

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA



Trabajo de diploma

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico

TÍTULO: Evaluación preliminar del potencial de las diferentes
biomasas de la provincia de Cienfuegos

Autor: Javier Alejandro Curbelo García

Tutor (es): MSc Reinier Jiménez Borges

Dr.C Eduardo Julio López Bastida

Dr.C Félix González Pérez

Cienfuegos, 2017

**DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Vice Decano.

Firma del Tutor.

Nombre y Apellidos.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellido. Firma.

Solamente una vida dedicada a los demás merece ser vivida.

Albert Einstein

Hay personas que solo con existir, hacen de nuestras vidas un sendero feliz. Dedico este triunfo en especial, con todo amor que se merecen a mis padres, por todo el amor y apoyo que me han brindado en el transcurso de mi carrera.

Este triunfo tan importante se lo dedico a mi hermano y a mi familia que siempre soñó con verme convertido en un profesional, a mis amigos y a todos los que son parte de mi vida diaria.

Agradecimientos

- ✚ A mi mamá, por sus valiosos consejos, por apoyarme siempre en todos mis proyectos, por ser mi guía, estará por siempre en mi corazón.
- ✚ A mi papá y mi hermano Yaslien por preocuparse y estar ahí cuando los necesito.
- ✚ A mi novia por dedicarme su amor y comprensión, por apoyarme y por los tantos momentos hermosos que hemos compartido.
- ✚ A toda mi familia por su interés y preocupación.
- ✚ A mis suegros por su preocupación y motivación en todo el proyecto.
- ✚ A mis amigos con los que he vivido momentos buenos y difíciles durante todo este tiempo.
- ✚ A mis tutores Reinier Jiménez Borges, Eduardo Julio López Bastida y Félix González Pérez por el conocimiento aportado para que esta investigación se realizara, por su confianza.
- ✚ A los profesores que han formado parte de mi formación profesional en todos mis años de estudio.
- ✚ A la Revolución y a la Universidad de Cienfuegos “Carlos R. Rodríguez” por la oportunidad que me ha brindado de formarme como profesional.
- ✚ En fin, quisiera agradecer a todas aquellas personas que han hecho posible este sueño, que parecía lejano, pero se hizo posible.

GLOSARIO

Abono orgánico: fertilizante proveniente de residuos vegetales, animales u otras fuentes orgánicas

Autogeneración: Actividad realizada que producen energía eléctrica principalmente para atender sus propias necesidades.

Biocarbón: Es el nombre que recibe el carbón vegetal cuando es empleado como enmienda para el suelo. Es decir, es biomasa de origen vegetal procesada por medio de la pirólisis.

Briquetas: Son biocombustibles para generar calor utilizados en estufas, chimeneas, salamandras, hornos y calderas. Es un producto ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, que viene en forma cilíndrica o de ladrillo y sustituye a la leña con muchas ventajas.

Café oro: El término café verde u oro es el nombre que recibe el grano de café posterior a que se le haya separado las distintas envolturas a través del proceso de descascarillado o morteadado. Este es tipo de café que se encuentra listo para ser tostado y posteriormente molido.

Café pergamino: El café pergamino húmedo es el producto resultante del proceso de lavado en el beneficio húmedo del café. Por su alto contenido de humedad, 53% b.h. (base húmeda), es un producto muy perecedero, por ser un medio apropiado para el desarrollo de microorganismos que pueden alterar la calidad e inocuidad.

Compostaje: Es una tecnología de bajo coste que permite transformar residuos y subproductos orgánicos en materiales biológicamente estables que pueden utilizarse como enmendantes y abonos del suelo y como sustratos para cultivo sin suelo

Degradación: Es un proceso cuyo desarrollo implica la pérdida de recursos naturales. La contaminación generada por el ser humano, la sobreexplotación y el cambio climático son algunos de los motivos que pueden producir la degradación ambiental.

Despulpe: Operación que consiste en extraer la pulpa de algunos frutos, después se procede al despulpado y secado del grano en una finca cafetera

Energía primaria: Es la energía que se encuentra en la naturaleza antes de ser sometida a procesos de transformación. Esta se encuentra en el carbón, el petróleo, el gas natural, la radiación solar, el agua embalsada o en movimiento, las mareas, el viento, el uranio, calor almacenado en la tierra (geotermia), etc.

Fructosa: Es una forma de azúcar encontrada en los vegetales, las frutas y la miel. Es un monosacárido con la misma fórmula que la glucosa, pero con diferente estructura, es un isómero de ésta.

Hemicelulosa: Forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace.

Inulina: Se designa a una familia de los polisacáridos, compuestos de cadenas moleculares de fructosa. Se encuentran generalmente en las raíces, tubérculos y rizomas de ciertas plantas (Bardana, achicoria, diente de león, yacón, etc.) como sustancia de reserva. Forma parte de la fibra alimentaria.

Licuefacción: Es un proceso químico que convierte el carbón directamente en una mezcla de hidrocarburos líquidos

Lignina: Está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos. Los polímeros de lignina son estructuras transconectadas.

Monosacáridos: Son los glúcidos más sencillos. El principal monosacárido es la glucosa, la principal fuente de energía de las células.

Mucílago: Es una capa de tejidos translúcidos y de consistencia viscosa, que se halla firmemente adherido al grano de café, una sustancia gelatinosa azucarada.

Pellet: Son un tipo de combustible granulado alargado a base de madera. También sirve como suelo para animales. Se fabrican mediante prensado de serrín donde la propia lignina hace de aglomerante.

Polisacáridos: Son biomoléculas formadas por la unión de una gran cantidad de monosacáridos. Cumplen funciones diversas, sobre todo de reservas energéticas y estructurales.

Serrín: Es el residuo o desecho del proceso de serrado de la madera.

SIMBOLOGÍAS

GW-----	Gigavatios
GWt-----	Gigavatios térmicos
RSU-----	Residuos Sólidos Urbanos
m ³ -----	Metros cúbicos
°C-----	Grado centígrados
CO ₂ -----	Dióxido de carbono
MW-----	Mega-Watt
kWh/tcm -----	kilowatts-hora por tonelada de caña molida
SEN -----	Sistema Eléctrico Nacional
t -----	toneladas
GWh -----	Gigawatt-hora
MINAG -----	Ministerio de la Agricultura
GAF -----	Grupo Agro-Forestal
UEB -----	Unidad Estatal de Base
MJ -----	Mega joule
MJ/kg -----	Mega joule por kilogramo
ha -----	Hectárea
t/ha -----	Tonelada por hectárea
t CO ₂ /año -----	Toneladas de dióxido de carbono al año
t CO ₂ /MWh -----	Toneladas de dióxido de carbono por Megawatt-hora
HR -----	Humedad relativa
C -----	Carbono
H -----	Hidrógeno

Abreviaturas y acrónimos

O	-----	Oxigeno
Ash	-----	Ceniza
PClb.s	-----	Poder Calórico Inferior
en base seca		
PCSb.s	-----	Poder Calórico Superior
en base seca		
MN	-----	Moneda Nacional
€	-----	Moneda europea
MPa	-----	Mega-Pascal
AZCUBA	-----	Grupo Azucarero

RESUMEN

En el presente trabajo a partir de la definición de la biomasa se expone la utilización de estas a nivel internacional y nacional en comparación con los combustibles fósiles. Se caracterizan además los tipos de conversión existentes, las clasificaciones fundamentales, así como las tecnologías para el mejor aprovechamiento con fines energéticos. Se presenta la metodología utilizada para calcular las potencialidades presentes y futuras del total de residuos por fuente de biomasa desde el punto de vista económico, social, medio ambiental y tecnológico en consecuencia con los principios del desarrollo sostenible. A partir del levantamiento de la biomasa cañera, cafetalera, arroceras, residuos aserraderos mediante informaciones aportadas por las principales empresas productoras de la provincia fue posible determinar la energía total entregada, así como la cantidad de CO₂ dejados de emitir a la atmósfera. Para el caso de la caña de azúcar la energía total fue de 2 517 470 000 kWh, dejándose de emitir a la atmósfera 2 836 188,7 t CO₂, para la cachaza a su vez fue de 193 457 400 kWh, dejándose de emitir 218 026, 47 t CO₂. En los residuos del café y arroz estos valores fueron de 163 434,4 kWh (184 t CO₂) y 17 629 880 kWh (19 868,87 t CO₂) respectivamente. Por último, la energía total para los residuos de aserraderos fue de 2 082 278 kWh para un total de 2 346,72 t CO₂.

Palabras Claves: biomasa, bagazo, cachaza, arroz, energía.

SUMMARY

In the present work from the definition of the biomass the use of these at international and national level in comparison with the fossil fuels is exposed. Existing conversion rates, key classifications, as well as technologies for the best use for energy purposes are also characterized. It presents the methodology used to calculate the present and future potential of the total waste by biomass source from the economic, social, environmental and technological point of view, in accordance with the principles of sustainable development. As a result of the removal of biomass sugarcane, coffee, rice, sawmill waste through information provided by the main producing companies of the province, it was possible to determine the total energy delivered, as well as the amount of CO₂ left to emit to the atmosphere. In the case of sugar cane, the total energy was 2 517 470 000 kWh, leaving to the atmosphere 2 836 188.7 t CO₂, for the cachaça in turn was of 193 457 400 kWh, leaving to emit 218 026, 47 t CO₂. In coffee and rice residues these values were 163 434.4 kWh (184 t CO₂) and 17 629 880 kWh (19 868.87 t CO₂) respectively. Finally, the total energy for sawmill waste was 2 082 278 kWh for a total of 2 346.72 tCO₂.

Keywords: biomass, bagasse, cachaça, rice, energy.

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I Estado actual de la biomasa. Tecnologías de conversión.	5
I.1 Introducción al capítulo.....	5
I.2 Perspectiva mundial y nacional de los recursos renovables.....	5
I.3 Biomasa. Clasificaciones	7
I.3.1 Clasificación atendiendo a su procedencia.....	7
I.3.2 Atendiendo a su composición	8
I.4 Procesos de transformación de la biomasa.....	9
I.4.1 Biocombustibles Sólidos.....	9
I.4.2 Biocombustibles Líquidos.....	10
I.4.3 Biocombustibles Gaseosos.....	11
I.5 Usos de la biomasa.....	11
I.5.1 Aplicaciones térmicas	11
I.5.2. Aplicaciones eléctricas.....	12
I.6 Tecnologías de conversión de biomasa en calor o electricidad	13
I.6.1 Conversión biológica.....	13
I.6.2 Conversión mecánica	16
I.6.3 Conversión termoquímica	16
I.7 Tecnologías existentes en Cuba para el aprovechamiento de la biomasa	24
I.7.1Turbinas de extracción-condensación con bagazo	24
I.7.2 Gasificación de residuos forestales para la producción de electricidad	25
Conclusiones parciales	26
Capítulo II Materiales y métodos.....	28
II.1 Introducción al capítulo.	28
II.2 Biomasa potencial de la industria azucarera.....	28
II.2.1 Biomasa residual de la caña de azúcar.....	30
II.3 Biomasa residual de la producción de café.....	32
II.3.1 Principales características del Café.....	32
II.3.2 Proceso de producción del café.....	33
II.3.3 Producción del grano	33

II.3.4 Beneficio húmedo del Café.....	34
II.3.5 Beneficio seco.....	35
II.3.6 Análisis de los residuos de la producción de café.....	35
II.3.7 Usos de los residuos del beneficio del café	37
II.4 Biomasa residual del arroz.....	37
I.5 Biomasa de los residuos aserraderos.....	39
I.6 Metodología empleada para calcular las potencialidades presentes y futuras.	41
Conclusiones parciales	47
Capítulo III Evaluación del potencial de las diferentes biomاسas. Cantidades y usos actuales.	49
III.1 Introducción al capítulo.....	49
III.2 Estimación de la biomasa potencial de la caña de azúcar.	49
II.2.1 Potencial de Biomasa Residual.....	51
III.3 Estimación del potencial de biomasa del café.....	59
III.3.2 Producción del grano	59
III.4 Potencial de los residuos biomásicos del arroz	62
III.5 Potencial de los residuos aserraderos	65
Conclusiones parciales	68
CONCLUSIONES GENERALES	70
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	76

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad ha ido dependiendo cada vez más del aprovechamiento de la energía en sus diferentes formas. Muchos siglos transcurrieron hasta el descubrimiento del uso del vapor de agua, la máquina de vapor y la electricidad, comenzando una era de acelerado avance tecnológico con nuevos descubrimientos y posibilidades en las fuentes ya conocidas, así comenzó el uso del petróleo y sus derivados, encontrándose la humanidad actualmente en un punto de altísimo desarrollo; y al mismo tiempo, de peligrosa dependencia de un recurso no renovable y con existencias limitadas, situación conocida como “crisis energética”. (Acosta, 2013)

El modelo energético a nivel mundial se caracteriza por un crecimiento elevado de la demanda energética, impulsado por la expansión económica de los países en desarrollo, lo que ha motivado un incremento de las emisiones de CO₂ debido al uso creciente de combustibles fósiles para su suministro. Experimentando una expansión económica que ha dado lugar, debido al incremento asociado de la demanda de energía y a leyes restrictivas en los aspectos medioambientales, a crecimientos de sus consumos energéticos en sus distintos sectores productivos muy superiores a los de los países ya desarrollados (Gómez, 2013).

La escasez de los combustibles fósiles, la preocupación por su agotamiento, la protección ambiental y la dependencia energética de países con escasos recursos energéticos convencionales impulsan el desarrollo de las energías renovables, la que se deriva de procesos naturales que se reponen constantemente, es decir, la que se obtiene de las continuas corrientes de energía recurrentes en el entorno natural. (Salvador, 2010)

Cabe mencionar que las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, siempre y cuando se respeten los ciclos naturales, entre estas fuentes de energía encontramos la energía eólica, energía solar, la energía fototérmica y fotovoltaica, la energía hidráulica, la energía geotérmica, la energía mareomotriz y la energía de la biomasa (Orozco, 2002).

Según (Orozco, 2002) la bioenergía es la energía que se obtiene de la biomasa y se presenta con una gran variedad de formas. Puede obtenerse a partir de los

biocombustibles sólidos como la leña, el carbón vegetal o los residuos agrícolas que pueden quemarse directamente o gasificarse para producir calor y electricidad, los cultivos energéticos como la caña de azúcar o plantas oleaginosas, de las que se extraen combustibles líquidos como el bioetanol y el biodiesel, y los residuos municipales y el estiércol de los que pueden obtenerse combustibles gaseosos como el biogás.

