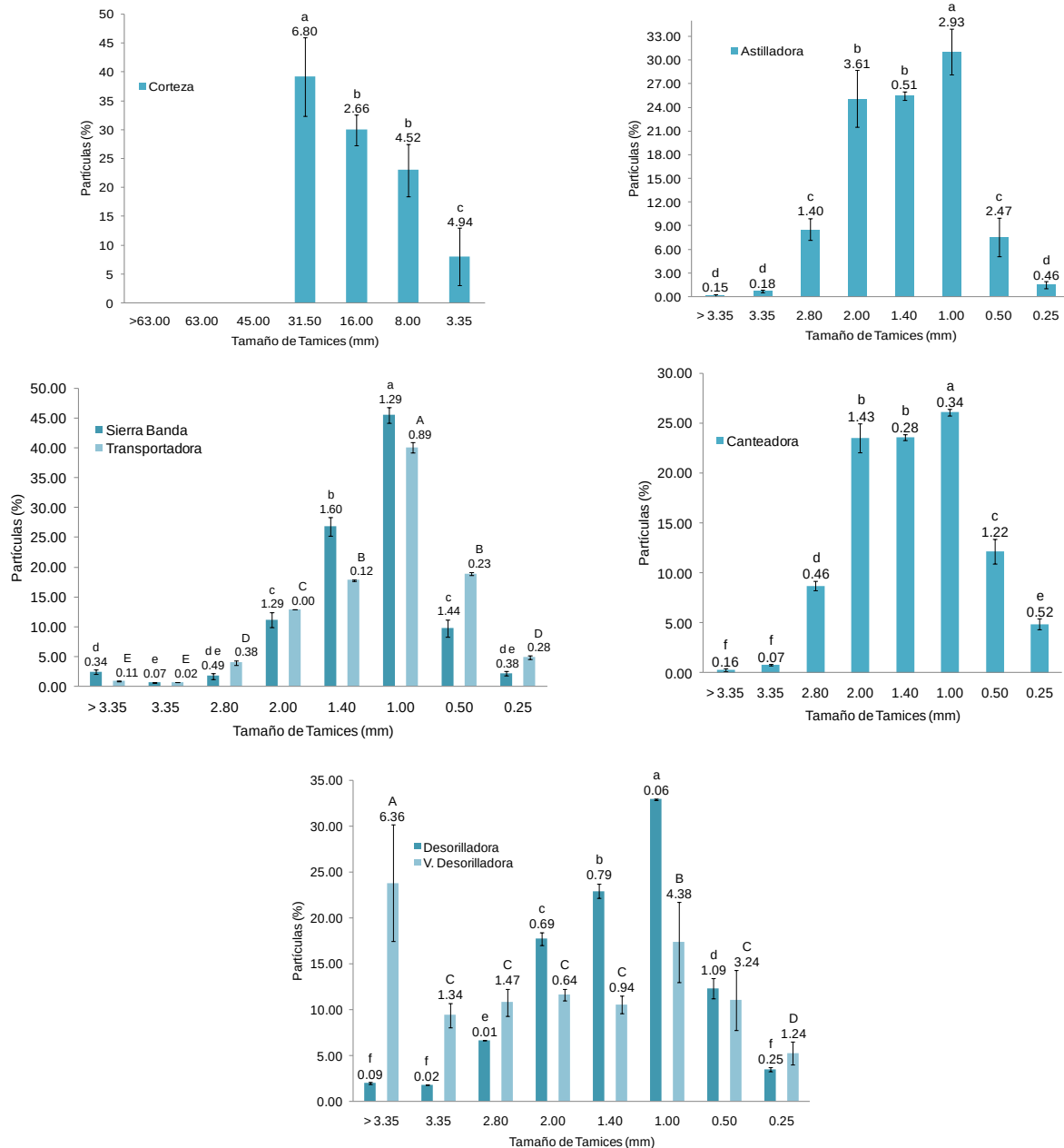


Figura 15. Distribución granulométrica de las muestras corteza y aserrines de Pinus spp en porcentaje.

El mayor porcentaje de partículas de la empresa en estudio corresponde entre los tamices 2.00 al 1.00 mm (16.99% al 32.15%) valores mayores a los sugeridos por Franke y Rey (2006), para pellets de buena calidad que pueden elaborarse con partículas de 0.5 y 0.7 mm. Sin embargo, se considera que las partículas menores o iguales a 4.00 mm pueden aprovecharse en la producción de pellets. Así mientras

más pequeña sea el tamaño de la partícula, mejor se desarrolla el proceso de densificación del combustible (Kaliyan y Vance, 2009).

Porcentaje de humedad

El porcentaje de humedad obtenido en promedio de los aserrines y de la corteza es $42.31\% \pm 5.36$ y $20.75\% \pm 5.70$, respectivamente (Tabla 13). Estos resultados están dentro del rango (10 a 60 %) reportado para biomasa por Vassilev, *et al*(2010). El análisis mostró que no hay diferencia significativa entre la sierra banda y la transportadora ($F=28.999$, $p=0.0000$) (Figura 16).

Tabla 13. Porcentaje de humedad promedio de los subproductos obtenidos del proceso de aserrío de la empresa Forestal Vizcaya.

Muestras	Maquinaria	% de humedad promedio
Aserrín	Astilladora	35.35 ± 1.92
	Sierra banda	44.06 ± 0.68
	Desorilladora	49.87 ± 2.21
	Canteadora	38.23 ± 2.23
	Transportadora	44.06 ± 0.18
Corteza	Descortezadora	20.75 ± 5.70

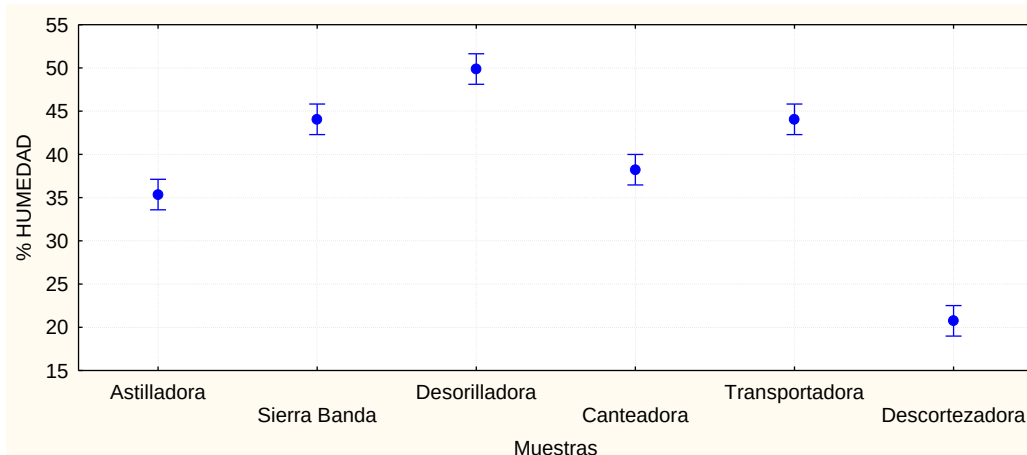


Figura 16. Comparación de medias con el método LSD para % de Humedad de las muestras de biomasa.

Posteriormente, se realizó el análisis de rangos múltiples LSD (Tabla 14), con el fin de verificar si existe diferencia significativa entre las humedades de medias de los diferentes aserrines y la corteza, mostrando un error de media entre muestras de 7.75.

Tabla 14. Prueba de rango múltiple 95% LSD para % de humedad.

Muestra	% Hum	1	2	3	4	5
Descortezadora	20.7474		****			
Astilladora	35.3527			****		
Canteadora	38.2282				****	
Transportadora	44.0569	****				
Sierra Banda	44.0577	****				
Desorilladora	49.8730					****

Densidad

La *Densidad Básica* para los aserrines y la corteza saturando la muestra a 24 h, es de $239.39 \text{ kg/m}^3 \pm 0.06$ y $312.55 \text{ kg/m}^3 \pm 0.00$ respectivamente. En el caso de las muestras a 48 h el promedio de los aserrines es de $212.46 \text{ kg/m}^3 \pm 0.04$ y de corteza $298.32 \text{ kg/m}^3 \pm 0.01$ y por último la densidad básica saturando la muestra de humedad por espacio de 144 h es de $231.72 \text{ kg/m}^3 \pm 0.03$ para aserrines y $363.17 \text{ kg/m}^3 \pm 0.00$ en corteza (Tabla 15).

Tabla 15. Densidad básica obtenida al saturar la muestra en los tiempos de 24, 48 y 144 horas.

No	Muestra	Densidad Básica (Kg/m ³)		
		24 h	48 h	144h
1	Descortezadora	312.6	298.3	363.2
2	Astilladora	344.8	285.6	250.3
3	Sierra Banda	203.0	204.6	264.0
4	Transportadora	206.7	200.4	247.1
5	Desorilladora	201.0	199.4	225.1
6	Canteadora	240.8	172.4	172.2

La Figura 17 de densidad básica a 24 horas, muestra que el aserrín de la astilladora presenta mayor densidad y le continúa la corteza. Sin embargo, se encontró que no existe diferencia estadística significativa con las muestras de

aserrín entre la sierra banda, desorilladora y transportadora ($F=16.026$, $p=0.00007$), esto se demuestra en la prueba de rangos múltiples 95% (Tabla 16).