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental. Este es el caso de los bosques naturales y las plantaciones energéticas en desarrollo, los residuos agroindustriales y los urbanos. La utilización de estas fuentes en la generación de electricidad está muy vinculada al desarrollo de tecnologías eficientes que permitan que esta producción sea competitiva con el uso de los combustibles convencionales en las condiciones específicas de los países en desarrollo. En esta dirección se trabaja intensamente, por lo que es necesaria la realización de proyectos demostrativos que faciliten la transferencia y evaluación de éstas en las condiciones de los países de menor desarrollo. En Cuba a partir de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE) se presenta información de manera generalizada sobre la situación de la biomasa en cada provincia, pero no se tiene por fuente de biomasa la situación actual, de aquí que estudios como este permite contar con la información particularizada por cada tipo de biomasa existente en la región.

Problema científico:

Se desconoce el conocimiento pleno desde una perspectiva multivariada el potencial de las biomásas en la provincia de Cienfuegos.

Hipótesis

Si se conoce el potencial de las biomásas en la provincia de Cienfuegos y sus alcances y limitaciones desde el punto económico, social, medio ambiental y tecnológico se podrá hacer y mejorar usos energéticos de estas fuentes

Objetivo general:

Evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa en Cienfuegos.

Objetivos específicos

1. Realizar un estudio bibliográfico sobre el uso en Cuba y en el mundo de las biomasas como fuente de energía.
2. Proponer una metodología basada en cuatro categorías para valorar el potencial de estas biomasas.
3. Validar dicha metodología en las diferentes biomasas que genera los diferentes procesos agroindustriales.

Capítulo I

Capítulo I Estado actual de la biomasa. Tecnologías de conversión.

I.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se describe la situación a nivel mundial y nacional en la utilización de las fuentes renovables de energía en particular la biomasa. Se describen los tipos de conversión haciendo énfasis en la conversión termoquímica. Por último, se presentan las tecnologías de aprovechamiento y las perspectivas de su utilización.

I.2 Perspectiva mundial y nacional de los recursos renovables

Los últimos años han sido notables para la energía renovable, pues representan las mayores incorporaciones en la capacidad mundial vistas hasta la fecha, la figura I.1 presenta los porcentajes de energía renovable en el consumo final de energía. Sin embargo, los desafíos persisten, sobre todo más allá del sector eléctrico. Se han observado diversos avances que influyeron en el incremento en la energía renovable, incluyendo una disminución en los usos de los combustibles fósiles a nivel mundial y un aumento significativo de los sistemas de acumulación de energía (Sawin, 2016).

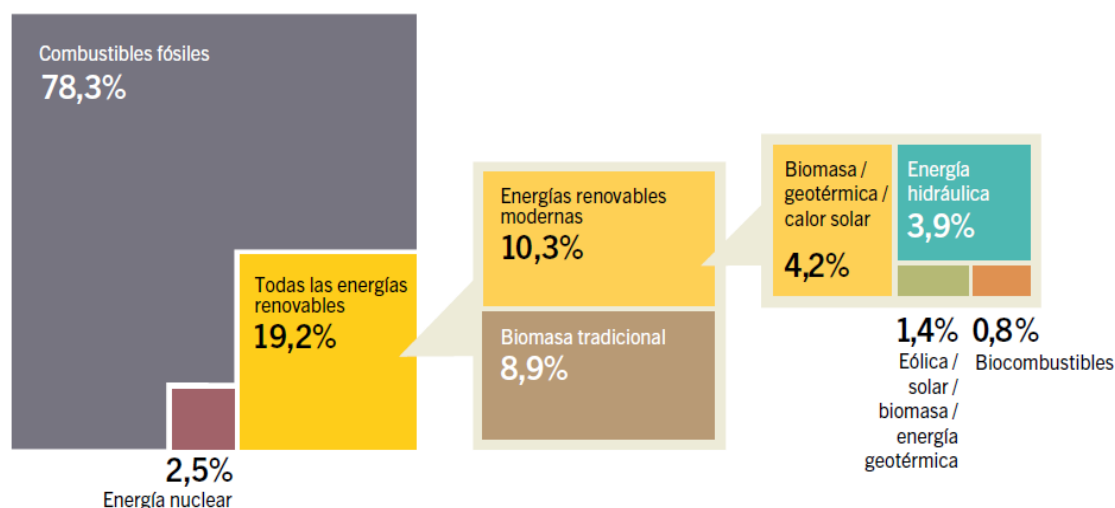


Fig.I.1 Cuota de energía renovable en el consumo final de energía, 2014. Fuente: (Sawin, 2016)

Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de política aplicada; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética y cuestiones de medio ambiente y emergente, así como la necesidad de acceso a una energía modernizada.

Según (Sawin, 2016) durante el 2015, se añadió un estimado de 147 GW de capacidad de energía renovable, el mayor incremento anual jamás registrado; la capacidad calorífica renovable aumentó en alrededor de 38 GWt; y la producción total de biocombustibles continuó al alza. Este crecimiento se produjo a pesar del desplome de los precios globales de los combustibles fósiles, además de otros retos respecto a las energías renovables, incluyendo la integración de los avances en la participación de la generación de energía renovable, barreras normativas y restricciones fiscales. Dentro de los recursos renovables la biomasa ha tenido una importante participación en el consumo total de energía y en el consumo final de energía por sectores en el mundo, tal como se muestra en la figura I.2.

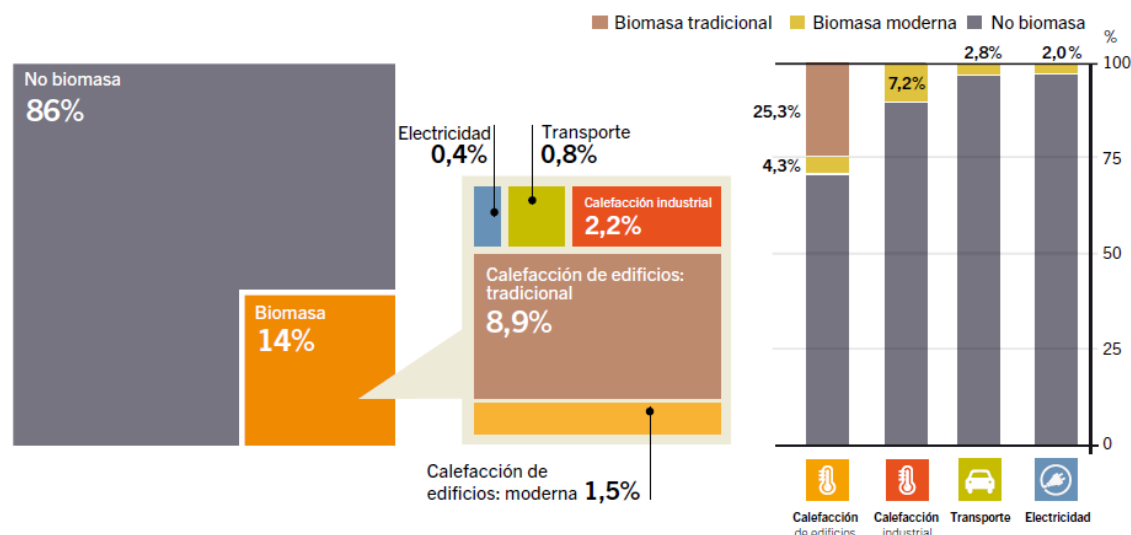


Fig. I.2 Participación de la biomasa en el consumo total final de energía y en el consumo final de energía por sector de uso final, 2014. Fuente: (Sawin, 2016)

Cuba como país insular, constituye la primera prioridad en los lineamientos actuales de la política económica y social del país, de ahí que la energía sea un eje transversal en este propósito. Según (Guerra, 2016) actualmente es baja la utilización de las fuentes renovables de energía, pues con ellas solo se produce el 4,3% de la electricidad del país donde la biomasa alcanza el 3,5%.

En esta también existen un importante número de opciones como lo es la utilización de estas fuentes renovables, particularmente la eólica, hidroenergía y la fotovoltaica. La principal fuente renovable en el país lo constituye la biomasa cañera, aunque en la agricultura existe un importante potencial con la gasificación de la cáscara de arroz,

gasificación de residuos de aserraderos y tratamiento anaeróbico de los residuales porcinos para la producción de calor y electricidad.

I.3 Biomasa. Clasificaciones

La biomasa se define relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, como: La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos (Pinedo, 2013)

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. El concepto de biomasa comprende tanto los productos de origen vegetal como los de origen animal.

I.3.1 Clasificación atendiendo a su procedencia

Según la (Agencia Andaluza de Energía, 2015) considera tres grandes grupos en cuanto a las posibles fuentes de biomasa para su aprovechamiento energético.

Biomasa natural: Consiste en las masas vegetales que se producen sin intervención humana y que constituyen la flora terrestre, su aprovechamiento masivo podría generar una rápida degradación de los ecosistemas naturales.

Biomasa residual: Es la que se genera en cualquier actividad, principalmente en los procesos productivos de los sectores agrícolas, forestales, industriales o ganaderos, así como la generada por la población en los núcleos urbanos. En algunos casos su aprovechamiento energético es la única opción de uso que evita su tratamiento como residuo, en otros puede llegar a tener más de una posibilidad (alimentación animal, fertilizante, industrial, etc.)

Biomasa producida por cultivos energéticos: Es aquella biomasa producida expresamente con la finalidad de producir energía. Debido a las altas expectativas de los cultivos energéticos en la actualidad y desde diferentes ámbitos se están redactando diferentes regulaciones que afectan a la sostenibilidad de la biomasa energética especialmente en materia de cultivos energéticos, con el fin de asegurar que su uso representa una mejora en el balance energético, en el balance de emisiones y

no amenaza el equilibrio natural. Por todo ello sería más apropiado hablar de biomasa producida por cultivos energéticos sostenibles. La figura I.3 resume la clasificación de la

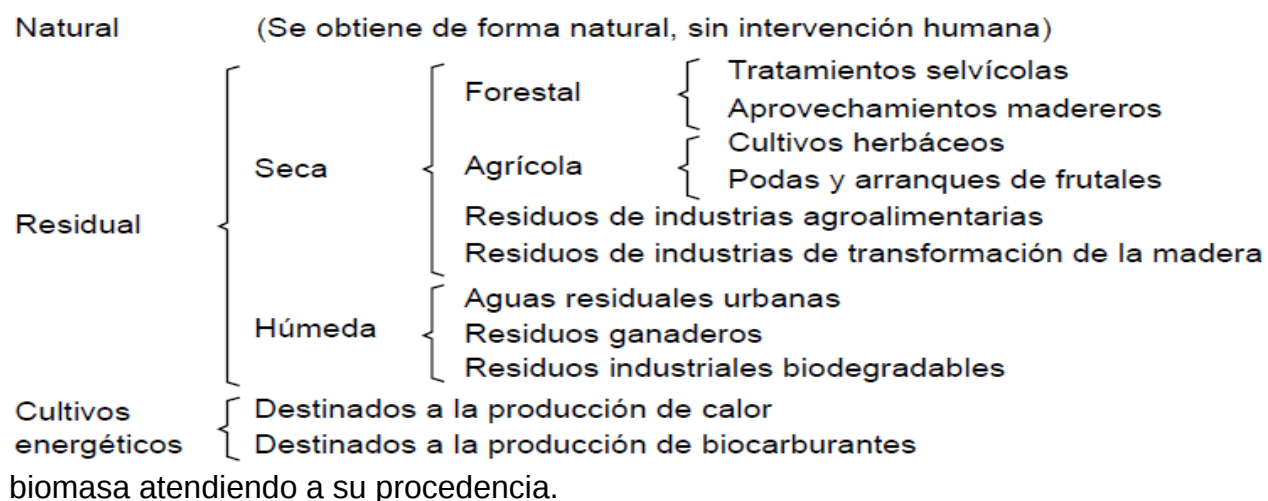


Figura I.3: Clasificación de la biomasa. Atendiendo a su procedencia. Fuente: (Arauzo et. al, 2014)

I.3.2 Atendiendo a su composición

Según (Martínez, 2014) la composición de la biomasa vegetal puede ser clasificada de cuatro maneras diferentes, como son:

Biomasa lignocelulosa: En esta predominan las celulosas de hemicelulosa, holocelulosa y lignina (paja, madera).

Biomasa amilácea: Predomina hidratos de carbono como el almidón y la inulina, estos son polisacáridos de reserva en los vegetales (almidón, cereal, patata, etc.)

Biomasa azucarada: Los hidratos de carbonos son azúcares monosacáridos (glucosa o fructosa) o disacáridos como la sacarosa.

Biomasa energética: Incluye los materiales de origen biológico que no pueden ser empleados con fines alimenticios, está cubre actualmente el 14% de las necesidades energéticas mundiales y en los países industrializados, solo cubre el 3% de la energía primaria; con la excepción de los países nórdicos europeos, donde su utilización para producción de calor en centrales avanzadas es bastante común. La figura I.4 agrupa estos cuatro tipos de biomasa en función de su composición.

Lignocelulósica	{ Predominan las celulosas (hemicelulosa y holocelulosa) y la lignina. Paja, madera, etc...
Amilácea	{ Los hidratos de carbono se encuentran en forma de polisacáridos de reserva (almidón, inulina). Cereal, patata...
Azucarada	{ Alto contenido en azúcares, ya sean monosacáridos (glucosa, fructosa) o disacáridos (sacarosa). Caña de azúcar, remolacha...
Oleaginosa	{ Alto contenido en lípidos (aceites o gomas) Girasol, colza, subproductos de industria olivarera...

Figura I.4: Clasificación de la biomasa. Atendiendo a su composición. Fuente: (Arauzo et. al, 2014)

I.4 Procesos de transformación de la biomasa

La biomasa puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan, en general, biocombustibles y específicamente, a todos aquellos, generalmente sólidos y gases, que se aplican con fines térmicos y eléctricos.

Según (Salvador, 2010) la conversión de la biomasa en combustible permite la producción de tres tipos de biocombustibles:

I.4.1 Biocombustibles Sólidos

Los biocombustibles sólidos más importantes, combustibles de tipo primario, son los constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen este tipo de residuos. La paja, la leña, las cortezas y los restos de podas son materia empleada en la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario. Cáscaras de frutos secos, cáscaras de arroz y café, restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una materia prima de calidad para utilizarla como biocombustible sólido.

Mediante la combustión de esta biomasa se obtiene energía que se aprovecha directamente como energía térmica o se transforma en energía eléctrica. El poder calorífico inferior, variable con la humedad del combustible, es la característica más representativa de su calidad.

Aunque una parte importante de la biomasa se utiliza directamente, como por ejemplo la leña en hogares y chimeneas, las nuevas aplicaciones de los biocombustibles sólidos se basan en un tratamiento capaz de acondicionarla a los requerimientos de la demanda. Las formas más generalizadas de utilización de este tipo de combustible son

astillas, serrín, pellets y briquetas. Las astillas constituyen un material adecuado para ser empleado en hornos cerámicos, de panadería, viviendas individuales, calefacción centralizada de núcleos rurales o pequeñas industrias. Se obtienen a partir de los restos leñosos de los tratamientos silvícolas, de las operaciones de corte de madera o de las podas de árboles de cultivos leñosos. Otro grupo de biocombustibles sólidos lo constituye el carbón vegetal que procede de un tratamiento térmico de la biomasa leñosa en atmósferas de bajo contenido en oxígeno. Al ser el resultado de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, se considera un biocombustible de naturaleza secundaria. El carbón vegetal se obtiene mediante la combustión lenta y parcial de biomasa leñosa con un cierto contenido en humedad a una temperatura variable entre 250 y 600°C. El poder calorífico del producto obtenido varía entre 6 000 y 8 000 kcal/kg, dependiendo del contenido en cenizas de la madera.

I.4.2 Biocombustibles Líquidos

La denominación de biocombustibles líquidos o biocarburantes se aplica a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sustitución de los derivados de petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores. Actualmente sólo son comerciales los de primera generación, etanol y biodiesel. En ambos casos las materias primas de las que proceden tienen también uso alimentario. Evitar que la obtención de biocarburantes compita con las fuentes de alimentación y aprovechar la mayor parte del vegetal es la razón que guía el trabajo para disponer de biocarburantes de segunda generación. Tanto la ruta bioquímica como la ruta termoquímica ofrecen caminos apropiados para transformar el material lignocelulósicos en productos destinados a sustituir los carburantes derivados de los combustibles fósiles para lo que es preciso superar varias dificultades antes de implantar esta tecnología.

El bioetanol se obtiene por fermentación de los azúcares procedentes, principalmente, de caña de azúcar y maíz, siendo el biocarburante que se produce en mayor cantidad en el mundo. El producto resultante del proceso de fermentación de los azúcares contiene una gran cantidad de agua que es preciso eliminar para poder utilizarlo como carburante. Se emplean tres familias de materias primas para la obtención del etanol. Azúcares procedentes de la caña o de la remolacha. Almidones procedentes de

cereales como maíz, cebada o trigo. Celulosa y hemicelulosa procedentes del material lignocelulósico de los vegetales.

El biodiesel es un biocarburante líquido que está constituido por ésteres de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales y que se emplean en motores de ignición por compresión.

I.4.3 Biocombustibles Gaseosos

A partir de la biomasa se pueden obtener varios combustibles gaseosos como biogás, gas de gasógeno y gas de síntesis e hidrógeno. El hidrógeno es un vector energético que se presenta como una alternativa a la estructura energética actual debido fundamentalmente a sus ventajas ambientales y a su aplicación en pilas de combustible. Su combustión produce agua y una gran cantidad de energía por lo que resulta idóneo para múltiples aplicaciones industriales, domésticas y de transporte. Este combustible presenta importantes problemas logísticos debido a su inflamabilidad y baja densidad. La digestión anaeróbica es un proceso empleado en la depuración de aguas residuales y efluentes orgánicos de industrias agrarias o de explotaciones ganaderas. Este tipo de transformación se produce de manera espontánea en pantanos o fondos de lagunas y lagos en los que haya depósitos de materia orgánica. El metano, denominado “gas de los pantanos”, también se produce en los vertederos de RSU, pudiéndose extraer mediante perforaciones y redes de transporte adecuadas. La aplicación de este procedimiento a la biomasa da lugar a biogás, en cantidades de unos 300 m³ por tonelada de materia seca.

I.5 Usos de la biomasa

En cuanto a los usos de la energía producida con biomasa, éstos pueden ser para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico (viviendas, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros), calor para procesos industriales y generación de electricidad. En resumen, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

I.5.1 Aplicaciones térmicas

La producción térmica sigue una escala de usos que comenzaría con las calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares. En un segundo escalón

se sitúan las calderas diseñadas para un bloque o edificio de viviendas, equiparables en su funcionamiento a las calderas habituales de gasóleo o gas natural, que proveen a las viviendas de calefacción y agua caliente. En un tercer escalón aparecen las redes de calefacción centralizada (calefacción de distritos), muy extendidas en el norte y centro de Europa. La red de calor y agua caliente llega no sólo a viviendas y urbanizaciones sino también a edificios públicos, centros deportivos, complejos comerciales e incluso industrias. Estas centrales térmicas requieren instalaciones exclusivas, debido al mayor tamaño tanto de las calderas como de los silos de almacenamiento. Estas instalaciones también permiten la distribución de frío para la climatización de viviendas y otros edificios en verano. Asimismo, en algunos casos también pueden cubrirse las necesidades térmicas de ciertas industrias con calderas de biomasa. Las industrias agroforestales normalmente aprovechan sus residuos para la producción de calor y, en ocasiones, se acompaña de producción eléctrica (cogeneración con biomasa) (Cerdá, 2012).

I.5.2. Aplicaciones eléctricas

La producción de electricidad a partir de biomasa sólida precisa de sistemas complejos dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. Para ello se necesitan centrales específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran combustibles convencionales, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento.

Todo ello, unido a la dificultad de aprovisionamiento de la biomasa, hace que tenga menor peso la biomasa eléctrica que la biomasa para usos térmicos en el cómputo global de esta energía. No obstante, la aplicación eléctrica de la biomasa sólida contribuye a la estabilidad de la red de distribución, dada su capacidad para proporcionar al sistema eléctrico garantía de suministro a cualquier hora del día, independientemente de las diferentes condiciones meteorológicas. Se trata, por tanto, de una energía renovable con un carácter gestionable lo que la distingue de otras fuentes renovables. En general, para cualquier combustible, la generación de electricidad típicamente tiene una eficiencia de conversión directa del 35 %, lo cual significa que el contenido en energía primaria es convertido en electricidad (energía final). La producción de calor tiene una eficiencia de conversión directa del 85 %. Una

planta de cogeneración genera a la vez calor y electricidad (por cada unidad de electricidad da dos unidades de calor). La cogeneración con biomasa permite acercar la generación eléctrica y térmica a los centros de producción, reduciendo pérdidas de transporte y evitando la construcción de nuevas plantas de energía convencional que suministren esa demanda eléctrica y térmica (Cerdá, 2012).

I.6 Tecnologías de conversión de biomasa en calor o electricidad

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

Las tecnologías de conversión de biomasa pueden agruparse en cuatro grupos principales:

- Conversión biológica (fermentación, digestión anaerobia, hidrólisis enzimática, compostaje)
- Conversión mecánica (prensado, extracción, producción de pellets,)
- Conversión química (industria papelera, transesterificación)
- Conversión termoquímica (torrefacción, carbonización, pirólisis, gasificación, combustión).

I.6.1 Conversión biológica

La conversión biológica abarca dos opciones de procesos: La fermentación (utilizada para la producción de combustibles) y la digestión (utilizada para la producción de biogás, una mezcla de principalmente de metano y dióxido de carbono). Este último proceso de conversión depende de la acción de microorganismos como enzimas y bacterias para la transformación energética de la biomasa. Una variedad de combustibles puede ser producida a partir de residuos de biomasa incluyendo combustibles líquidos, tales como etanol, metanol, biodiesel y combustibles gaseosos, tales como hidrógeno y metano. Los recursos para la obtención de estos biocombustibles son obtenidos de una amplia variedad de recursos forestales y agrícolas, residuos de procesos industriales, desechos de madera y residuos sólidos urbanos municipales. La materia prima con el mayor potencial para la producción de etanol son los residuos de biomasa lignocelulósica, que incluyen materias primas tales

como residuos agrícolas (rastreo de maíz, paja de los cultivos y bagazo), cultivos herbáceos (alfalfa, pasto elefante), cultivos leñosos de ciclo corto, residuos forestales, residuos de papel y otros desechos (municipales e industriales). Los procesos biológicos, como la digestión anaeróbica, también pueden producir energía limpia en forma de biogás que posteriormente puede ser convertido en potencia y calor utilizando un motor de gas. Otras aplicaciones incluyen la utilización de este producto como sustituto del gas natural o en motores auto-motivos después de un proceso de purificación.

I.6.1.1 Fermentación

Es una técnica empleada hace un tiempo con los azúcares, que puede utilizarse también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias, siendo una operación muy costosa en energía. El proceso se basa en el almacenamiento por parte de las plantas de la energía solar en forma de hidratos de carbono a partir de los cuales se puede obtener alcohol por fermentación, siguiendo diferentes etapas en función del tipo de biomasa de partida. Estas etapas son:

- Pretratamiento de la biomasa: transformación de la materia prima para favorecer la fermentación por medio de trituración, molienda o pulverización.
- Hidrólisis: transformación, en medio acuoso, de las moléculas complejas en azúcares sencillos por medio de enzimas (hidrólisis enzimática) o mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química)
- Fermentación alcohólica: conversión de los azúcares en etanol por la acción de microorganismos (levaduras) durante 2 a 3 días bajo condiciones controladas de:
 1. Temperatura: 27 - 32 °C
 2. Acidez: pH entre 4 y 5
 3. Concentración de azúcares: inferior al 22%
 4. Concentración final de etanol: inferior al 14%
 5. Separación y purificación del etanol: destilación de la masa fermentada para obtener etanol comercial del 96% o destilación adicional con un disolvente (benceno) para obtener etanol absoluto (99,5%).

I.6.1.2 Digestión anaerobia

Proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose solo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. El biogás se produce en todos los ambientes naturales donde haya materia orgánica degradable y bajos niveles de oxígeno. Estas fuentes naturales de biogás son: sedimentos acuáticos, suelos húmedos, la materia orgánica enterrada, animales y tracto digestivo de insectos, y el núcleo de algunos árboles. Las actividades del hombre crean fuentes adicionales que incluyen los rellenos sanitarios, lagunas de aguas residuales, y las estructuras de almacenamiento de residuos. Las principales limitaciones de la hidrólisis enzimática son el alto costo de las enzimas y el requerimiento de grandes reactores debido a la lentitud de la reacción. Además, la celulosa en las fibras vegetales está protegida por las hemicelulosas y la lignina, por lo que se dificulta el acceso de las enzimas. Por eso se requiere que el material lignocelulósico sea pretratado antes de la hidrólisis enzimática para que la celulosa resulte accesible por las enzimas (Arauzo et. al, 2014).

I.6.1.3 Hidrólisis enzimática

En el proceso de hidrólisis enzimática, la biomasa lignocelulósica es primeramente pretratada con vistas a facilitar la accesibilidad del ataque de las enzimas. Durante el pretratamiento, las hemicelulosas son hidrolizadas de forma similar al primer paso de la hidrólisis con ácido diluido, con posterior formación de productos colaterales. El proceso de hidrólisis enzimática se realiza en una segunda etapa, y consiste en la ruptura de los enlaces glicosídicos de la macromolécula de la celulosa por la acción de un complejo de enzimas celulolíticas. Debido a las condiciones más suaves de la hidrólisis

enzimática, se libera una menor cantidad de productos colaterales que en la hidrólisis ácida, lo que resulta en un alto rendimiento de azúcares fermentables (Arauzo et. al, 2014).

I.6.2 Conversión mecánica

I.6.2.1 Construcción de pellet

Son conglomerados en forma de cilindro o esfera obtenidos a partir del proceso de prensado de biomasa como residuos forestales y madera. Para su fabricación se emplean residuos vegetales como madera, serrín, paja o papel. El proceso de prensado se realiza para facilitar el transporte del material, y su almacenamiento, al ocupar menos volumen. Debido a su forma cilíndrica se facilita su carga, pues los pellets pueden "rodar" y gracias a su pequeño tamaño y peso permiten la carga en las estufas y calderas mediante tornillos sin fin u otros sistemas. Otra de las ventajas de sus pequeñas dimensiones es que los pellets pueden distribuirse con camiones cisterna, sacos, bolsas o pallets. Aunque su precio haya subido en los últimos tiempos debido al aumento de la demanda, sigue siendo una opción más barata que el gas, gasoil o electricidad. Los pellets se consideran un combustible ecológico, ya que para su fabricación se utilizan exclusivamente desperdicios, por lo que se aumenta el aprovechamiento de los recursos naturales del planeta. Además, las técnicas de producción son totalmente naturales, pues para su prensado no se utiliza ningún componente artificial ya que es la propia lignina existente en la madera la que hace de aglomerante. Las emisiones de CO₂ a la atmósfera se consideran nulas. La verdad es que, si emiten CO₂ en el proceso de combustión, pero esa cantidad de CO₂ es la misma que se desprendería en el proceso de descomposición de la madera, por tanto, no se está aumentando las emisiones de dióxido de carbono. Aunque hoy en día su principal uso se asocia a la obtención de calor, los pellets también se utilizan para hacer camas para animales, desde los más pequeños como ratones y hámsteres a otros más grandes como caballos. Los pellets aíslan los animales del frío del terreno y además absorben la humedad (Bucheli et. al, 2016).