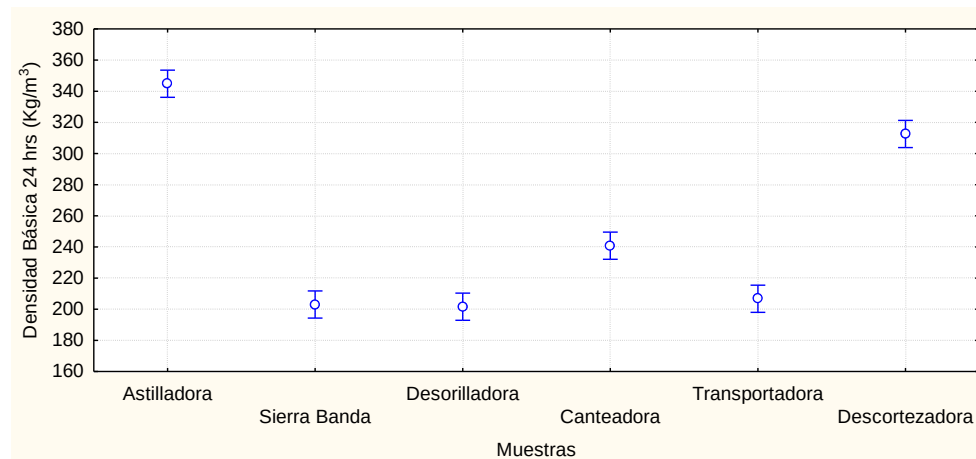


Figura 17. Comparación de medias de Densidad básica con el método LSD saturando de humedad las muestras de biomasa por 24 horas.

Tabla 16. Test de rango múltiple 95% LSD de la densidad básica saturando en agua por espacio de 24 h.

Muestra	DB 24 Mean	1	2	3	4
Desorilladora	201.6323	****			
Sierra Banda	203.0228	****			
Transportadora	206.7246	****			
Canteadora	240.7940		****		
Descortezadora	312.5522			****	
Astilladora	344.7961				****

En la siguiente Figura 18, se observan las medias de la Densidad básica saturando la muestra en 48 horas, encontrando que la corteza tiene mayor densidad básica y le sigue la astilladora debido a que esta presenta madera y corteza. Mientras se muestra que no existen diferencias significativas (F , 11.759, $p=0.00028$) entre la sierra banda, la desorilladora y la transportadora, y entre la descortezadora y la astilladora. Sin embargo, la única muestra que si tiene diferencias significativa entre las demás es la muestra proveniente de la canteadora.

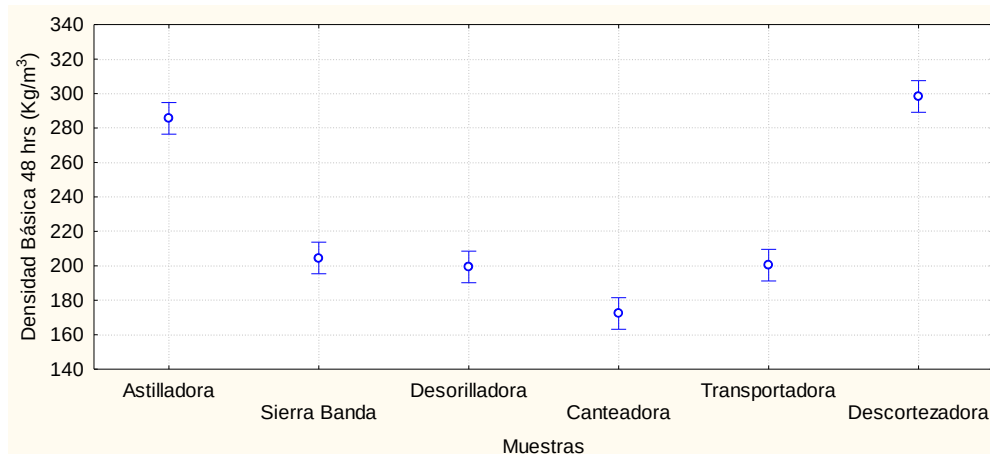


Figura 18. Método LSD muestra las medias de Densidad básica a 48h de las muestras de biomasa.

La Tabla 17, muestra la prueba de rangos múltiples del LSD con un error de media entre muestras de 28.09, para las muestras de densidad básica saturadas en agua por un tiempo de 48 horas.

Tabla 17. Prueba de rango múltiple 95% LSD. Densidad básica saturada en agua por un tiempo de 48 horas.

Muestra	DB 48 Mean	1	2	3
Canteadora	172.3552			****
Desorilladora	199.3552	****		
Transportadora	200.4153	****		
Sierra Banda	204.5922	****		
Astilladora	285.5954		****	
Descortezadora	298.3228		****	

En la Figura 19, de densidad básica saturando la muestra por un tiempo de 144 horas, se puede apreciar que no existe una diferencia estadísticamente significativa ($F, 25.810, p=0.00001$) entre las muestras de aserrín de astilladora y transportadora. La corteza de la descortezadora presenta mayor densidad básica que el resto de las muestras. La prueba LSD (Tabla 18) se muestra las diferencias estadísticamente significativas con un 95%, presentando error de media entre muestras de 9.27.

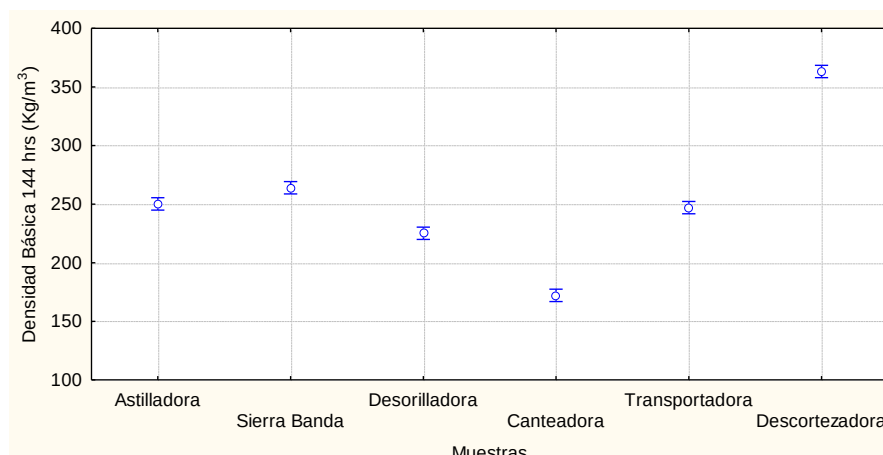


Figura 19. Método LSD para densidad básica saturada la muestra por un tiempo de 144 horas.

Tabla 18. Prueba de rango múltiple 95% LSD para densidad básica saturada la muestra en agua por 144 h.

Muestra	DB 144 Mean	1	2	3	4	5
Canteadora	172.19		****			
Desorilladora	225.10			****		
Transportadora	247.06	****				
Astilladora	250.26	****				
Sierra Banda	263.98				****	
Descortezadora	363.17					****

La *Densidad a granel* obtenida con base a la densidad básica, muestra un promedio de $166.20 \text{ kg/m}^3 \pm 0.03$ de aserrines y de corteza $146.79 \text{ kg/m}^3 \pm 0.00$ correspondiente a las muestras de 24 h. Para las muestras de 48 h tienen una densidad a granel promedio de $140.95 \text{ kg/m}^3 \pm 0.04$ para los aserrines y de corteza $140.11 \text{ kg/m}^3 \pm 0.00$ y para los aserrines y la corteza de 144 h los datos son $149.73 \text{ kg/m}^3 \pm 0.03$ y $181.45 \text{ kg/m}^3 \pm 0.00$, respectivamente (Tabla 19).

En la Figura 20 se puede apreciar la densidad a granel a 24, 48 y 144 h, el cual presentan un intervalo de confianza de 0.009, $F=20.34$ y $p=0.0000$.

Tabla 19. Determinación de la Densidad a granel en relación con la Densidad básica.

No.	Muestra	Densidad a granel (Kg/m ³)		
		24 h	48 h	144 h
1	Descortezadora	146.8	140.1	181.4
2	Astilladora	225.4	186.7	163.6
3	Sierra Banda	143.8	144.9	187.0
4	Transportadora	147.4	142.9	176.1
5	Desorilladora	165.5	163.6	115.5
6	Canteadora	148.9	66.6	106.5

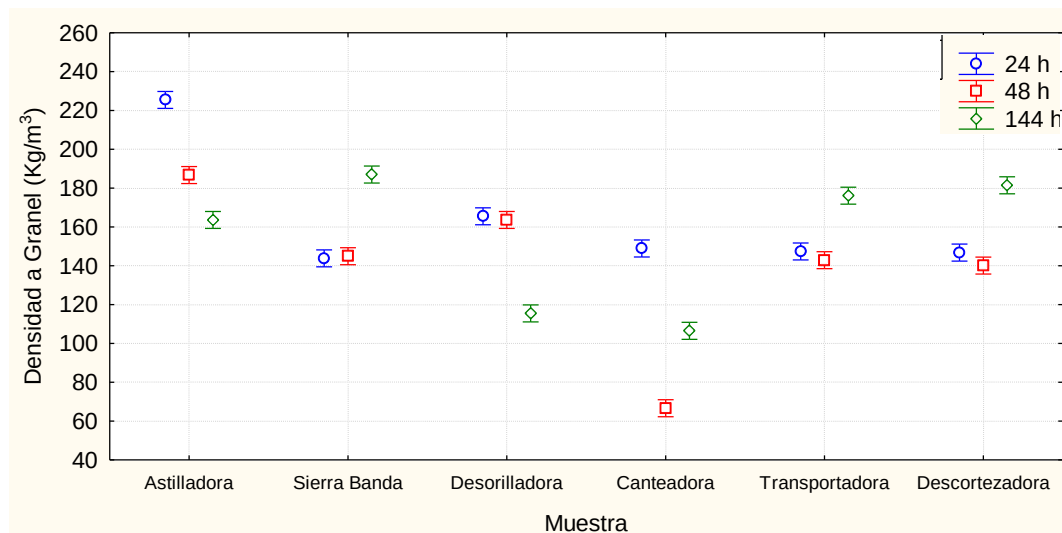


Figura 20. Diagrama de medias de la densidad a granel saturando de humedad la muestra en tiempo de 24, 48 y 144 h.