I.6.3 Conversión termoquímica

Existen un gran número de procesos de conversión termoquímica que producen combustibles y productos químicos de interés a partir de materias primas bio-

renovables. Estos procesos han sido ampliamente estudiados y se pueden dividir en cuatro subcategorías en función de los parámetros de operación: combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción. Cada proceso de conversión conduce a unos productos finales e intermedios diferentes. La Figura I.5 resume los principales procesos de conversión termoquímica y sus productos intermedios y finales

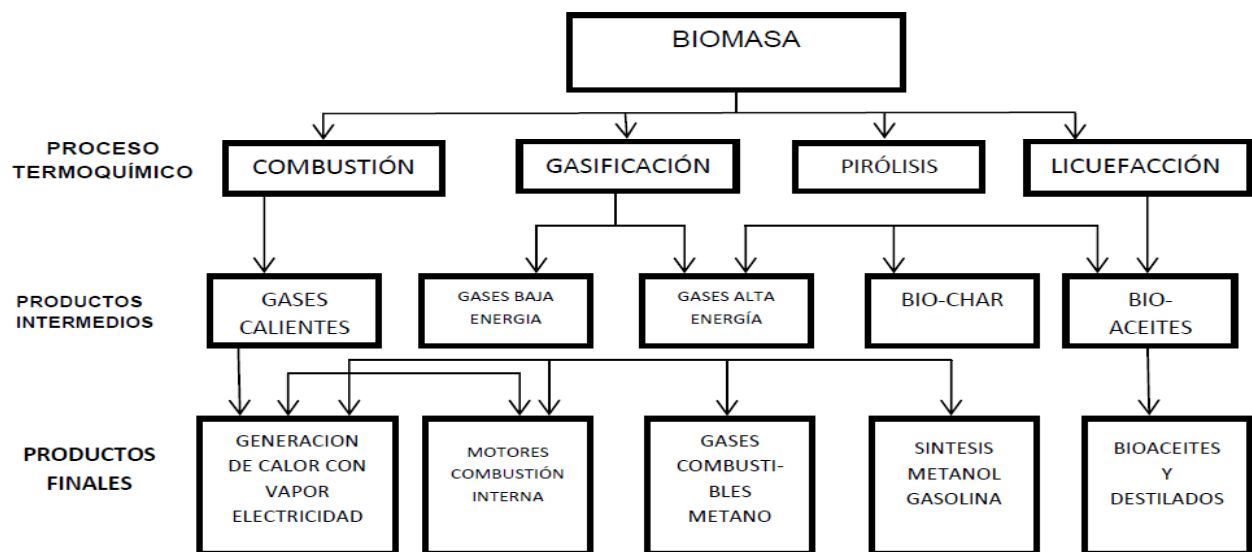


Figura I.5- Esquema de los principales procesos termoquímicos y los productos intermedios y finales que se obtienen de ellos. Fuente: (Pinedo, 2013)

I.6.3.1 Combustión

La combustión es el proceso mediante el cual la biomasa se transforma en gases calientes, con temperaturas alrededor de 800-1000°C, al aplicar una energía térmica elevada en presencia de oxígeno. En la práctica, solo es posible combustionar biomasa con una humedad inferior al 50%. La combustión se puede realizar a pequeña escala (calefacción) o en grandes plantas de escala industrial.

La co-combustión en las centrales eléctricas de la biomasa junto al carbón es una opción atractiva debido a su alta eficiencia de conversión en energía. A pesar de ello, la combustión no se considera un proceso de conversión adecuado ya que no produce combustibles que puedan ser posteriormente utilizados (bioaceites o biogás) (Pinedo, 2013)

I.6.3.2 Gasificación

La gasificación tiene como objetivo la obtención de una fracción mayoritaria de gas combustible, mediante una serie de reacciones que ocurren a temperaturas superiores

a las de pirólisis en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno puro y/o vapor de agua). En definitiva, se trata de una oxidación parcial de la biomasa usando únicamente un 25-30 % del oxígeno estequiométrico para la combustión total de la misma. El proceso de gasificación puede tener carácter autotérmico o requerir, como la pirólisis, de aportes suplementarios de energía para llevarse a cabo. Si bien se maximiza el rendimiento a productos gaseosos, se producen también una fracción sólida (constituida en gran parte por el contenido en cenizas original de la biomasa y una pequeña cantidad de carbono no convertido), y una fracción líquida condensable. (Arauzo, 2014). Según (López, 2014) en cuanto al tipo de contacto existen tres categorías:

Gasificador de lecho fijo:

Se caracterizan por un lecho de combustible que se mueve lentamente hacia abajo por acción de la gravedad mientras se gasifica, alimentándose el gas en sentido descendente (isocorriente) o ascendente (contracorriente). (Figura I.6.)

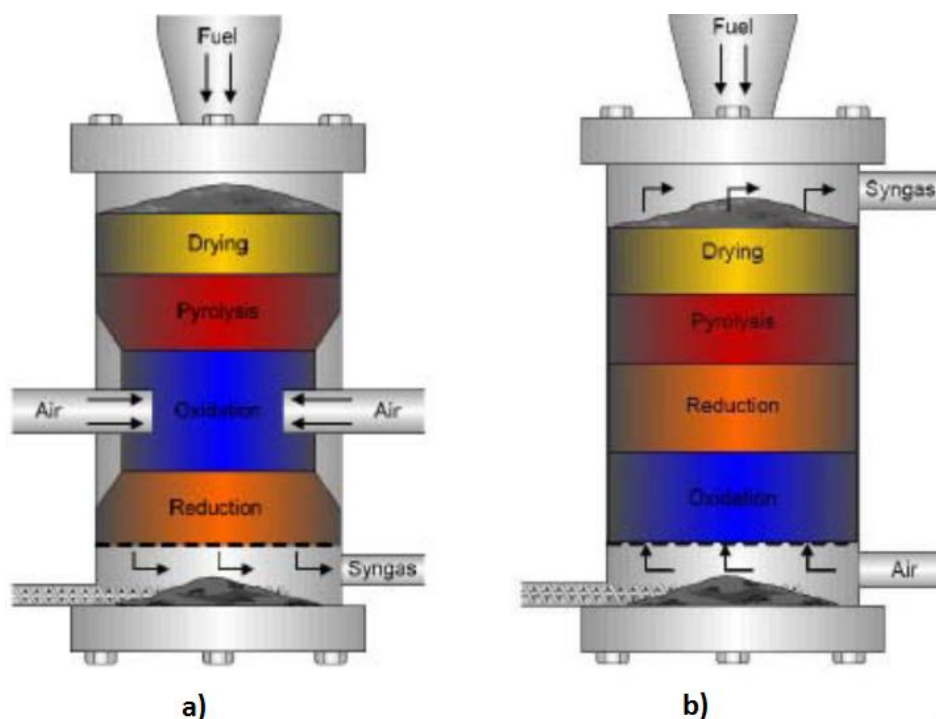


Figura I.6: Tipos de Gasificadores de lecho fijo: a) Gasificador en isocorriente b) Gasificador en contracorriente. Fuente: (López, 2014)

- **Los gasificadores en isocorriente:** Se caracterizan por generar un gas relativamente limpio de alquitranes y con una conversión de carbono elevada. La

temperatura de salida es alta, debido a que el gas atraviesa la zona de oxidación antes de salir del reactor. Sin embargo, su capacidad específica es baja y su potencial de escalado, muy limitado. En estos gasificadores, sólido y gas se mueven en el mismo sentido, normalmente descendente. Este gasificador es de fácil construcción y operación. La principal ventaja de este tipo de gasificador es la de producir un gas relativamente limpio de alquitranes. Sin embargo, no es muy apto para trabajar con sólidos de humedad elevada, y la experiencia que se tiene de estos tipos de gasificadores acoplados a plantas de cierta potencia es escasa.

- **Los gasificadores en contracorriente** presentan una eficiencia térmica más elevada, al ser la temperatura de salida baja, pero con el inconveniente de la elevada carga de alquitranes en el gas producto, lo que obligaría a una exhaustiva limpieza del gas para su uso en determinadas aplicaciones. Aunque sustancialmente mayores que en el caso de los gasificadores en isocorriente, el potencial de escalado y la capacidad específica siguen siendo bajos. En el gasificador contracorriente, sólido y gas se mueven en sentidos contrarios, donde el sólido normalmente va en sentido descendente y el gas ascendente. Este gasificador es de fácil construcción y operación, y su eficacia térmica es alta. La baja temperatura de salida del gas, adecuada para combustión directa, es otra ventaja. El principal inconveniente es que el gas producido contiene los alquitranes y condensables producidos en el proceso de pirólisis inicial de las partículas, por lo que el proceso de limpieza del gas puede volverse tecnológicamente complejo y económicamente costoso. Esta clase de gasificador ha sido probado principalmente en plantas de poca potencia.
- **Los gasificadores Crossdraft** se diferencian de los anteriores en que el agente oxidante se introduce por un lateral del reactor y el syngas sale por el lateral contrario. En este caso, las etapas de gasificación suceden de manera concéntrica a la zona de entrada del agente oxidante. Esto hace que se pueda funcionar con reactores a pequeña escala. En cuanto a la principal desventaja, es su alto contenido en alquitranes.

Gasificador de lecho fluidizado:

Son aquellos en los que el agente gasificante circula por el interior de los mismos a una velocidad ascensional tal que un lecho de sólido inerte, que se añade a su interior, se encuentra en estado de fluidización, existiendo en el interior del gasificador una retromezcla que favorece la transferencia de materia y energía entre el combustible y el gas. Por tanto, el sólido pulverizado es mantenido en suspensión mediante el gas. En estas condiciones, el contacto sólido-gas, la uniformidad en temperatura y conversión son mayores que en los reactores de lecho fijo. Se reduce a sí mismo la tendencia de las partículas a aglomerarse pudiendo adicionarse agentes gasificante a diferentes niveles.

Sin embargo, la complejidad de los equipos aumenta, produciéndose mayor desgaste debido a las mayores velocidades de los sólidos. En este tipo de gasificador, el carburante es fluidizado en una mezcla de vapor de agua y oxígeno o en el aire. Las partículas minerales se recuperan como cenizas. Tiene una alta capacidad específica frente a otros tipos de reactores, aunque el material usado como materia prima debe tener un tamaño de partícula muy reducido.

Debido a la mejor transferencia de calor, los lechos fluidos permiten el procesamiento de una mayor cantidad de material combustible y una mayor producción de gases de reacción. Al ser la temperatura uniforme en todo el lecho, la reacción de gasificación tiene lugar, igualmente, de forma uniforme, lo que favorece la calidad de los gases generados. La mayoría de los gasificadores en desarrollo utilizan una de las dos configuraciones de lecho fluido existentes, el burbujeante y el circulante. Por lo tanto, existen dos categorías dentro de este tipo de gasificadores tal y como se muestra en la Figura I.7

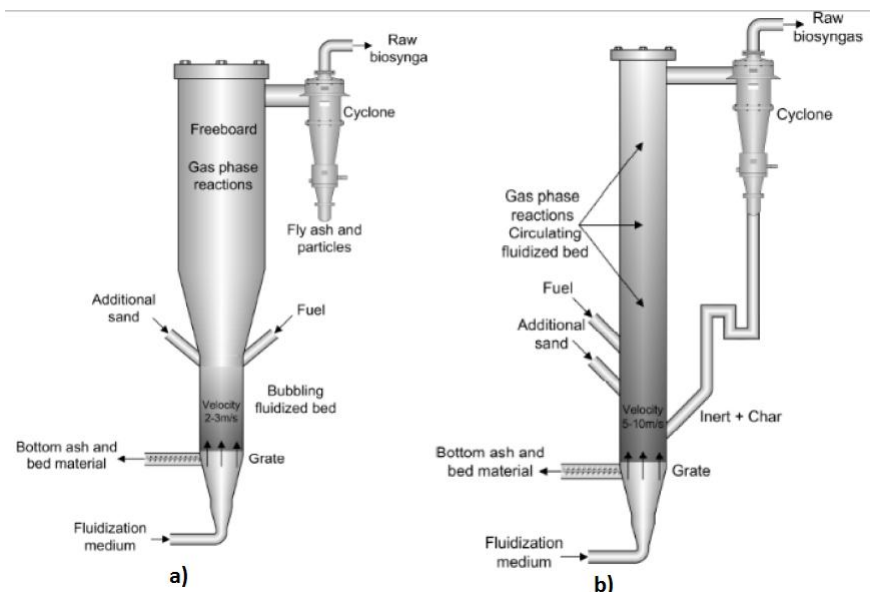


Figura 1.7 Gasificadores de lechos fluidizado a) burbujeantes b) circulantes Fuente: (López, 2014)

- **Lechos fluidizados burbujeantes:** la velocidad del agente fluidizante-gasificante es suficientemente baja para que no haya una circulación significativa de sólido.
- **Lechos fluidizados circulantes:** la velocidad del agente es mucho más elevada, dando como resultado una circulación de sólidos. Este sólido es separado de la corriente gaseosa y recirculado al reactor por medio del uso de un ciclón y un sistema de retorno al gasificador. En cualquier caso, una característica común a los diversos tipos de lechos fluidos (junto con el buen contacto sólidos-gas, la alta capacidad específica, el excelente control de las condiciones como la temperatura y las velocidades de reacción, potencial de escalado a mayores tamaños y adaptación a cambios de combustible empleado como materia prima), es un contenido medio en alquitranes para el gas de salida, y como principal desventaja, un importante arrastre de sólidos y la conversión del combustible no es tan elevada como en los gasificadores de lecho fijo.

Gasificador de lecho arrastrado:

Funcionan, de manera aproximada, como calderas de carbón pulverizado. figura 1.8, donde operan en isocorriente con un tamaño de partícula muy fino, ya que los tiempos de residencia en el reactor son muy bajos. Las altas temperaturas de operación dan

como resultado conversiones muy elevadas y concentraciones de alquitrán en el gas de salida prácticamente nulas. Sin embargo, es una tecnología sobre la que existe poca experiencia para la gasificación de biomasa. (López, 2014).

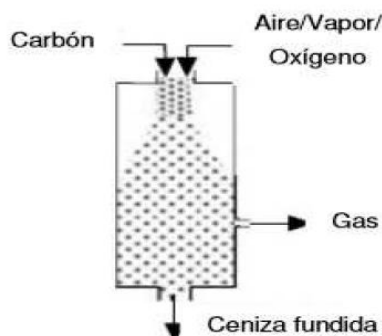


Figura I.8 Gasificador de lecho arrastrado Fuente: (López, 2014)

I.6.3.3 Torrefacción

La torrefacción es un pre tratamiento termoquímico mediante el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente por la ruptura de las moléculas de hemicelulosa, celulosa y en menor grado la lignina. Es una pirolisis mediante la cual la biomasa se pone en contacto con un medio de calentamiento que eleva su temperatura gradualmente ($<50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) hasta $200 - 300^{\circ}\text{C}$. Este proceso es energéticamente controlado por diferentes etapas y regímenes térmicos. El calentamiento inicial de la biomasa ($20\text{-}120^{\circ}\text{C}$) remueve la humedad ligada físicamente y, posteriormente las moléculas de agua químicamente enlazadas, a través de un proceso de termocondensación ($>160^{\circ}\text{C}$).

Los procesos de torrefacción varían según el tipo de reactor utilizado y el grado de integración energética. Según (Pérez, 2015) la mayoría de estos han sido desarrollados sobre la base de tecnologías existentes (secado) y los retos fundamentales en relación a las tecnologías están básicamente en:

- Procesar materiales de diferentes propiedades y granulometrías.
- Integrar energéticamente el proceso.
- Recuperar y tratar los efluentes gaseosos y líquidos generados durante la descomposición de la biomasa.

Los reactores para torrefacción se clasifican, según el método de contacto entre el sólido y el medio de calentamiento, en reactores de contacto directo o indirecto. La fase

fluida, el mecanismo de transferencia de calor y el movimiento de la biomasa, son las características que distinguen los diferentes equipos en cuanto a los diferentes modelos y diseños de reactores para torrefacción (Pérez et. al, 2015). (Ver Tabla I.1)

Tabla I.1. Modelos de reactores para torrefacción. Fuente: (Pérez, 2015)

Reactor	Ventajas	Limitaciones
Tambor rotatorio	Simple Baja caída de presión Operación en contacto directo o indirecto	Mala transferencia de calor Difícil control de temperatura Mayor tamaño/capacidad Difícil escalado
Lecho móvil	Simple operación y construcción Alta densidad de lecho Elevada transferencia de calor	Alta caída de presión Difícil control de temperatura
Tornillo	<i>Posibilidad de flujo en pistón</i> <i>Tecnología madura</i>	Calentamiento indirecto Baja capacidad de transferencia de calor Difícil escalado
Hogares Múltiples	Diseño probado Fácil escalado Facilidad para el control del tiempo de residencia y la temperatura	Reactores de gran tamaño Difícil escalado
Lecho fluidizado	Eficiencia para transferencia de calor Escalable	Requiere partículas de pequeño diámetro Requerimiento adicional de gas para fluidización

I.6.3.4 Pirólisis

Consiste en el calentamiento de un material biomásico en ausencia total de oxígeno u otros agentes oxidantes (debe hacerse notar que la torrefacción, mencionada en el párrafo anterior, es un proceso de pirólisis a bajas temperaturas). Como consecuencia

de este calentamiento a temperaturas moderadas (generalmente hasta un máximo de unos 600°C), se produce la descomposición térmica de la biomasa y la obtención de tres fracciones principales de producto: sólido, líquido y gas. Es interesante destacar que el control de las condiciones de operación, fundamentalmente de la temperatura final y la velocidad de calentamiento, permite dirigir el proceso a la obtención prioritaria de uno de estos tres productos, si bien la formación de los otros dos ocurre inevitablemente (aunque en menor medida). La pirolisis es un proceso endotérmico, y la energía para poder llevarla a cabo suele proporcionarse mediante la combustión parcial o total de alguna de las fracciones de producto generadas en el proceso y de la materia prima de partida (Arauzo et al, 2014).

I.7 Tecnologías existentes en Cuba para el aprovechamiento de la biomasa

La meta principal de la transferencia y difusión de las tecnologías priorizadas en nuestro país es aumentar la oferta de electricidad, disminuir el uso de combustible fósil a la vez que se aumenta la efectividad de la transportación de carga. Si se utilizan los residuos de los aserraderos valorizándolos al generar electricidad a la vez que deja de utilizar la del sistema eléctrico ayuda además a resolver un problema ambiental. Para la selección de las tecnologías de mitigación del cambio climático primero se analizaron todas las posibles tecnologías

Para la generación de electricidad dentro del sector energía se han seleccionado y priorizado tecnologías como:

1. Utilización de turbinas de extracción-condensación con bagazo
2. Ciclos combinados con gasificación integrada utilizando biomasa forestal

En la agricultura dentro del sector energía se evaluaron y priorizaron 3 tecnologías.

1. Gasificación de la cascara de arroz para la producción de calor y electricidad
2. Gasificación de residuos de aserraderos para la producción de electricidad
3. Tratamiento anaeróbico de los residuales porcinos para la producción de electricidad

I.7.1 Turbinas de extracción-condensación con bagazo

Según (Pérez, 2013) actualmente están en funcionamiento en el país 62 centrales azucareros con una capacidad de cogeneración de 498 MW. La tecnología instalada se basa en el ciclo Rankine. La capacidad de las calderas instaladas oscila entre 15 y 80 t/h, con presiones de vapor entre 1 MPa y 2,8 MPa. Las turbinas de vapor son de

contrapresión y su potencia unitaria está entre los 1 y 12 MW, con más de 25 años de explotación. La quema de la biomasa cañera se realiza con el objetivo de producir vapor para el proceso de producción de azúcar y para la cogeneración de electricidad. Como promedio en el país en el 2010 los centrales cogeneraron 36.6 kWh/tcm, aunque hay centrales que llegaron a 48.7 kWh/tcm. Elevando los parámetros y con turbinas de extracción-condensación se pueden llegar a obtener 120 kWh/tcm y es la opción de mitigación que se considera, que sustituye a una termoeléctrica de 180 MW. Obteniendo como beneficio esta opción de mitigación tiene 5% menor de eficiencia y de factor de utilización que la termoeléctrica, con igual vida útil, pero con costos insignificantes de combustible, con ahorro anual de 97 millones de pesos.

I.7.2 Gasificación de residuos forestales para la producción de electricidad

La introducción de esta tecnología tiene grandes perspectivas, y ya existen plantas, por ejemplo, en la Isla de la Juventud donde funciona un motor diésel de 50 kW con gasificación de biomasa forestal.

Debido a que en Cuba existe un potencial importante de biomasa forestal, es que se evalúa como opción de mitigación respecto a una termoeléctrica convencional de 100 MW. Obteniendo como beneficio un 5% menor de factor de utilización y costos de inversión instalado que es mucho mayor a los de una termoeléctrica, pero al igual que en el caso anterior, el costo de combustible es insignificante, con un ahorro anual de 57 millones de pesos respecto a la termoeléctrica.

La industria del procesamiento de la madera es una actividad que por naturaleza produce significativas cantidades de residuos de biomasa. En el caso de Cuba se procesan aproximadamente 200 000 m³ de madera anualmente lo que se estima produce un volumen de residuos en el orden de los 90 000 m³. Debido a que la capacidad productiva de estos aserraderos no permite la instalación de capacidades de generación eléctrica superiores a los 2 MW, se ha escogido como tecnología para su uso en la generación de electricidad, la gasificación de biomasa.

Por medio de esta opción es posible instalar cerca de 19 MW de potencia, abastecer la industria y convertirse en un generador neto de electricidad, a la vez que se resuelve el problema medio ambiental asociado a la deposición de estos residuos, se reduce el peligro de incendios. Obteniendo como beneficio el costo de inversión para implementar

esta opción se estima en 38 millones de pesos y los ingresos por el costo evitado al SEN en la generación de electricidad está en el orden de los 11,5 millones de pesos. (Pérez, 2013).

Conclusiones parciales

1. A partir de la revisión bibliográfica existe actualmente a nivel internacional una participación de la biomasa del 14 % en el consumo total de energía, existiendo aún casi el 80 % de dependencia en los combustibles fósiles. En Cuba es baja la utilización de las fuentes renovables de energía, pues con ellas solo se produce el 4,3 % de la electricidad del país, donde la biomasa representa solo el 3,5 %.
2. Se caracterizaron los distintos tipos de biomasa, procesos de conversión, así como las tecnologías para el mejor aprovechamiento.
3. En Cuba partiendo del análisis de las tecnologías existentes para la conversión de la biomasa se han seleccionado y priorizado tecnologías fundamentalmente: Utilización de turbinas de extracción-condensación con bagazo, ciclos combinados con gasificación integrada utilizando biomasa forestal y así como la gasificación de la cascara de arroz para la producción de calor y electricidad.

Capítulo II

Capítulo II Materiales y métodos

II.1 Introducción al capítulo.

La provincia de Cienfuegos (Figura II.1) cuenta con una importante riqueza biomásica, en gran parte procedente de la caña de azúcar, arroz, café, forestal y de sus industrias derivadas. El aprovechamiento energético de estas biomásas permite la sustitución de combustibles fósiles, un mayor autoabastecimiento y diversificación energética. En este apartado se describen las principales biomásas producidas en la región y los principales usos y características de las mismas.

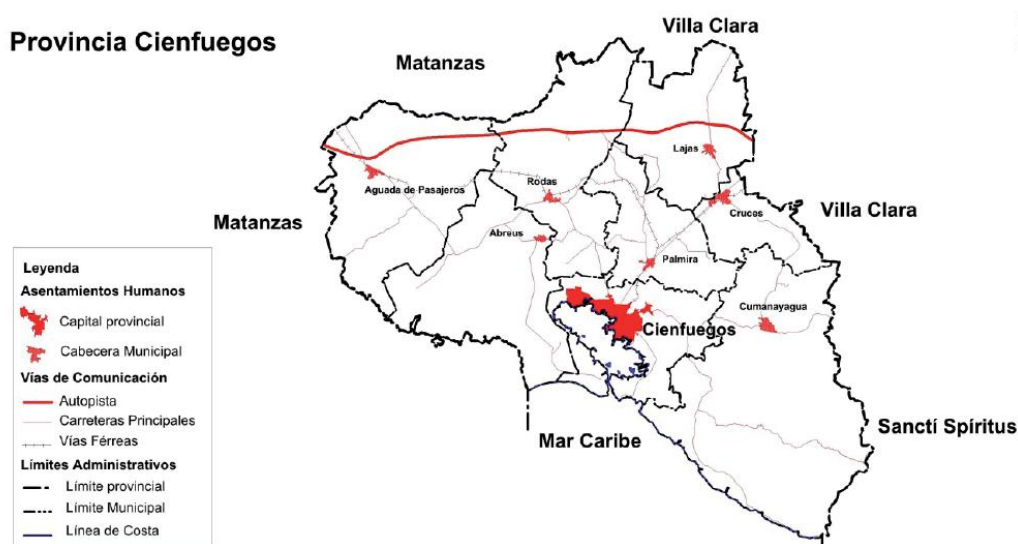


Figura II.1 Ubicación geográfica de la provincia de Cienfuegos. Fuente: (García, 2016)

II.2 Biomasa potencial de la industria azucarera

La caña de azúcar tiene el mayor potencial de conversión solar de todos los cultivos, hasta un 6,7%. Los subproductos y desechos de la industria azucarera y los residuos agrícolas de la caña de azúcar son las principales fuentes de biomasa en la provincia de Cienfuegos. La producción de electricidad en las fábricas de azúcar se basa en el bagazo y la combustión de paja de caña de azúcar en hornos de biomasa para producir vapor, que a su vez se utiliza para producir electricidad y calor. La paja de caña de azúcar es un desecho agrícola de la cosecha, mientras que el bagazo es un subproducto de la industria azucarera. El excedente de electricidad producido se vende a la red eléctrica nacional. En vista de su disponibilidad y características, la cachaza y el marabú también son adecuados para la combustión en los hornos. La industria

azucarera en Cuba opera sólo durante 3 600 h anuales, encontrándose inactiva la otra parte del año.



Figura II.2 Ubicación de los centrales de la provincia de Cienfuegos. Fuente (AZCUBA, 2016)

Las 5 fábricas azucareras operativas de la provincia (Figura II.2) tienen una capacidad instalada de generación eléctrica de 29 MW en total y pueden producir 104,4 GWh de electricidad durante la temporada de molienda de la caña de azúcar. En el 2013, utilizando 1 911 kilotoneladas de caña de azúcar molida, las fábricas azucareras de Cienfuegos generaron 26,7 GWh de electricidad y 819 GWh de energía térmica. Estas industrias operan con tecnología obsoleta que provoca una baja generación de electricidad: las calderas de vapor trabajan a una presión de generación de 1,8-2,3 MPa combinada con turbogeneradores de contrapresión de hasta 8 MW. Esta tecnología permite producir hasta 41 kWh/tcm. Actualmente la producción de electricidad en las 5 fábricas es de 27 kWh/tc, mientras que la producción de azúcar consume 13 kWh/tc, por lo que la producción excedente de electricidad es de sólo 14 kWh/tc (Gutiérrez et. al, 2016).

Para la estimación de las cantidades de biomasa actual en la Industria Azucarera en Cienfuegos se recopilaron las informaciones ofrecidas por la empresa azucarera AZCUBA en la provincia.

II.2.1 Biomasa residual de la caña de azúcar.

II.2.1.1 Bagazo

El creciente desarrollo de la industria de los derivados y el tradicional compromiso energético del bagazo comienzan a adquirir una relevante significación económica. El bagazo se usa históricamente como combustible en la industria azucarera. Aunque su valor calórico es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay dudas de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para nuestro país que no tiene disponibilidades significativas de combustible y a la vez es un gran productor de azúcar de caña. Tiene relevante importancia en la alimentación animal y potencialmente puede convertirse en la materia prima que garantice el desarrollo de diversas producciones, sirviendo, así como abono natural del suelo. Se ha demostrado la posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima.

II.2.1.2 Cachaza

La cachaza se puede definir como el residuo en forma de torta que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de caña, durante la fabricación de azúcar crudo. El residuo que se obtiene por sedimentación del jugo suspendido y con posterioridad se somete a filtración se le denomina cachaza primaria y cachaza final al residuo que se descarga de los filtros para ser desechado.

La utilización más difundida es como fertilizante, a causa de la gran cantidad de nitrógeno, fósforo, calcio y materia orgánica en general, que aporta al suelo. Entre los experimentos realizados se han obtenido buenos resultados, en las plantaciones cañeras. Se utiliza en la alimentación de ganado vacuno previo secado al sol, con buenos resultados, aun cuando tiene un bajo valor alimenticio, y además en el ensilaje a partir de los residuos de la agroindustria cañera.

Otra de las aplicaciones de la cachaza es la extracción de cera con solventes orgánicos, para sustituir diferentes tipos de ceras naturales y derivadas del petróleo. También se han realizado estudios para determinar las posibilidades de obtener de la cachaza: aceites y resinas (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016)

II.2.1.3 Residuos de la cosecha

En el caso de nuestra provincia, se han diseñado estaciones de separación en seco denominadas como centros de acopio y de limpieza donde la caña se reduce longitudinalmente y además se separan debido a fuertes corrientes de aire las fracciones más ligeras como son las hojas verdes y secas, el cogollo y algunos trozos de caña en adición a otras materias extrañas acompañantes derivadas del tiro mecanizado.