Observando que las muestras a 24 h, si hay una marcada diferencia estadísticamente significativa entre la astilladora y desorilladora. Los grupos cuyos resultados son estadísticamente iguales se aprecian en la Tabla 20. Al comparar los datos obtenidos con otras investigaciones, los datos son bajos al cotejarlos con el abeto balsámico que presenta una densidad de 223kg/m³ a una humedad de 40% (Suzhou, 2008). Huhtinen (2005) reporta un valor de 177 kg/m³ para aserrín y para corteza 230 kg/m³.

Tabla 20. Prueba de rangos múltiples LSD 95% para densidad a granel con base a la densidad básica.

Muestra	Tiempo	Densidad a Granel Mean	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Canteadora	48	66.62	****								
Canteadora	144	106.49		****							
Desorilladora	144	115.46			****						
Descortezadora	48	140.11				****					
Transportadora	48	142.87				****	****				
Sierra Banda	24	143.81				****	****				
Sierra Banda	48	144.92				****	****				
Descortezadora	24	146.79					****				
Transportadora	24	147.37					****				
Canteadora	24	148.91					****				
Desorilladora	48	163.61						****			
Astilladora	144	163.61						****			
Desorilladora	24	165.48						****			
Transportadora	144	176.11							****		
Descortezadora	144	181.45							****	****	
Astilladora	48	186.71								****	
Sierra Banda	144	186.99								****	
Astilladora	24	225.42									****

La densidad a granel obtenida con base a la norma EN 15103:2009, (Tabla 21) en promedio es de $143.74 \text{ kg/m}^3 \pm 0.01$ de aserrín y de corteza $183.36 \text{ kg/m}^3 \pm 0.05$. En la Figura 21, muestra que la muestra de la descortezadora presenta mayor densidad a granel, luego le continúa la muestra de la sierra banda, la muestra de la canteadora presenta una densidad a granel baja. Mientras que en la prueba de rangos múltiples se puede apreciar que no existen diferencias significativas entre la astilladora, sierra banda y transportadora; y entre sierra banda y descortezadora y las muestras que si presentan diferencias estadísticamente significativas son ladesorilladora y la canteadora (Tabla 22). Las densidades obtenidas en este punto son semejantes comparadas con las reportadas por Huhtinen (2005) para el caso de los aserrines ya que presenta una densidad a granel de 150 kg/m^3 ; en el caso de la corteza de pinos es de 219 kg/m^3 mayor al reportado en este trabajo.

Tabla 21. Determinación de la Densidad a granel según la norma EN 15103:2009.

No.	Muestra	Densidad a granel (Kg/m^3)
1	Descortezadora	183.36 ± 0.05
2	Astilladora	161.13 ± 0.00
3	Sierra Banda	170.83 ± 0.00
4	Transportadora	163.37 ± 0.00
5	Desorilladora	123.62 ± 0.03
6	Canteadora	99.75 ± 0.00

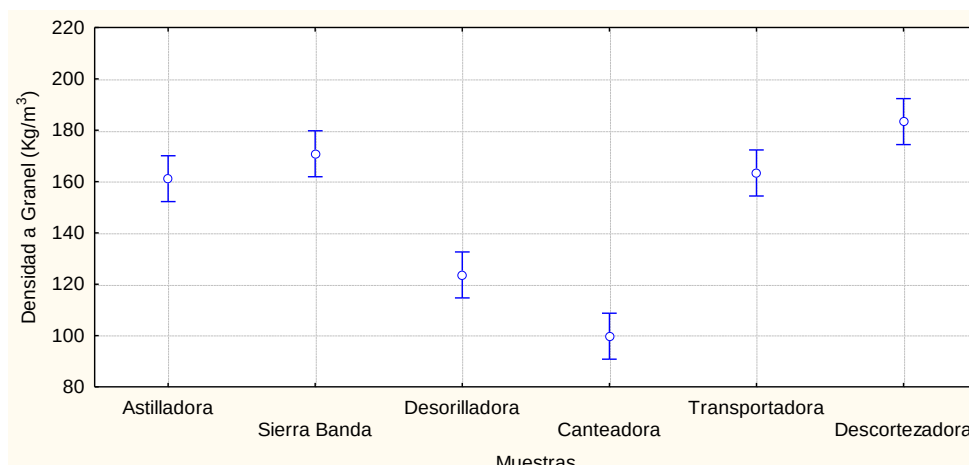


Figura 21. Se utilizó el método LSD mostrando las medias de los datos obtenidos con la norma EN 15103:2009.

Tabla 22. Prueba de rangos múltiples LSD, para densidad a granel.

Muestra	BD Mean	1	2	3	4
Canteadora	99.75			****	
Desorilladora	123.62				****
Astilladora	161.13	****			
Transportadora	163.37	****			
Sierra Banda	170.83	****	****		
Descortezadora	183.36		****		

9.3 Caracterización química de biomasa del proceso de aserrío

Cenizas

De acuerdo con la Figura 22, los mayores porcentajes de ceniza se encuentran en la corteza ($1.73\% \pm 0.08$) y en el material proveniente de la astilladora ($80.94\% \pm 0.06$) y estadísticamente si existe diferencia significativa con respecto a las demás muestras. Se marca una tendencia de pérdida de porcentaje de cenizas en los aserrines conforme no existía la presencia de corteza como es el caso de la viruta de la desorilladora que presenta en promedio $0.33\% \pm 0.01$ de cenizas si lo comparamos con el aserrín de la sierra banda con un $0.45\% \pm 0.01$ donde se observó presencia de corteza. Para el caso de la sierra banda, transportadora y desorilladoranoexiste una diferencia estadísticamente significativa, al igual que la transportadora, desorilladora, canteadora y la viruta de la desorilladora. Los valores

obtenidos en las últimas cuatro muestras estuvieron dentro del intervalo (0.4-1.0%) (Tabla 23). Reportado para algunas especies de pino (Fengel y Wegener, 1989).

La concentración de sustancias inorgánicas en las muestras estudiadas está dentro del rango reportado en la literatura (Fengel y Wegener, 1989), sin embargo, la corteza de algunas especies puede contener diez veces más sustancias inorgánicas que en su madera (Fengel y Wegener. 1989). Tomando este hecho es, que se observó mayor porcentaje de cenizas en la corteza de la máquina descortezadora, seguido por el aserrín de la astilladora debido a que ésta contenía madera y corteza.

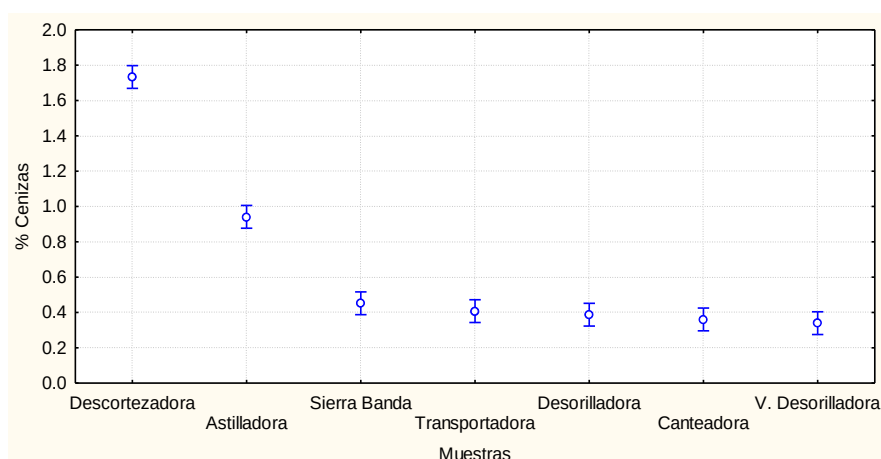


Figura 22. Medias del método LSD del porcentaje de cenizas con un intervalo de confianza de 0.95, $F=18.52$ y $p=0.00001$.

La Tabla 23, muestra dos grupos con diferencias significativas con una correlación de 0.05 y un error de media entre muestras de 0.0014.

Tabla 23. Prueba de rangos múltiples LSD para el porcentaje de cenizas.

Muestra	% Cenizas Mean	1	2	3	4
V. Desorilladora	0.3393	****			
Canteadora	0.3607	****			
Desorilladora	0.3874	****	****		
Transportadora	0.4075	****	****		
Sierra Banda	0.4522		****		
Astilladora	0.9416			****	
Descortezadora	1.7332				****

Análisis elemental y contenido de minerales

La tabla 24 muestra claramente que las muestras de corteza y aserrines contienen altos contenidos de carbono que, comprados con el hidrógeno y el oxígeno, incrementan el valor energético. El porcentaje de C, H y O de la corteza es alto comparado con lo reportado por Marcos y Núñez (2006) y el N está dentro del rango. En el aserrín el C es alto en relación con los valores reportados por Rutiaga (2001) por otro lado, el H, O, N, son bajos. El bajo contenido de nitrógeno es de especial importancia para la protección medio ambiental, con rangos de 0.4-0.5% en aserrín y en corteza 0.39%. La concentración de N en las especies es de mayor importancia debido a que durante la combustión causan emisiones gaseosas de óxidos de Nitrógeno (NOx). Las investigaciones recientes muestran que el impacto ambiental de la combustión de combustibles sólidos lo constituyen las emisiones de NOx (Nussbaumer, 2002) y este aumenta de manera proporcional con el contenido de N presente en la biomasa (Leckner, 1996).