El alto por ciento de cogollo y caña limpia de los residuos agrícolas le confiere un potencial energético de alto valor cuando se considera como fuente de alimento animal, presentando características nutricionales muy similares a las plantas forrajeras.

La paja de caña, constituida por la vaina y las hojas secas, tiene una estructura muy diferente a la del cogollo. La composición de la paja es muy parecida a la del bagazo, a excepción de que la primera no contiene azúcares y posee una humedad natural inferior a la del bagazo. Para fines de alimentación animal, la paja con las vainas constituye la fracción menos asimilable, pero es la más interesante desde el punto de vista de utilización energética. El empleo de la paja para la producción de energía, por sus ventajas como recurso renovable, ha sido siempre preocupación de investigadores y especialistas y constituye un tema latente de investigación. Con la finalidad de incrementar el valor natural de estos residuos puede implementarse la clasificación de estos en fracciones (secas y verdes según el propósito) y brindar un subsiguiente y adecuado tratamiento químico o físico y mezclado con otros productos para incrementar su valor nutricional. Un aspecto importante a considerar, consiste en que se pueden conseguir por esta vía, en plena etapa de sequía, grandes cantidades de materia verde capaz de ser asimilada por el ganado y evitar la depauperación del mismo en este período. Una opción económicamente atractiva la constituye la utilización de la paja de la caña para la obtención de sustrato en el cultivo de hongos comestibles y al final del proceso productivo contar con un forraje beneficiado y enriquecido para el ganado. Para esta opción resultan particularmente importantes las fracciones secas, en las cuales son más moderados los procesos fermentativos que pudieran competir con el cultivo que se inocula en la masa vegetal. De hecho, se entiende con carácter imprescindible

el envejecimiento del sustrato antes de ser incorporado a la producción, lo cual se logra con técnicas de almacenamiento controlado (Martínez, 2014).

II.3 Biomasa residual de la producción de café.

La Empresa Procesadora de Café Eladio Machín se encuentra localizada en la calle Napoleón Diego #265 Zona Industrial. Reparto Rafaelito del Municipio Cumanayagua, provincia Cienfuegos. Se subordina al MINAG y directamente al Grupo Agro-Forestal (GAF). La actividad fundamental es acopiar, procesar y comercializar de forma mayoritaria café en grano, cereza, cáscara y pergamino para la exportación y consumo nacional. (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2017)

Según (Molina, 2014) es la planta de beneficio industrial del grano que se sitúa dentro de los cuatros colectivos a la vanguardia en el país por sus indicadores. Su destaque a escala nacional se relaciona con un alto rendimiento industrial que oscila entre los 2 kg por lata en la variedad Arábica y 2,6 en la Robusta. A lo anterior se añade el índice de despulpe, por encima del 96 % del café acopiado. El 83 % de las cerezas es de primera calidad, lo cual posibilita cumplir con los planes del “Crystal Mountain”, marca avalada por el mercado japonés, cuya tonelada se cotiza entre 14 000 y 16 000 CUC en la actualidad.

II.3.1 Principales características del Café.

Los granos de café o semillas están contenidos en el fruto del arbusto, los cuales en estado de madurez toman un color rojizo y se les denomina “cereza”, cada una de ellas consiste en una piel exterior que envuelve una pulpa dulce, debajo están los granos recubiertos por una fina membrana dorada que envuelve las dos semillas de café.

El fruto del cafeto cuyas semillas tostadas y molidas se utilizan para el consumo humano está compuesto por:

- Una cubierta exterior llamada pulpa
- Una sustancia gelatinosa azucarada que recibe el nombre de mucílago
- Una cubierta dura que se denomina pergamino o cáscara
- Una cubierta más delgada y fina llamada película
- El grano, que es la parte del fruto que una vez tostada y molida se utiliza para la producción del café bebida.

II.3.2 Proceso de producción del café

La cadena de producción del café consta de 4 procesos fundamentales:

- Producción del grano
- Beneficio Húmedo del café
- Beneficio Seco del Café
- Industrialización del producto.

Básicamente el proceso consiste en transformar el café desde su forma inicial, o cereza en café tostado que sirva para la preparación de la bebida. La figura II.3 muestra de manera general el proceso de transformación.

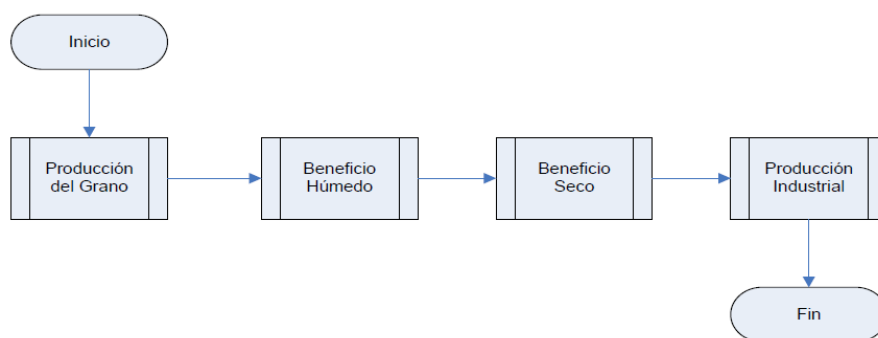


Figura II.3: Proceso de Producción del Café. Fuente: Elaboración propia

II.3.3 Producción del grano

Según la (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2017) la primera etapa del proceso, consiste en la siembra, cuidado del cultivo y recolección del grano. Con el fin de garantizar la calidad del producto final los recolectores cosechan granos que tengan un aspecto amarillo o rojizo (Ver Figura II.4).



Figura II.4: Izquierda: Café Cereza. Derecha: Café Pergamino. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2017)

II.3.4 Beneficio húmedo del Café

El proceso se inicia con la etapa de recepción y clasificación de los granos de café, donde inmediatamente estos son cosechados, se busca eliminar los granos verdes y algunas otras impurezas de la carga como hojas, ramas o piedras. Posteriormente después el café se somete al proceso de despulpe en las Despulpadoras de San Blas, Cuatro Viento y El Nicho. Este consiste en separar la pulpa o cáscara del grano de café mediante las máquinas despulpadoras, las que funcionan con base en la presión y fricción que se ejerce sobre las cerezas por medio de dos superficies, una fija y otra móvil. La finalidad es obtener café sin cáscara.

Una vez la cáscara ha sido retirada se procede a la eliminación del mucilago. Se trata de una operación cuidadosa y su importancia radica en la selección del proceso ya que esta puede ser por fermentación natural o a través de máquinas. Una deficiente remoción del mucílago puede deteriorar la calidad del grano o crear retardos en las etapas siguientes del beneficio, reduciendo la eficiencia del proceso. El proceso mecánico consiste en introducir el café despulpado en una estructura metálica en la que por medio de presión y fricción sobre el grano se desprende el mucílago o baba. El proceso de fermentación, que puede ser acelerado con el uso de productos químicos, retira naturalmente la baba del grano para un posterior lavado de los granos usando agua.

Una vez concluido el proceso de retirar el mucilago, el café es depositado en unas tolvas donde se escurre el exceso de agua, a esta etapa se le conoce como oreado y en ella se elimina entre el 15% y el 20% de la humedad del café. El oreado es especialmente importante en los picos de cosecha pues facilita el secado. Finalmente, este se procede al secado con el fin de obtener el café pergamino. Existen varias formas de secar el café, las más comunes son usando hornos de secado, la mayoría alimentados por los residuos del café, donde se deja reposar el café entre 18 y 36 horas a una temperatura cercana a los 70°C, o secando al sol. En la figura II.5 se presenta el subproceso de beneficio húmedo del café (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2017).

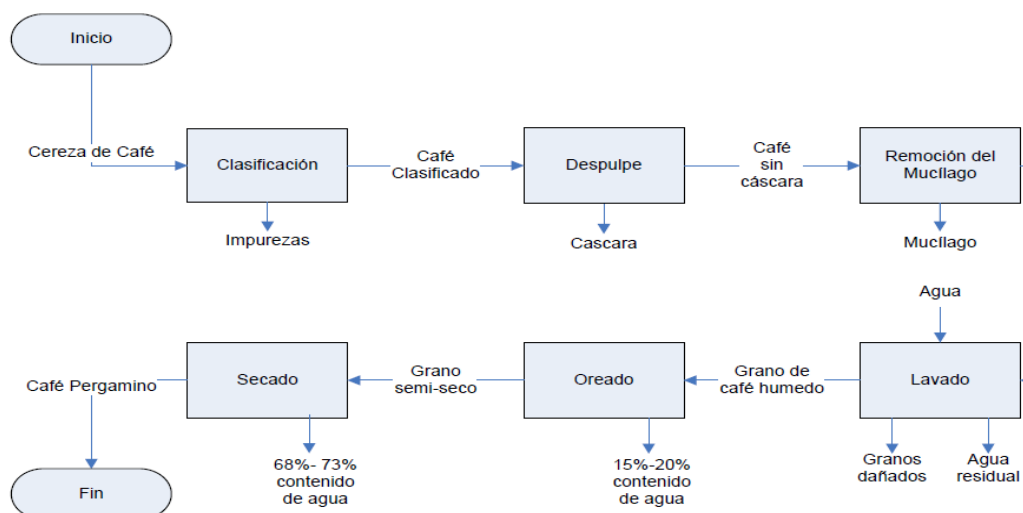


Figura II.5: Subproceso de Beneficio Húmedo del Café. Fuente: Elaboración Propia

II.3.5 Beneficio seco

En el proceso de beneficio seco, el café es transportado a la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, donde se clasifica de acuerdo a su granulometría y posteriormente trillado para la obtención del “café oro”, producto que pasa al proceso de industrialización. El principal residuo de café es la cascarilla o cisco. La figura II.6 presenta el subproceso de beneficio seco del café.

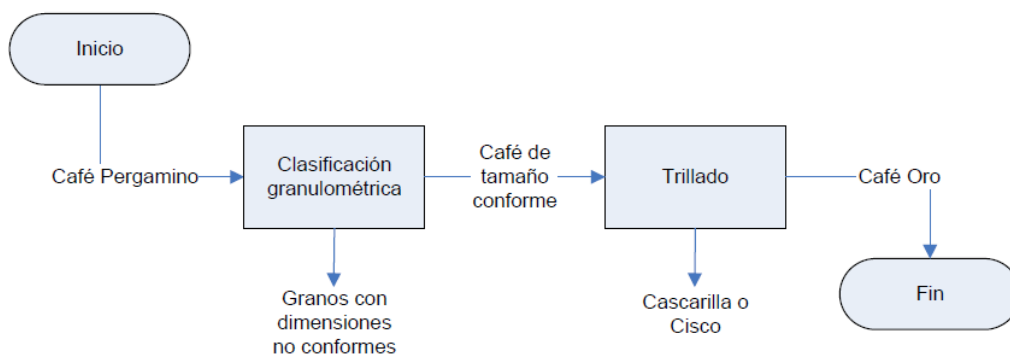


Figura II.6 Subproceso de beneficio seco del café. Fuente: Elaboración Propia

II.3.6 Análisis de los residuos de la producción de café

Para el análisis de los subproductos de las etapas de beneficio del café se presenta en la Tabla II.1 la composición del grano, particularmente la variedad *Café arábica* pues es esta la que se cultiva en las fincas, en base húmeda y en base seca:

Tabla II.1: Composición del grano de café en base húmeda. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2017)

Etapas del Grano	Composición	% del grano en base húmeda
Café Cereza	Pulpa	41,6%
	Mucilago	15,6%
Café Pergamino	Cascarilla	4,30%
Café Oro	Grano	38.50%

Para calcular el total de mucílago generado se emplea la ecuación II.1 (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016):

$$P_{rm} = 15,6 * P_{cc} \quad \text{Ec. II.1}$$

Donde: P_{rm} , Producción de residuos del mucílago (t); P_{cc} , Producción de café cereza (t)

El total de cáscara generada se calcula utilizando la expresión II.2 (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016)

$$P_{rcs} = 41,6 * P_{cc} \quad \text{Ec. II.2}$$

Donde: P_{rcs} , Producción de residuos de la cascara (t)

La Tabla II.2 presenta la composición del grano de café en base seca para cada una de las etapas que este transita.

Tabla II.2: Composición del grano de café en base seca. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016)

Etapas del Grano	Composición	% del grano en base seca
Café Cereza	Pulpa Seca	29%
	Mucílago	4%
Café Pergamino	Cascarilla	22%
Café Oro	Agua y volátiles	6%
	Grano	39%

Las anteriores tablas muestran el porcentaje en peso que pasa de una carga de café al proceso de tostado del café. En cuanto al café industrializado algo más del 90% de la

biomasa de cada grano se desperdicia, sólo un 9,5% se emplea en la preparación de la bebida. Entre los residuos que se generan se encuentra la cascarilla o cisco de café que constituye alrededor del 22% del grano en base seca con una eficiencia de producción de 78%. La producción de café oro se calcula utilizando la ecuación II.3 (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016):

$$P_{co} = P_{ps} * \eta \quad \text{Ec. II.3}$$

Donde: P_{co} , Producción de café oro (t); P_{ps} , Producción de pergamino seco (t) η , Eficiencia industrial.

Para calcular la producción de cascarilla de café se utiliza la ecuación II.4 (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016):

$$P_{rc} = 0,22 P_{ps} \quad \text{Ec. II.4}$$

Donde: P_{rc} , Producción de cascarilla de café (t)

II.3.7 Usos de los residuos del beneficio del café

Tradicionalmente la pulpa y la cascarilla del café han encontrado un rango limitado de aplicaciones, se ha usado la cascarilla para la producción de ácido cítrico y algunos otros compuestos aromáticos usados en la industria alimentaria. Particularmente la cascarilla se ha usado en Cienfuegos, tradicionalmente como combustible con el fin de generar calor que puede ser usado en el proceso de secado del grano de café.

La pulpa del café resulta útil para numerosos usos, entre los más frecuentes se encuentra la fabricación de alimentos para animales en granjas, también se ha usado en la obtención de cafeína, extractos proteínicos para ser usados en la industria alimenticia, fermentación para la producción de alcoholes. Se puede utilizar la pulpa además para producción de abonos orgánicos con la ayuda de la lombriz de tierra común y en el cultivo de hongos de valor comercial.

II.4 Biomasa residual del arroz.