Los minerales detectados por espectroscopia de rayos X, del microanálisis de las cenizas en corteza y en los aserrines obtenidos de las diferentes maquinas del proceso de aserrío fueron: Al, AC, B, Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Sr y Zn, los cuales se muestran en la Tabla 25. Los elementos encontrados en mayor proporción fueron calcio, potasio y magnesio principales componentes de las sustancias inorgánicas de la madera (Fengel y Wegener, 1989), también reportados en otros pinos mexicanos en ese orden de importancia (Rutiaga, 2001; Revilla, 2011).

Tabla 24. Contenido químico elemental (%) de la corteza y aserrín de *Pinusspp.*

Muestras	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno
Descortezadora	56.73	2.50	40.38	0.39
Astilladora	55.98	5.33	38.16	0.53
Sierra Banda	56.29	4.33	39.92	0.46
Transportadora	49.20	6.20	44.07	0.53
Desorilladora	54.20	5.20	40.01	0.50
Canteadora	54.33	4.95	40.31	0.41
V. Desorilladora	55.30	4.76	39.51	0.43

Tabla 25. Contenido de minerales (%) de la corteza y aserrín de *Pinus*spp.

Muestra	Minerales														
	Al	AC	B	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Sr	Zn
Descortezadora	1.14	0.00	0.13	0.08	8.37	0.01	0.60	2.53	1.24	0.33	0.06	0.00	0.55	0.05	0.05
Astilladora	1.50	0.00	0.24	0.09	7.22	0.02	0.93	2.58	1.19	0.42	0.07	0.00	0.78	0.05	0.05
Sierra Banda	0.37	0.00	0.28	0.00	13.57	0.00	0.48	7.31	2.61	1.07	0.20	0.00	1.35	0.00	0.00
Transportadora	0.41	0.08	0.00	0.11	9.58	0.01	0.44	3.31	2.25	1.14	0.15	0.50	0.45	0.09	0.11
Desorilladora	0.38	0.00	0.00	0.15	6.71	0.01	0.30	4.87	1.89	1.01	0.10	0.00	1.22	0.06	0.08
Canteadora	0.47	0.00	0.00	0.22	9.07	0.01	0.36	6.06	2.44	1.24	0.16	0.00	1.52	0.08	0.10
V. Desorilladora	0.24	0.03	0.00	0.19	11.70	0.00	0.32	4.61	1.92	1.00	0.27	0.18	0.68	0.05	0.01

pH

Estadísticamente no existen diferencias estadísticamente significativas, entre sierra banda, desorilladora, canteadora y viruta desorilladora, tampoco entre la transportadora y viruta de la desorilladora (Tabla 26). El valor de pH en la descortezadora es de 3.70 ± 0.02 y la astilladora de 3.93 ± 0.08 , menos ácido comparado con las otras cinco muestras que son moderadamente ácidas con un valor promediado de estas de 4.70, valor que se encuentra dentro de los límites que se conocen para esta especie ($F=16.55$, $p=0.00001$) (Figura 23). Los valores obtenidos en el presente trabajo para el caso de los aserrines son igual al que reporta Cea (2003) de 4.70. Sin embargo, son ligeramente más ácidos que los reportados en madera de cinco pinos del municipio de Morelia, Michoacán (pH de 4.0 a 4.4) (Bernabé, *et al*, 2013).

Los resultados de la medición del valor de pH indican que la corteza es menos ácida que la madera, esta variación de ácidos se debe a la cantidad y tipo de sustancias extraíbles presentes en la madera, específicamente por la presencia de ácidos libres y grupos de ácidos, como ácidos resínicos, siendo en general más ácido el duramen que la albura (Choon y Roffael, 1990). El pH moderadamente ácido en las maderas en estudio puede afectar su utilización: en contacto con metales puede corroer, también se puede ver afectada la fijación de sustancias preservantes, el fraguado de los adhesivos, la fabricación de tableros y productos plastificados y el proceso de pulpeo (Poblete y Roffael, 2004).



Figura 23. Muestra las medias del método LSD del pH de las siete muestras en estudio.

Tabla 26. Test de rangos múltiples 95% LSD para pH.

Muestra	pH	1	2	3	4
Descortezadora	3.6950			****	
Astilladora	3.9250				****
Transportadora	4.6250		****		
V. Desorilladora	4.6750	****	****		
Desorilladora	4.7300	****			
Canteadora	4.7350	****			
Sierra Banda	4.7450	****			

Sustancias extraíbles

De acuerdo con los datos obtenidos si existen diferencias estadísticamente significativas (Error entre medias 0.097) en el caso del solvente ciclohexano, entre descortezadora y sierra banda, también entre descortezadora y canteadora, y por último entre desorilladora y v. desorilladora. Para el caso del solvente acetona si existen diferencias significativas (Error entre medias 0.126) entre descortezadora y astilladora; sierra banda y transportadora y, entre desorilladora, canteadora y v. desorilladora. En el solvente metanol si existe diferencia estadísticamente significativa entre descortezadora y astilladora, sin embargo, no existe diferencia significativa entre las cuatro muestras de aserrines y la muestra de viruta. Por último, el agua caliente, muestra dos grupos que no existe diferencia estadísticamente significativa, el primero corresponde a Sierra banda y transportadora y el segundo sierra banda, desorilladora, canteadora y v. desorilladora. No existen diferencias estadísticamente significativas entre muestras y solventes (Tabla 27).

Los resultados, para el caso del aserrín, muestran una mayor concentración con el ciclohexano en un intervalo de 10.94% a 4.96%, seguido de los obtenidos con acetona (10.26% a 3.25%), agua caliente (4.38% a 2.22%) y metanol (3.57% a 0.74%). En la corteza la concentración menor se obtuvo en el ciclohexano (5.61%), le continua metanol (6.68%), agua caliente (9.05) y acetona (10.9%) (Figura 24). Presentando en este estudio, el mayor porcentaje de extraíbles en la corteza que en los aserrines (madera), lo que concuerda con la literatura (Fengel y Wegener, 1989).

Los resultados obtenidos (8.1-32.4%) son superiores al rango encontrado por otros autores para especies de pino (2,4% – 7,7%) (Fonseca, 2006), *P. oocarpa* (10,89%) (González, 2005), duramen de *P. pseudostrobus*(13,2%) (Rutiaga, 2001) e inferiores a los calculados en albura y duramen de *P. cembroides*, *P. maximartinezii*, *P. johannis* y *P. pinceana*(11,5% – 33,7%) (Revilla, 2011).

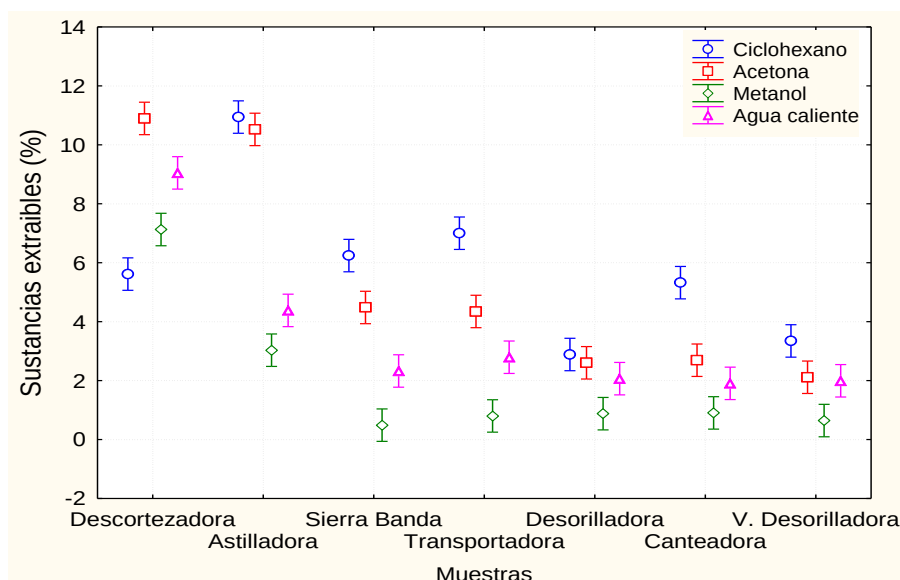


Figura 24. Medias del método LSD del porcentaje de sustancias extraíbles.

Tabla 27. Prueba de rangos múltiples 95% LSD para sustancias extraíbles.

Muestra	Reactivo	% Reactivo Mean	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Sierra Banda	Metanol	0.4885	****													
V. Desorilladora	Metanol	0.6441	****													
Transportadora	Metanol	0.8003	****													
Desorilladora	Metanol	0.8776	****													
Caneadora	Metanol	0.9036	****													
Caneadora	Agua Caliente	1.9064		****												
V. Desorilladora	Agua Caliente	1.9936		****	****											
Desorilladora	Agua Caliente	2.0658		****	****	****										
V. Desorilladora	Acetona	2.1130		****	****	****	****									
Sierra Banda	Agua Caliente	2.3263		****	****	****	****	****								
Desorilladora	Acetona	2.6036		****	****	****	****	****	****							
Caneadora	Acetona	2.6913			****	****	****	****	****							
Transportadora	Agua Caliente	2.7928				****	****	****	****							
Desorilladora	Ciclohexano	2.8855					****	****	****							
Astilladora	Metanol	3.0316						****	****							
V. Desorilladora	Ciclohexano	3.3457							****							
Transportadora	Acetona	4.3456								****						
Astilladora	Agua Caliente	4.3814								****						
Sierra Banda	Acetona	4.4811								****						
Caneadora	Ciclohexano	5.3231									****					
Descortezadora	Ciclohexano	5.6144									****	****				
Sierra Banda	Ciclohexano	6.2421										****	****			
Transportadora	Ciclohexano	7.0008											****	****		
Descortezadora	Metanol	7.1265												****		
Descortezadora	Agua Caliente	9.0484													****	
Astilladora	Acetona	10.5231														****
Descortezadora	Acetona	10.8958														****
Astilladora	Ciclohexano	10.9420														****

Lignina

El contenido de lignina Runkel para la corteza es de $50.32\% \pm 0.47$, el cual es muy alto comparado con el de Räsänen y Athanassiadis (2013) que presenta un valor para el pino 13.1% (5.4). Sin embargo, entra en los valores de 37.48 a 65.78% (Lima, 2013) El aserrín de la astilladora muestra un porcentaje de 39.89 ± 0.33 . El contenido lignina para el caso de los aserrines de madera se encuentran dentro del intervalo de lignina Klason publicado para maderas de pino mexicanas (23,6% – 31.2%) (Revilla 2011) con un promedio de $24.65\% \pm 1.26$. Estadísticamente se muestra en la Figura 25, que si existen diferencias estadísticamente significativas entre grupos, entre sierra banda y transportadora; transportadora y caneadora y, desorilladora y v. desorilladora. En la Tabla 28, la prueba de rangos múltiples con el método LSD con un error de media entre muestras de 0.1439, mostrando diferencias significativas en las columnas cuatro y cinco.

Los resultados del presente estudio muestran que existe mayor concentración de lignina en la corteza que en la madera, lo que está en concordancia con reportes previos (Fengel y Wegener, 1989). Sin embargo, según la literatura, los porcentajes de lignina pueden variar dependiendo del método de extracción (Higuchi *et al.*, 1967; Fengel y Wegener, 1989).



Figura 25. Se muestran las medias del método LSD del porcentaje de lignina.

Tabla 28. Prueba de rangos múltiples 95%, para lignina.

Muestra	% Lignina	1	2	3	4	5
Desorilladora	23.0014	****				
V. Desorilladora	23.6742	****				
Canteadora	24.7931		****			
Transportadora	25.6875		****	****		
Sierra Banda	26.0921			****		
Astilladora	39.8914				****	
Descortezadora	50.3182					****

Holocelulosa

Es conocido que el porcentaje de polisacáridos en la corteza es bajo en relación a la madera que varía aproximadamente del 70 al 90% del total de las sustancias de la pared celular libre de extractivos (Fengel y Wegener, 1989), por lo que, la cantidad de holocelulosa presente en el trabajo para la corteza es de $33.59\% \pm 1.81$ bajo, comparado con el estudio de cuatro coníferas para la producción de bioenergía (Lima 2013), que van de 38.87 a 62.08%. Sin embargo, entra en el rango de 29.9-45.9% de especies de coníferas (Fengel y Wegener, 1989). Para el

aserrín de la astilladora es de $55.10\% \pm 0.12$ y del aserrín de las demás máquinas en promedio es de $69.02\% \pm 2.01$ (Figura 26); por lo tanto, los valores determinados en los aserrines se encuentran en el rango reportado en la literatura para maderas de coníferas (64,0 – 82,5%) (Fengel y Wegener, 1989; Rowell, 2005).

Estadísticamente, no existen diferencias significativas entre la sierra banda, transportadora y desorilladora y entre la sierra banda y canteadora. También se puede apreciar la existencia de diferencias en la prueba de rangos múltiples LSD (Tabla 29).

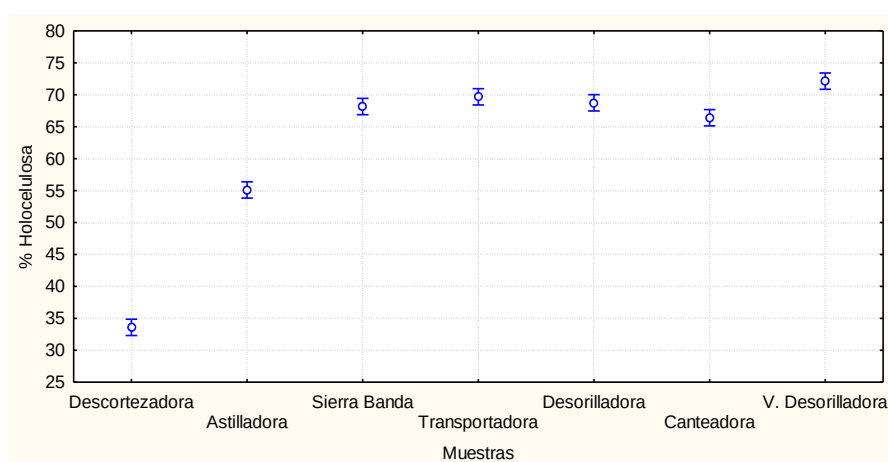


Figura 26. Medias del porcentaje de holocelulosa con el método LSD.

Tabla 29. Prueba de rangos múltiples con el método LSD para holocelulosa.

Muestra	% Holocelulosa	1	2	3	4	5
Descortezadora	33.5890			****		
Astilladora	55.0993				****	
Canteadora	66.4043		****			
Sierra Banda	68.1605	****	****			
Desorilladora	68.7387	****				
Transportadora	69.6799	****				
V. Desorilladora	72.1402					****

α -Celulosa

De acuerdo con la Tabla 30, si existen diferencias estadísticamente significativas mostrando un error de medias entre muestras de 0.8376. La figura 27 muestra en menor porcentaje a las muestras de la descortezadora y la astilladora y

las de mayor porcentaje son los aserrines de las cinco máquinas con una tendencia lineal. El contenido de α -Celulosa entre secciones de las muestras estudias. La corteza presenta un porcentaje de $58.73\% \pm 1.87$, menor comparado con lo reportado por Lima (2013) (valor menor reportado 71.93% de *P. pseudostrobus*). El porcentaje de aserrín de la astilladora es de $54.79\% \pm 0.45$ y el contenido de α -Celulosa encontrado en el aserrín de las máquinas es de $61.07\% \pm 0.67$, alto comparado con el reportado por Rowell (2005) para maderas suaves de estados Unidos $43.7 \pm 2.6\%$.

En general, la α -Celulosa indica contenido de celulosa no degradada, de mayor peso molecular, presente en mayor porcentaje en el aserrín de madera que en la corteza, debido a que la celulosa es el componente que en mayor cantidad se presenta en la madera.

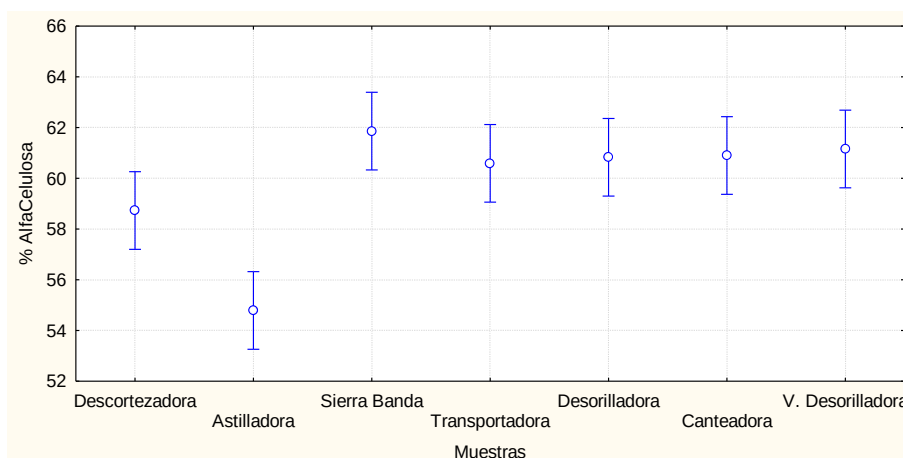


Figura 27. Medias del porcentaje de α -Celulosa con el método LSD.

Tabla 30. Prueba de rangos múltiples LSD para α -celulosa.

Muestra	% AlfaCelulosa	1	2	3
Astilladora	54.7900			****
Descortezadora	58.7298		****	
Transportadora	60.5900	****	****	
Desorilladora	60.8289	****	****	
Canteadora	60.8995	****		
V. Desorilladora	61.1550	****		
Sierra Banda	61.8600	****		

Taninos

En el porcentaje de taninos etanólicos y en el número de Stiasnyes mayor en el aserrín de la astilladora (15.30% y 96.46%) y en menor proporción es de la viruta de la desorilladora (6.18% y 32.57%). En la determinación de los extractos totales hubo mayor presencia en la viruta de la desorilladora y menor concentración en la descortezadora. En cuanto al contenido de taninos acuosos, los valores son menores comparados con los taninos etanólicos. En los taninos acuosos y en el No. de Stiasny el mayor porcentaje se obtuvo en la muestra de la astilladora (3.63% y 47.30%) y en menor porcentaje se encontró en la canteadora (0.51% y 2.36%) (Tabla 31). Debido a que, en general las cortezas contienen mayor contenido de polifenoles que la madera (Fengel y Wegener, 1989), en este estudio se obtuvieron valores menores que los encontrados por Rosales y González (2003) para los extractos acuosos de las cortezas de *Pinus leiophylla* (80,0% número de Stiasny y 5,88% de taninos condensados) y *Pinus teocote* (57,4% y 3,02%, respectivamente).