Un potencial energético que aún no se aprovecha en su totalidad se encuentra disponible en los residuos sólidos de la agricultura. Según (Piñas, 2014) la cascarilla de arroz es actualmente un residuo con gran potencial de contaminación si no se es tratada adecuadamente, pero también tiene un alto potencial para la generación energética ya que genera 3,5 MWh de energía por cada tonelada de este residuo. En tal sentido se ha realizado el presente estudio en la zona de Aguada con fines de

generación energética. En esta región existen zonas donde se cultivan importantes áreas de arroz, lo que ha originado la formación de industrias molineras localizadas estratégicamente a lo largo de la región. Para el cálculo de la producción de arroz listo para el consumo se utiliza la ecuación II.5 (Oficina de Estadísticas de la Empresa de Granos de Aguada, 2016):

$$\mathbf{Pal} = \mathbf{Pac} * \boldsymbol{\eta} \quad \text{Ec. II.5}$$

Donde: **Pal**, Producción arroz listo para el consumo (t); **η** , Rendimiento industrial

Para calcular la producción de cascarilla de arroz se utiliza la siguiente ecuación II.6 (Empresa de Granos de Aguada, 2016):

$$\mathbf{Prda} = \mathbf{0,698} * \mathbf{Tr} \quad \text{Ec. II.6}$$

Donde: **Prda**, Producción de cascarilla de arroz (t) ; **Tr**, Total de residuos (t)

La industria molinera además de obtener arroz en el proceso productivo también se generan varios residuos como son el polvo de arroz y la cabecilla tal y como se muestra en la figura II, se consideran subproductos al utilizarse como alimento animal por el valor nutritivo que poseen, mientras que la paja de arroz o restos de la planta después de la cosecha, así como la cascarilla o cáscara de arroz, las impurezas o residuos del secado, obtenidas en el procesamiento industrial de secado y limpieza del grano, no cuentan actualmente con una disposición final ambientalmente adecuada

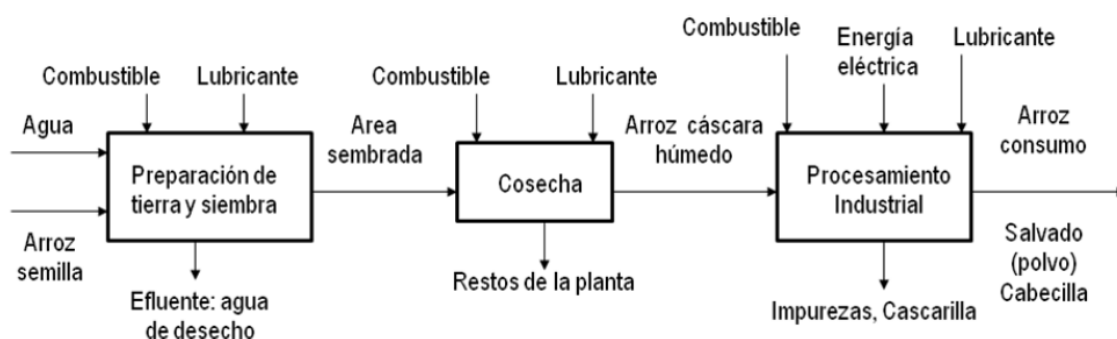


Figura II.7. Esquema energético-productivo del UEB arrocera en la provincia de Cienfuegos. Fuente: (Empresa de Granos de Aguada, 2016)

Aunque existen métodos disponibles para el uso de la paja, por ejemplo: como alimento animal, combustible, fibras para pulpeado, etc., la práctica más usual es quemarla a cielo abierto, provocando contaminación atmosférica y erosión en los suelos. En cuanto a la cáscara de arroz la tendencia mundial es la conversión en energía mediante

procesos termoquímicos debido a su alto contenido en componentes inorgánicos. La cascara de arroz actualmente es considerada como un producto de desecho del proceso de pilado del arroz y que actualmente no es valorado comercialmente por los molinos de arroz. Existen algunas experiencias en donde se están aprovechando para diferentes usos tales como:

- Cama de pollos en granjas avícolas
- Compostaje
- Combustión de hornos secadores

La cascarilla de arroz puede ser aprovechada de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlada, ya que la cascarilla de arroz posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. Debido a la estructura cerrada, la combustión se dificulta y por el alto contenido de sílice (el 20%), es de muy baja biodegradabilidad en condiciones del ambiente natural. La temperatura máxima que se obtiene al ser quemada varía de acuerdo con su condición: 970°C (seca), 670°C (con algún grado de humedad) y hasta los 1 000°C mezclada con combustible (Piñas, 2014).

I.5 Biomasa de los residuos aserraderos

En la actualidad, los bosques y sus residuos forestales, así como los residuos del procesamiento de la madera, constituyen un recurso aprovechable con fines energéticos, aspecto que toma en cuenta, los altos precios del petróleo como combustible fósil y las grandes emisiones propiciadas por tecnologías consumidoras por este tipo de combustible. El consumo tradicional de madera como combustible a nivel mundial asciende a 1,777 millones de metros cúbicos, equivalentes a 600 millones de toneladas de combustible fósil. En Cienfuegos se realizó el estudio del potencial de biomasa forestal a partir de las fuentes siguientes: bosques, marabú y residuos de la industria forestal. En la Tabla II.3 se muestra los principales residuos aserraderos y su destino.

Tabla II.3: Identificación de los recursos de biomasa. Fuente: Elaboración propia

Recursos	Proceso generador	Residuos	Destino
Residuos de Industria	Aserraderos	Leña, costaneras y serrín	No se usan para energía

Los volúmenes de tierras autorizados para la explotación forestal en la provincia son de 51 833 hectáreas según el (Centro Nacional de Control de la Tierra, 2015). Las actividades en estas zonas son realizadas por los aserríos o aserraderos conformados por diferentes etapas, entre las que destacan el sistema de recepción de la biomasa, las bandas transportadoras, los sistemas de corte longitudinal (descortezadora), de corte transversal (sierras), una fuente de potencia (alimentada por motores diésel) y un lugar de recolección de los productos finales. En los aserríos escogidos para el estudio trabajan a un 53% y 55% de eficiencia de corte de la madera.

Para Aserraderos de tecnología atrasada como se le conoce el total de madera aserrada se calcula utilizando la ecuación II.7 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Maav} = 40\% \mathbf{Maa} \quad \text{Ec. II.7}$$

Donde: **Maav**, Madera aserrada en aserríos tecnologías atrasadas (m^3); **Maa**, Madera aserrada al año (m^3)

El total de residuos que genera la madera en bolo se calcula utilizando la ecuación II.8 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Tr} = 53\% \mathbf{mb} \quad \text{Ec. II.8}$$

Donde: **Tr**, Total de residuos (m^3); **mb**, Madera en bolo (m^3)

El total de serrín se calcula utilizando la ecuación II.9 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Trs} = 88\% \mathbf{Tr} \quad \text{Ec. II.9}$$

Donde: **Trs**, Total de residuos de serrín (m^3)

El total de costanera se calcula utilizando la ecuación II.10 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Trc} = 12\% \mathbf{Tr} \quad \text{Ec. II.10}$$

Donde: **Trc**, Total de residuos de costanera (m^3)

Para Aserraderos de tecnología nueva el total de madera aserrada se calcula utilizando la ecuación II.11 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Maan} = 60\% \mathbf{Maa} \quad \text{Ec. II.11}$$

Donde: **Maan**, Madera aserrada en aserríos nuevos (m^3); **Maa**, Madera aserrada al año (m^3)

El total de residuos que genera la madera en bolo se calcula utilizando la ecuación II.12 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Tr = 55\% mb} \quad \text{Ec. II.12}$$

Donde: **Tr**, Total de residuos (m^3); **mb**, Madera en bolo (m^3)

El total de serrín se calcula utilizando la ecuación II.13 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Trs = 85\% Tr} \quad \text{Ec. II.13}$$

Donde: **Trs**, Total de residuos de serrín (m^3)

El total de costanera se calcula utilizando la ecuación II.14 (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016):

$$\mathbf{Trc = 15\% Tr} \quad \text{Ec. II.14}$$

Donde: **Trc**, Total de residuos de costanera (m^3)

I.6 Metodología empleada para calcular las potencialidades presentes y futuras.

El potencial de estas fuentes fue valorado por cuatro categorías: económico, social, medio ambiental y tecnológico. En la figura II.8 se proponen cuatro categorías o esferas a abarcar, para que el análisis sea consecuente con los principios del desarrollo sostenible.



Figura II.8- Esferas relacionadas con la evaluación energética integrada. Fuente: Elaboración Propia

I.6.1 Aspecto Económico

Para abordar un problema de este tipo es necesario primeramente conformar una matriz de alternativas recurso-uso final, para esto hay que analizar los requerimientos

energéticos de la provincia y las posibles fuentes energéticas a utilizar, de tal forma que se calcule la eficiencia de utilización de cada fuente.

Los índices de consumo de energía generalmente se expresan en términos de energía útil, especialmente en los casos de selección en que se trabaja, que no tienen la misma eficiencia.

I.6.1.1 Potencial de residuos de la caña de azúcar

Para este cálculo se parte los principales residuos de la caña de azúcar con los usos totales y los utilizados actualmente en la provincia.

Bagazo

Para calcular la energía total que se puede producir con el bagazo se utiliza la ecuación II.15

$$E_{total} = B_{prod} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.15}$$

Donde E_{total} , Energía total (MJ); B_{prod} , Bagazo producido (kg); $PCS_{b.s}$, Poder Calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación II.16

$$E_{util} = B_{comb} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.16}$$

Donde E_{util} , Energía utilizada (MJ); B_{comb} , Bagazo utilizado como combustible (kg)

Entonces la eficiencia con que se utiliza la energía del bagazo puede ser determinada mediante la ecuación II.17

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{total}} 100\% \quad \text{Ec. II.17}$$

Donde: η , Eficiencia de utilización de la energía del bagazo

Cachaza

Para calcular la energía total que se puede producir con la cachaza se utiliza la ecuación II.18

$$E_{total} = Cch_{prod} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.18}$$

Donde E_{total} , Energía total (MJ); Cch_{prod} , Cachaza producido (kg); $PCS_{b.s}$, Poder Calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación II.19

$$E_{util} = Cch_{util} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.19}$$

Donde E_{util} , Energía utilizada (MJ); Cch_{util} , Cachaza utilizado como combustible (kg)

Entonces con la ecuación II.20 se calcula la eficiencia con que se utiliza la energía de la cachaza

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{total}} 100\% \quad \text{Ec. II.20}$$

Donde: η , Eficiencia de utilización de la energía del cachaza

Residuos de cosecha

Para calcular la energía total que se puede producir con la paja se utiliza la ecuación II.21

$$E_{total} = P_{c_{prod}} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.21}$$

Donde E_{total} , Energía total (MJ); $P_{c_{prod}}$, Paja de la caña producida (kg); $PCS_{b.s}$, Poder Calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación II.22

$$E_{util} = P_{c_{util}} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.22}$$

Donde E_{util} , Energía utilizada (MJ); $P_{c_{util}}$, Paja de la caña utilizado como combustible (kg)

Entonces con la ecuación II.23 se calcula la eficiencia con que se utiliza la energía de la paja de la caña

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{total}} 100\% \quad \text{Ec. II.23}$$

Donde: η , Eficiencia de utilización de la energía de la paja de la caña

I.6.1.2 Potencial de residuos del café.

Para este cálculo se parte los principales residuos del café con los usos totales y los utilizados actualmente en la provincia.

Cascarilla del café

Para calcular la energía total que se puede producir con la cascarilla del café se utiliza la ecuación II.24

$$E_{total} = C_{c_{prod}} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.24}$$

Donde E_{total} , Energía total (MJ); $C_{c_{prod}}$, Cascarilla de café producida (kg); $PCS_{b.s}$, Poder Calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación II.25

$$E_{util} = C_{c_{util}} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.25}$$

Donde E_{util} , Energía utilizada (MJ); Cc_{util} , Cascarilla del café utilizado como combustible (kg)

Entonces con la ecuación. II.26 se calcula la eficiencia con que se utiliza la energía de la cascara del café.

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{total}} 100\% \quad \text{Ec. II.26}$$

Donde: η , Eficiencia de utilización de la energía del cascara del café.

I.6.1.3 Potencial de residuos del arroz.

Para este cálculo se parte los principales residuos del arroz con los usos totales y los utilizados actualmente en la provincia.

Cascarilla del arroz

Para calcular la energía total que se puede producir con la cascara del arroz se utiliza la ecuación II.27

$$E_{total} = Ca_{prod} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.27}$$

Donde E_{total} , Energía total (MJ); Ca_{prod} , Cascarilla de arroz producida (kg); $PCS_{b.s}$, Poder Calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación II.28

$$E_{util} = Ca_{util} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.28}$$

Donde E_{util} , Energía utilizada (MJ); Ca_{util} , Cascarilla del arroz utilizado como combustible (kg)

Entonces con la ecuación II.30 se calcula la eficiencia con que se utiliza la energía de la cascara del arroz.

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{total}} 100\% \quad \text{Ec. II.29}$$

Donde: η , Eficiencia de utilización de la energía del cascara del arroz.

I.6.1.4 Potencial de residuos aserraderos.

Para este cálculo se parte los principales residuos aserraderos con los usos totales y los utilizados actualmente en la provincia.

Residuos aserraderos

Para calcular la energía total que se puede producir con los residuos aserraderos se utiliza la ecuación II.30

$$E_{total} = Ra_{prod} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.30}$$

Donde E_{total} , Energía total (MJ/año); Ra_{prod} , Residuos aserraderos promedios por año (Kg); $PCS_{b.s}$, Poder Calórico Superior en base seca (MJ/kg)

La energía utilizada se calcula utilizando la ecuación II.31

$$E_{util} = Ra_{util} * PCS_{b.s} \quad \text{Ec. II.31}$$

Donde E_{util} , Energía utilizada (MJ); Ra_{util} , Residuos aserraderos utilizado como combustible (kg)

Entonces con la ecuación II.32 se calcula la eficiencia con que se utiliza la energía de los residuos aserraderos.

$$\eta = \frac{E_{util}}{E_{total}} 100\% \quad \text{Ec. II.32}$$

Donde: η , Eficiencia de utilización de la energía de los residuos aserraderos.