Estadísticamente no existen diferencias significativas en el extracto total etanólico. En los taninos acuosos, no existen diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de taninos, en el número de Stiasny y en el extracto total (Tabla 31).

Tabla 31. Contenido de taninos etanólicos y taninos acuosos en porcentaje.

Muestras	Etanolicos			Acuosos		
	Extracto Total	No. Stiasny	% Taninos	Extracto Total	No. Stiasny	% Taninos
Descortezadora	13.79(±0.00)a	74.71(±0.23)a	10.31(±0.03)a	5.32(±0.13)a	44.44(±0.54)a	2.36(±0.09)a
Astilladora	15.86(±0.18)b	96.46(±0.39)b	15.30(±0.24)b	7.68(±0.06)b	47.30(±0.03)b	3.63(±0.03)b
Sierra Banda	18.70(±0.24)ce	47.66(±0.38)c	8.91(±0.04)c	9.23(±0.13)c	12.92(±0.11)c	1.19(±0.01)c
Transportadora	17.15(±0.19)d	69.11(±0.25)d	11.85(±0.17)d	9.10(±0.09)c	15.31(±0.33)d	1.39(±0.04)d
Desorilladora	18.53(±0.04)c	40.92(±0.09)e	7.58(±0.03)e	9.23(±0.10)c	14.70(±0.36)d	1.36(±0.02)d
Canteadora	18.42(±0.13)c	51.48(±0.19)f	9.48(±0.03)f	9.14(±0.19)c	5.59(±0.43)e	0.51(±0.03)e
V. Desorilladora	18.98(±0.01)e	32.57(±0.25)g	6.18(±0.05)g	9.30(±0.01)c	2.36(±0.12)f	2.36(±0.12)f
P	0.00000 *	0.00000	0.00000	0.00001 *	0.00000 *	0.00000 *

Se muestra la media (± desviación estándar). P=Probabilidad. * =Letras iguales en la misma columna indican igualdad estadística (LSD<0.05).

Poder calorífico

En la Tabla 32, se muestran seis columnas de Poder Calorífico Neto (PCN) de biomasa forestal residual y cada columna se divide en dos donde se observa el PCN Base Seca (BS) y el PCN Base Húmeda (BH). Teniendo resultados que van de 5.16 a 5.19 ± 0.01 kWh/kg en BS y en BH el rango es de 0.27 a 4.86 ± 1.94 kWh/kg. Hay que resaltar que los datos de PCN se sacaron de los diferentes % de humedad obtenidos de las características físicas. Los resultados de la base seca entran en el rango reportado por Suzhou (2008) para maderas suaves de 5.1-5.4 kWh/kg. Este valor es interesante para el posible uso de los residuos de estas especies para la producción de energía. Por lo anterior, se observa que el calor de combustión de la madera y corteza de las especies de *Pinus* spp es alto, ya que la leña presenta valores entre 10,032 (2.79 kWh/kg) y 15,048 J g⁻¹ (4.18 kWh/kg), según la dirección de Manejo y Abastecimiento Forestal (Lima 2013).

Tabla 32. Poder Calorífico Neto a diferentes porcentajes de humedad.

Muestra	Poder Calorífico Neto (kWh/kg)											
	1		2		3		4 (24 h)		5 (48 h)		6 (144 h)	
	BS	BH	BS	BH	BS	BH	BS	BH	BS	BH	BS	BH
Descortezadora	5.19	3.97	5.19	4.86	5.19	4.79	5.17	0.97	5.17	0.91	5.18	1.21
Astilladora	5.19	3.16	5.19	4.81	5.19	4.80	5.17	1.13	5.17	0.84	5.17	0.67
Sierra Banda	5.18	2.61	5.19	4.80	5.19	4.80	5.16	0.43	5.16	0.44	5.17	0.74
Transportadora	5.18	2.60	5.19	4.83	5.19	4.82	5.16	0.45	5.16	0.42	5.17	0.65
Desorilladora	5.18	2.25	5.19	4.85	5.19	4.83	5.16	0.43	5.16	0.41	5.16	0.54
Canteadora	5.18	2.94	5.19	4.85	5.19	4.86	5.17	0.62	5.16	0.27	5.16	0.27
% de Humedad	0.73	38.61	0.06	6.08	0.07	6.35	3.51	76.94	3.94	79.04	3.49	76.77

La madera con un peso húmedo, no puede utilizarse generalmente como combustible, como se muestra en la Figura 28, al correlacionar los datos del poder calorífico neto y el porcentaje de humedad base humedad, la gráfica y el modelo matemático de ajuste ($R^2=0.95$) muestra la disminución del poder calorífico neto con un mayor contenido de humedad. Por consiguiente debe ser secada ya sea naturalmente o artificialmente conteniendo generalmente del 20 al 25% de agua referido al peso seco. Por lo tanto, la madera con una proporción menor de humedad se emplea como combustible, como se muestra en la gráfica de porcentaje de humedad base seca, observando que se mantiene el poder calorífico neto base seca en el rango del 5.0-5.5 kWh/kg, con una tendencia lineal de $R^2=0.85$. Por lo que, a menor contenido de humedad mayor será el poder calorífico (Figura 28).

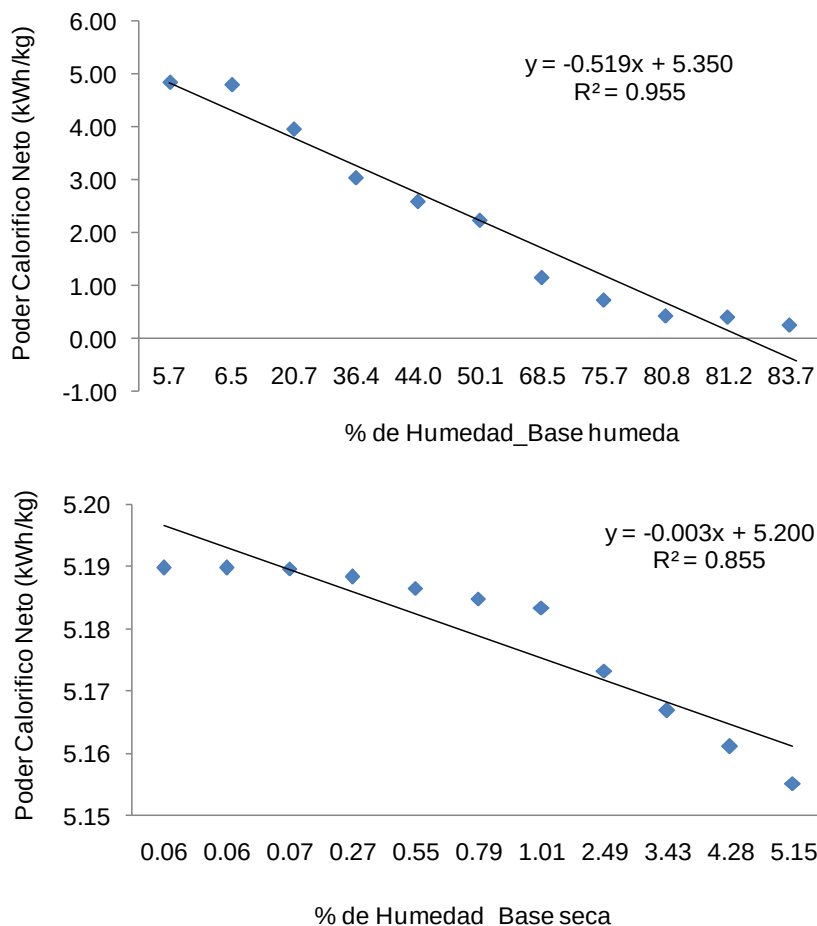


Figura 28. Disminución del Poder Calorífico Neto de la biomasa forestal residual en función del porcentaje de humedad.

El poder calorífico de los combustibles sólidos, depende de su composición química, como se puede observar en la Figura 29. Al correlacionar los datos de poder calorífico y del contenido de cenizas; en la gráfica ($R^2 = 0.62$) se puede observar la tendencia que el poder calorífico tiende a disminuir a mayor contenido de sustancias minerales, tal como lo señala la literatura (Fengel&Wegener, 1983; Martínez et al., 2012).

La mayor proporción de contenido de lignina disminuye el poder calorífico, como aparece en la gráfica y el modelo matemático con ajuste ($R^2 = 0.95$), obtenidos al correlacionar el poder calorífico y el porcentaje de lignina, difiriendo con reportes

de la literatura (Kollmann, 1959; Martínez *et al.*, 2012) donde se indica que el poder calorífico aumenta con la riqueza de lignina.

Las maderas ricas en celulosa (Holocelulosa y α -celulosa), presentan mayor poder calorífico como se muestra en la Figura 29 en las gráficas de Holocelulosa ($R^2 = 0.42$) y de α -celulosa ($R^2 = 0.41$). Sin embargo, la literatura señala, que las maderas especialmente ricas en celulosa, tienen un poder calorífico relativamente bajo (Kollmann, 1959).

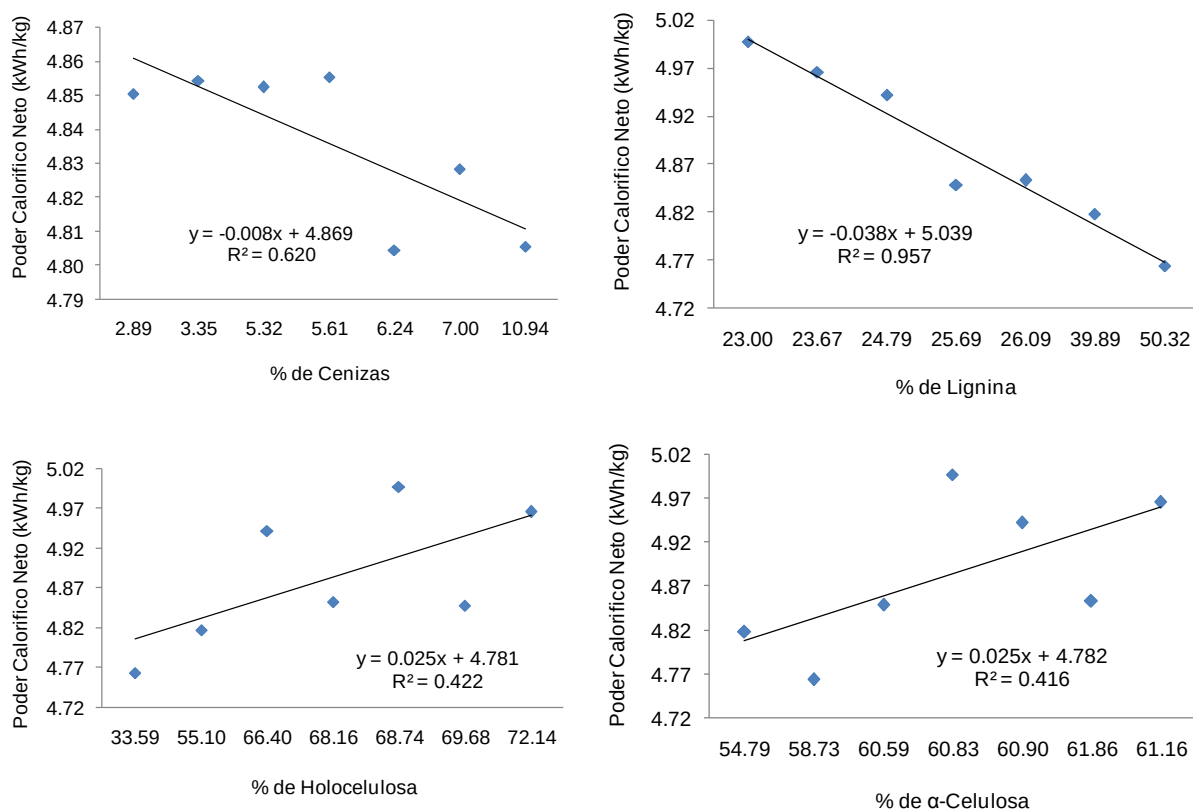


Figura 29. Composición química y su relación con el poder calorífico en las muestras de corteza y aserrín analizadas.

9.4 Análisis de la viabilidad técnica de la cogeneración de energía a través de la biomasa forestal generada en la industria.

Con la cantidad de combustible obtenida de la empresa Forestal Vizcaya la cual es de 5,297.39 Ton/año, se produciría energía de 13,629,641.94 kWh/año (11,710.01 Gcal/año). El potencial de generación eléctrica correspondiente a la biomasa residual estudiada es de 6,472.39 MWh/año.

En la Tabla 32, de acuerdo con los resultados para este estudio, presenta una potencia instalable teórica de 1,033.27 MWh/año, con un potencial de generación entre 516.63 y 1,033.27 MW/año de potencia eléctrica instalable (considerando fracciones mínimas y máximas de utilización de 50 y 100%, respectivamente). Resaltando que la biomasa residual contiene un porcentaje de humedad promedio de 6.50% base seca.

Tabla 33. Potencia instalable teórica y potencia instalable factible para Forestal Vizcaya.

Residuos	Energía Eléctrica MWh/año	Total de Energía Eléctrica	Potencia instalable Teórica MW/año	Potencia instalable factible	
				50%	100%
Corteza 6.77%	3506.64	6472.39	1033.27	516.63	1033.27
Madera 6.24%	2965.75				
Corteza 40.95%	1890.39	3236.88	516.74	258.37	516.74
Madera 48.57%	1346.49				

10 CONCLUSIONES

El porcentaje de humedad de la biomasa forestal estudiada fue mayor a lo citado para la producción de biocombustibles sólidos, se requerirá de un tratamiento previo aplicando energía natural y/o artificial.

En la distribución granulométrica, las partículas que conforman el polvo de aserrín son adecuados para la producción de *pellets* de buena calidad y alta durabilidad y la corteza se podrían utilizar para la producción de briquetas y podría ser combinada con viruta de madera.

La corteza y el aserrín presentan valores altos en el contenido de lignina y extractos totales, bajos valores de contenido de cenizas. El alto contenido de Ca favorece al punto de fusión de la ceniza, lo que permite considerarla con potencial para el uso energético.

La empresa Forestal Vizcaya dispone de 5,297.39 Ton/año de residuos de biomasa forestal. Con valorización energética equivalente a 98 TJ de energía.

Con el aprovechamiento energético de estos residuos en sustitución del petróleo, supondría la reducción de las emisiones de CO₂ que contribuyen al cambio climático: con la cuantificación de la biomasa forestal de la empresa se sustituirían 2,350. 03 Ton de petróleo al año.

En la empresa Forestal Vizcaya se obtienen por concepto de residuos un potencial energético anual que equivale a 0.40 toneladas de petróleo por metros cúbicos de madera en tabla.

La corteza y el aserrín de *Pinusspp* obtenidas de la empresa Forestal Vizcaya pueden ser utilizadas como fuente de energía al presentar un poder calorífico de 18 MJ/kg. Su combustión para la generación de energía permitiría generar 13 millones de KWh de electricidad (considerando una eficiencia eléctrica del 25%).

Finalmente, tomando en cuenta la hipótesis y el objetivo establecido en el trabajo, se concluye por los resultados obtenidos que es factible el desarrollo de un

proceso de cogeneración de energía a partir de la biomasa residual de la empresa Forestal Vizcaya, y que pudiera obtener, por concepto de residuos un potencial energético que equivale a 0.15 ton de petróleo por metro cúbico de residuo de desecho.

11 BIBLIOGRAFÍA

- ASTM d1103-60.in Annual Book of ASTM Standards. Part 22: wood, adhesives. Philadelphia. 1192p.
- Benjamín G. 2006. Biomasa, un recurso energético para los aserraderos forestales. La Jornada Michoacán. Julio, miércoles 19. Año 1, Número 20.
- Bernabé Santiago R., ÁvilaL.E., Calderón y Rutiaga. Q. J. G. 2013. Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. Madera y Bosques 19(2):21-35.
- Bertran Spichiger, J. y Morales Verdugo, E. 2008. Potencial de biomasa forestal. Potencial de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile. Publicado por Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (CNE/GTZ). Santiago de Chile. 33-34 pp.
- Burgo Gómez, D. 2013. Primera central de electricidad con biomasa en Cantabria. TheBioenergy International No 20. Edición español. [En Línea] <<http://www.bioenergyinternational.es/noticias/News/show/primera-central-elctrica-con-biomasa-en-cantabria-611>> 10 de Junio de 2013.
- Camps Michelena, M. y Marcos Martín, F. 2008. Los Biocombustibles. 2da Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 383 p.
- Castellanos. 2011. Arauco Bioenergía inaugural central de biomasa en Diciembre. Electricidad La revista energética de Chile. Revista N° 141 Noviembre de 2011.
- Castells Xavier, E. 2012. Biomasa y Bioenergía. Colección: Monografías. Serie: Energía, Medioambiente, Tratamiento de residuos. Ediciones Díaz de Santos. Madrid. 754-756 pp.
- Cea Muños, H. 2003. Caracterización de astillas y aserrín para una planta de tablero de partículas en Valdivia. Tesis Ingeniero en madera. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. [En Línea] <<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/fifc387c/doc/fifc387c.pdf>> Enero, 2015.
- ChoonK.K. y Roffael E. 1990. The acidity of five hardwood species. Holzforschung 44(1):53–58.

- CONUEE. S/F. Oportunidades de cogeneración eficiente. [En Línea] <http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/7369/8/cogeneracion_eficiente.pdf>. Abril de 2013.
- Correa Méndez F., Carrillo Parra A., Rutiaga Q., Márquez M. y González R. 2014. Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. Revista Mexicana Ciencias Forestales. Vol 5 Núm 25.
- Cruz Contreras C. 2012. Residuos generados del aprovechamiento maderable en el estado de Durango. Tesis de ingeniero forestal industrial. Chapingo, Texcoco, Estado de México. [En Línea] <http://portal.chapingo.mx/dicifo/tesislic/2012/cruz_contreras_carlos_2012.pdf>Febrero de 2014.
- De la Cruz C., R. y C. Pairán O. 2004. Evaluación del proceso de aserrío en Quercuslaeta de la Región de El Salto, Durango. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico Forestal No. 1. El Salto P. N., Durango. 75 p.
- Ecoticias.com. 2012. Gasificación de biomasa forestal y cogeneración. [En Línea] <<http://www.ecoticias.com/energias-renovables/59948/noticia-energias-renovables-Gasificacion-biomasa-forestal-cogeneracion>>Octubre de 2013.
- EN 15103:2009. Los combustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel.
- FAO, Departamento de Montes. 1991. Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales. [En Línea] <<http://www.fao.org/docrep/t0269s/t0269s05.htm>> Julio de 2014.
- Fengel D. y Wegener G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter. Berlín, Germany. 415p
- Franke M. and Rey A. 2006. Pelleting quality. World Grain 2006. University of Georgia. Athens, GA, USA. Vol. 4. pp. 78-79.
- Fonseca M., M.R. 2006. Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 125 p
- Gómez T. y Vergara M. 2011. Biomasa forestal. ELO-383 Seminario de electrónica industrial. [En Línea] <<http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeBiomasa.pdf>> Consultado Octubre de 2014.

- González Pimentel, M.R. 2005. Determinación de la composición química de la madera del pino ocote (*Pinusoocarpa* Schiede ex Schltdl) procedente de plantación en Cucanjá, Tukurú, Alta Verapaz. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 110 p.
- González P., Alvarez M., Stange M., Herrera C., Cohen M. y Pardo. 2007. Disponibilidad de residuos madereros. Residuos de la industria primaria de la madera, Disponibilidad para uso energético. Instituto Nacional de Energía, Instituto Forestal. ByB Impresores. Santiago de Chile. [En Línea] <<http://www.giz.de/en/downloads/sp-chile-residuos-madereros.pdf>> Enero de 2014.
- Higuchi T. I, Shimadam M. y Kawamura I. 1967. Chemical properties of bark lignins. Cellulose Chem. Technol. 1:585-595.
- Holmbom B. 1999. Extractives. Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking. (In: Sjöström E, Alén R (1999) (Eds.) Springer. Berlin. 125-148 pp.
- Huhtinen M. 2005. Wood biomass as a fuel. 5EURES. Intelligent Energy-Europe. <<file:///M:/5Eures/WoodPropertiesPDF.htm>>. Enero de 2015.
- Issues y Answers, 2002. Energía procedente de la biomasa forestal. Una contribución importante a la oferta energética de Chile. ARAUCO. [En Línea] <http://www.arauco.cl/file/file_262_02.pdf> Marzo, 2013.
- Jiménez Gómez. 1991. Los residuos de origen vital. Real academia de farmacia. Madrid.
- Kaliyan N. y Vance M. R. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass Bioenerg 33 (3): 337-359.
- Kollmann F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Ministerio de Agricultura – Instituto forestal de investigaciones y experiencias, Madrid.
- Lang C. E. 2013. ¿Qué es la cogeneración? Tecnologías-Cogeneración _1. SENER, CONUEE. [En Línea] <http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/que_es_la_cogeneracion_1> Consultado julio de 2013.
- Leckner. 1996. Methods for reducing the emission of nitrous oxide from fluidized bed combustion; Energy Conversion and Management, Volume 37, Issues 6-8, Pages 1297-1302

- Lesme Jaén, R. y Oliva Ruiz, L. S/F. Factibilidad del empleo de los residuos en la industria de la madera para la obtención de energía eléctrica. [En Línea] <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar11/HTML/articulo05.htm>> Enero 2014.
- Lesme Jaén, R. y Roca A., G. 2001. Coeficientes de residuos de la industria Forestal. Universidad de Oriente. [En Línea] <<http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/viewFile/2291/1828>> Consultado Septiembre de 2013.
- 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 en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. 55p.
- Marcos Martín, F. y Núñez M. 2006. Biomasa forestal: fuente energética. Energética XXI IV(52): 80-85pp.
- Marcos Martín, F. 2001. Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid.
- Martínez Pérez, R., Pedraza Bucio F. E., Apolinar Cortes J., López M. J. y Rutiaga Q. J. G. 2012. Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. vol.18, n.3, pp. 375-384. ISSN 0186-3231.
- Nussbaumer T. 2002. Combustion and co-combustion of biomass. In: Proceedings of the 12th European Biomass Conference, vol. I. pp. 31–37. ISBN: 88-900442-5-X. Austria.
- Panshin A. J., y De Zeeuw C. 1970. Textbook of Wood technology. 4ed. Ed. MC Graw-Hill, Series in Forest Resources. 214pp.
- PedrazaBucio, F. E. y RutiagaQuiñones, J. G. 2011. Extracto tánico de la madera de palo de Brasil. Conciencia Tecnológica, 42, 36–41.
- Poblete H., Rodríguez S. y Zárate M. 1991. Extraíbles de la madera, sus características y efectos sobre la utilización de esta materia prima. Publicación docente núm. 34. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 51 p.
- Programa de estímulos a la innovación propuestas aprobadas. 2012. [En Línea] <<http://www.cocyted.gob.mx/Programas/PEI/PROPUESTAS%20APROBADAS%202012.pdf>> Junio, 2013.

- PROMEXICO. 2012. Energías Renovables. Secretaria de Económica, PROMEXICO Inversión y Comercio [En Línea] <[http://www.promexico.gob.mx/work/models/promexico/Resource/120/1/image/s/Energias_renovables\(1\).pdf](http://www.promexico.gob.mx/work/models/promexico/Resource/120/1/image/s/Energias_renovables(1).pdf)> Marzo, 2013
- Quispe Chanampa, C. N. 2010. "Análisis energético de un sistema de cogeneración con ciclo combinado y gasificación para la industria azucarera" Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Facultad de Ingeniería. Universidad de PIURA. Piura [En Línea] <http://pirhua.udpe.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1387/IME_155.pdf?sequence=1> Consultado Marzo de 2013.
- Räisänen T. y Athanassiadis D. 2013. Basic chemical composition of the biomass components of pine, spruce and birch. Forest Refine. 31.1.2013
- Revilla González, E. 2011. Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección cembroides. Tesis profesional. Programa académico de Ingeniero Forestal Industrial. Universidad Autónoma Chapingo. México. 92 p.
- Reyes Cortés, L. M. 2013. Cuantificación y aprovechamiento de residuos del proceso de aserrío del parque industrial, Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Tesis. Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca. [En Línea] <<http://www.unsij.edu.mx/tesis/digitales/1.%20Luz%20Maria%20Reyes%20Cortes%202-04-2013.pdf>> Consultado Marzo de 2014.
- Rosales Castro, M. y González Laredo, R.F. 2003. Comparación del contenido de compuestos fenólicos en la corteza de ocho especies de pino. Madera y Bosques 9(2):41-49.
- Rowell R. 2005. Handbook of wood chemistry and wood composites. Taylor & Francis. United States of America. 473 p.
- Runkel R.O.H. y Wilke, K.D. 1951. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Holz Roh Werkst. (9)7: 260-270.
- Rutiaga Quiñones, J.G. 2001. Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag Gräffelfing. München. 201 S.
- Sandermann, W. y Rothkamm, M. 1959. Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. Holz Roh Werkstoff. 17:433-440.
- SCAN-CM 43:1995, Basic density. Wood chips for pulp production. Scandinavian pulp, paper and board.

- Secretaría de Energía. 2008 Energías Renovables. Energía Biomasa [En Línea] <http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_biomasa.pdf> Mayo, 2013
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2014. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2013. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. Dirección del Registro y del Sistema Nacional de Gestión Forestal. Coyoacán, México. D. F. 11-24 pp.
- SEMARNAT. 2007. Anuario Estadístico de Producción Forestal Maderable 2007. Subsecretaría de Recursos Naturales. Dirección General Forestal. México
- SENER. 2012. Prospectiva de Energías Renovables 2012-2016. Gobierno Federal. México. [En Línea] <http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf>. Marzo de 2013.
- SENER y Gobierno Federal. 2012. Iniciativa para el desarrollo de las energías renovables en México. Cogeneración Eficiente. [En Línea] <http://www.energia.gob.mx/webSener/res/0/D121122%20Iniciativa%20Renovable%20SENER_Cogeneraci%C3%B3n.pdf>. Junio de 2013.
- Smith D. M. 1954. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small Wood samples. Rept No. 2014. United States department of agriculture forest service. Forest products laboratory. Wisconsin. [En Línea] <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplr/fplr2014.pdf>>. Mayo de 2014
- Suzhou Yin. 2008. Characterization and conditioning of forest residue small heating systems. FPS ECS Conference: Bio-energy.
- TAPPI. 1985 (US Technical Association of Pulp and Paper Industry): Sampling and preparing wood for analysis, norm T 257 om-85.
- TAPPI. 2000a, Tappi test methods. Tappi Press. Atlanta. T 264 cm-97. Preparation of Wood for Chemical Analysis.
- TAPPI. 2000b. Tappi test methods T 211 om-93. Ash in wood and pulp. Atlanta. USA: Autor.
- Uasuf A. y Hilbert, J. 2012. El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Informe técnico bioenergía. Año 1 N°2 ISSN 2250-8481. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina. 15pp

UNE-CEN/TS 14778-1:2007 EX. Biocombustibles sólidos. Muestreo. Parte 1: Métodos de muestreo.

UNE-EN 15149-2:2011. Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con abertura de malla inferior o igual a 3.15 mm.

Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., & Vassileva C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022

Wise (1946) *In*: Sanjuán Dueñas R. 1991. Guía práctica para la especialidad en celulosa y papel I. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Guadalajara.

www.ruraltech.org. Chips, Sawdust, Planer Shavings, Bark, and Hog fuel. [En Línea] <http://www.ruraltech.org/projects/conversions/briggs_conversions/briggs_ch07/chapter07_combined.pdf> Enero 2015.