I.6.2 Aspecto social

El creciente desarrollo de la industria de los derivados y el tradicional compromiso energético de las fuentes de biomasa comienzan a adquirir una relevante significación económica. Los residuos agroindustriales se han venido usando como combustible en las industrias, no hay dudas de que constituyen un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que no tienen disponibilidades significativas de combustible. Por otra parte, la existencia de materiales fibrosos para ser empleados como materia prima en la industria de derivados y su carácter renovable, han estimulado en las últimas décadas un proceso acelerado de desarrollo en la utilización de los residuos. Tiene relevante importancia en la alimentación y cuidado de animales y potencialmente puede convertirse en la materia prima que garantice el desarrollo de diversas producciones. Por lo que en el aspecto social se difundió una serie de usos, donde se muestra las diferentes aplicaciones de las diferentes fuentes.

I.6.3 Aspecto medio ambiental.

Con el aprovechamiento de las fuentes de biomas desde el punto de vista energético se logra una reducción en el empleo de combustibles fósiles para determinado proceso, esto permite la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmosfera y por consiguiente la mitigación del cambio climático. La determinación de la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmosfera puede ser determinado mediante la ecuación II.33 (Fonseca et. al, 2009):

$$E = E_a * FE \quad \text{Ec. II.33}$$

Donde: **E**, Emisiones (kWh/año); **FE**, Factor de emisión (0,001127 tCO₂/kWh) ;**E_a**, Energía ahorrada (kWh/año)

Si bien se necesita una evaluación ambiental más profunda para establecer los beneficios ambientales de los diferentes escenarios discutidos en comparación con la energía basada en combustibles fósiles generada actualmente en Cienfuegos, sólo se considerará el impacto en las emisiones de la GEI (Generación de Electricidad en Cuba) siendo el factor de emisión es de 0,001127 t de CO₂ por kWh. Dado que las emisiones de biomasa CO₂ son consideradas neutras (las emisiones de combustión de biomasa equivalen a la masa de CO₂ absorbida durante su cultivo), la generación de electricidad a base de biomasa reduce las emisiones netas nacionales de GEI (Gutiérrez et. al, 2016).

I.6.4 Aspecto tecnológico.

La crisis del petróleo hace más obvia la dependencia económica de los combustibles fósiles, como consecuencia de ello la necesidad de nuevas fuentes de energía se ha convertido en un asunto más urgentes. Las fuentes de energía renovables están llamadas a proporcionar la solución a este problema puesto que ellas son inagotables y tienen un menor impacto adverso sobre el medio ambiente, en relación con los combustibles fósiles. La existencia de un mayor interés y urgencia en las tecnologías aplicables a las fuentes de energías renovables (FER) se fundamentan no solo en los beneficios ambientales, sino que también se apoyan en el fomento económico sustentable que estas fuentes ofrecen. En la actualidad se vuelve a la biomasa buscando soluciones energéticas eficientes que permitan nuevas concepciones económicas de su aprovechamiento para obtener una serie de beneficios entre los que se encuentra la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente de CO₂, causante del efecto invernadero y SO₂ de la lluvia ácida. Por lo que se plantea de manera general las tecnologías para cada fuente dándole la mejor eficiencia y aprovechamiento.

Conclusiones parciales

1. Se describe las principales fuentes de biomasas en la provincia y sus usos, demostrándose que existe un potencial para su aprovechamiento.
2. Se propone una metodología basada en cuatro categorías que valoran de manera multivariada el potencial de estas fuentes.

Capítulo III

Capítulo III Evaluación del potencial de las diferentes biomásas. Cantidades y usos actuales.

III.1 Introducción al capítulo.

En nuestros días es de vital importancia hablar de desarrollo sostenible. En nuestro país la actualización de la interpretación de desarrollo sostenible es conceptualizada como “La situación actual demanda un concepto clave de desarrollo sostenible, donde estrategias de desarrollo en economía, ciencia y tecnología, finanzas, comercio, energía, agricultura, industria, defensa, etc., estén vinculadas con los requerimientos de protección medioambiental y uso sostenible de los recursos naturales y con justicia social y equidad”. (Estrategia ambiental nacional de Cuba 2007).

III.2 Estimación de la biomasa potencial de la caña de azúcar.

La estimación de la biomasa potencial desde el punto de vista estratégico, puede ser una herramienta eficaz con el fin de conocer la cantidad de residuos y poder realizar una planificación más acertada. Contando con las cifras de producción de la caña y los residuos generados, así como el área total de caña sembrada y los rendimientos se puede conocer el potencial con que se cuenta. Los datos del comportamiento de las distintas unidades productoras de caña de azúcar pertenecientes a la Empresa Azucarera de Cienfuegos en las últimas tres zafras pueden ser consultados en la Tabla III.1

Tabla III.1 Producción de caña de azúcar en toneladas (t) en las últimas tres zafras. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016)

Zafras	Producción de caña (t)
2013-2014	1 529 771,51
2014-2015	1 642 767,82
2015-2016	1 630 540,78
Total	4 803 080,11

Como se observa en la tabla anterior la tendencia ha sido al incremento en la producción de caña. El incremento entre la zafra 2013-2014 y la zafra 2015-2016 fue de un 6,2 % aproximadamente.

Capítulo III Evaluación del potencial de las diferentes biomásas. Cantidades y usos actuales.

En la Tabla III.2 se muestran la tenencia y uso de la tierra para el cultivo de la caña, para poder determinar los rendimientos de caña por área de tierra sembrada, así como las áreas destinadas al cultivo. Se cuenta con 65 269,43 ha de tierras destinadas a la siembra de caña de azúcar de ellas solo 45 303,44 ha cultivadas como puede observarse en la Tabla III.2.

Tabla III.2: Tenencia y uso de la tierra para el cultivo en hectáreas (ha) de la caña de azúcar.

Fuente: (CNCT, 2015)

Indicadores	Total (ha)
Caña de azúcar	65 269,43
Superficie cultivada	45 303,44
Bancos de Semillas	99,00
En rotación	224,41
Guardarrayas	4 627,92
Vacías	6 733,59
Ociosas	8 281,07
De ellas: Con Marabú	7 624,21

Con los valores de producción de caña molida y el área destinada para el cultivo se obtuvieron los rendimientos promedios de caña por hectárea, que se muestran en la tabla III.3, buscando alternativas para obtener un mayor rendimiento en las cosechas y lograr como meta mínima 35 t de caña/ha en cada unidad productora.

Tabla III.3. Rendimiento de la caña de azúcar en los años de estudio. Fuente: Propia

Zafras	Producción de caña(t)	Área Cultivada(ha)	Rendimiento(t/ha)
2013-2014	1 529 771,51	45 303,44	33,77
2014-2015	1 642 767,82	45 303,44	36,26
2015-2016	1 630 540,78	45 303,44	35,99

II.2.1 Potencial de Biomasa Residual

II.2.1.1 Bagazo

En la provincia de Cienfuegos se contó con 1 571 600 toneladas de bagazo de ello solo se utilizaron 1 506 447 toneladas, teniendo como promedio 523 866 toneladas de bagazo producido por año (Tabla III.4).

Tabla III.4: Bagazo producido y utilizado como combustible en toneladas en las tres últimas zafas. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016)

Zafas	Bagazo producido (t)	Bagazo Combustible (t)	Bagazo sobrante (t)
2013-2014	508 347	487 303	21 044
2014-2015	449 356	430 735	18 621
2015-2016	613 897	588 409	25 488
Total	1 571 600	1 506 447	65 153

Por otra parte, la tabla anterior muestra las 65 153 toneladas sobrantes que pueden ser empleados como materia prima en la industria de derivados y su carácter renovable, han estimulado en las últimas décadas un proceso acelerado de desarrollo en la utilización del bagazo en las producciones de pulpa papel y productos aglomerados.

El bagazo puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlado, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calórico del bagazo es de 17,3 MJ/kg, con un 50% de humedad como se muestra en la Tabla III.5

Tabla III.5 La composición química y los valores calóricos del bagazo en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b,s} (MJ/kg)	PCS_{b,s} (MJ/kg)
Bagazo	50	47.2	7.0	43.1	2.7	15.8	17.3

A partir del PCS_{b,s} que se muestra en la Tabla III.5 se calcula la energía total del bagazo mediante la ecuación II.16 donde $E_{total} = 2\,517\,470\,000$ kWh. Así como la energía utilizada por la ecuación II.17 donde: $E_{util} = 2\,413\,105\,000$ kWh. Por lo que la

eficiencia de utilización de la fuente se puede calcular mediante la ecuación II.18 donde $\eta = 95\%$

Sociedad

El creciente desarrollo de la industria de los derivados y el tradicional compromiso energético del bagazo comienzan a adquirir una relevante significación económica. El bagazo se usó históricamente como combustible en la industria azucarera. Aunque su valor calórico es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay dudas de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que no tienen disponibilidades significativas de combustible y a la vez son grandes productores de azúcar de caña. Por otra parte, la existencia cada vez menor de materiales fibrosos para ser empleados como materia prima en la industria de derivados y su carácter renovable, han estimulado en las últimas décadas un proceso acelerado de desarrollo en la utilización del bagazo en las producciones de pulpa papel y productos aglomerados. Tiene relevante importancia en la alimentación animal y potencialmente puede convertirse en la materia prima que garantice el desarrollo de diversas producciones como furfural, carbón activado y productos moldeados, entre otros. Se ha demostrado la posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima. En esta alternativa se recomienda desmedular la mayor cantidad posible en el central azucarero y retornar el bagacillo a las calderas, para entregar la fracción fibrosa a la industria de los derivados. En la producción de derivados, el bagazo se ha considerado tradicionalmente como sustituto del fuel-oil, pues para obtenerlo es necesario quemar dicho combustible en el central azucarero. La cantidad de bagazo que se libera por cada tonelada de fuel-oil está en dependencia de las características del material fibroso y la eficiencia de las calderas. En Cuba el índice establecido es de 5,2 t de bagazo integral con 50 % de humedad por cada tonelada de fuel-oil.

Medio Ambiente

El impacto medioambiental para este caso en particular se traduce en ahorros en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero que se obtienen al reemplazar combustibles fósiles por el bagazo. La ecuación utilizada para la estimación de la

cantidad de CO₂ dejados de emitir fue presentada mediante la ecuación II.33 donde el total de emisiones dejadas de emitir equivale fue de $E = 2\,836\,188,7\text{ t CO}_2$.

Tecnología

La innovación tecnológica permite mejorar la eficiencia de la producción de azúcar y sus subproductos. Más en particular, la instalación de unidades de cogeneración con capacidad de 140 kWh/tcm de electricidad, aumentará la eficiencia energética de las fábricas de azúcar. Considerando la producción actual de caña de azúcar (1 630 kt) cosechada durante 3600 h, es posible apoyar la instalación de 75 MW de capacidad de generación eléctrica. Las unidades de cogeneración están disponibles para capacidades de 20 y 35 MW. Dos escenarios son realistas:

1. Instalación de 5 unidades de 20 MW, una para cada una de las fábricas azucareras actualmente en operación (para una caña de azúcar de rendimiento de 36 t / ha).
2. Instalación de 3 unidades de 35 MW y 2 unidades de 20 MW, una en cada una de las 5 fábricas de azúcar existentes en la Provincia (para un rendimiento de caña de 90 t / ha). Las unidades se localizarán según la capacidad de molienda de las diferentes fábricas de azúcar.

Las unidades de cogeneración entre 20 y 35 MW cuestan respectivamente 2500 y 2000 € / kW, lo que representa un coste total de 50 y 70 millones de euros (58-81,2 millones de dólares en una divisa de 1 € = 1,10 CUC). Estas unidades tienen una eficiencia de generación de electricidad de 27-28% y una eficiencia térmica de 58-56%. En total se necesitan invertir 220 y 341 millones de dólares en los escenarios 1 y 2, respectivamente. Una tecnología de generación de electricidad actualizada permitirá aumentar el excedente de electricidad hasta 268 GWh para el rendimiento agrícola actual o hasta 502 GWh para el rendimiento mejorado (Gutiérrez et. al, 2016).

III.2.1.2 Cachaza

En la Tabla III.6 se muestra las 144 092,4 toneladas del residuo que ha generado la Empresa en las últimas tres zafras.

Tabla III.6: Comportamiento de la cachaza en las tres últimas zafras. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016)

Zafras	Cachaza (t)
2013-2014	45 893,14

2014-2015	49 283,03
2015-2016	48 916,22
Total	144 092,4

La cachaza puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlado, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calorífico de la cachaza es de 14,5 MJ/kg, con un 70% de humedad como se muestra en la Tabla III.7

Tabla III.7 La composición química y los valores calóricos de la cachaza en Cuba (base seca).

Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

Biomasas	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b,s} (MJ/kg)	PCS_{b,s} (MJ/kg)
Cachaza	70–80	32.5	2.2	2.2	14.5	8.8	14.5

A partir del PCS_{b,s} que se muestra en la Tabla III.7 se calcula la energía total de la cachaza mediante la ecuación II.19 donde $E_{total} = 193\,457\,400$ kWh.

La cachaza se utiliza principalmente como fertilizante en los campos de caña de azúcar, lo que da lugar a una fertilización excesiva de los campos de caña, con serias implicaciones en el suelo. Por lo que no se utiliza como combustible en los hornos de las calderas de fábrica, lo que lleva consigo que la eficiencia de utilización de la energía sea nula. La utilización de los subproductos de la caña permite un desarrollo industrial dentro de un ciclo cerrado de aprovechamiento integral, que llega hasta los productos residuales; se emplean de manera que no causen daño al medio ambiente y, a la vez, tengan utilidad económica

Sociedad

La utilización más difundida es como fertilizante, a causa de la gran cantidad de nitrógeno, fósforo, calcio y materia orgánica en general, que aporta al suelo. Entre los experimentos realizados se han obtenido buenos resultados, en las plantaciones cañeras. Se utiliza en la alimentación de ganado vacuno previo secado al sol, con buenos resultados, aun cuando tiene un bajo valor alimenticio, y además en el ensilaje a partir de los residuos de la agroindustria cañera. Otra de las aplicaciones de la

cachaza es la extracción de cera con solventes orgánicos, para sustituir diferentes tipos de ceras naturales y derivadas del petróleo. Para estos fines se han instalado plantas en Filipinas, Taiwán, Cuba e India, entre otros países. También se han realizado estudios para determinar las posibilidades de obtener de la cachaza aceites, resinas y productos esteroideos.

Medio Ambiente

El impacto medioambiental para este caso en particular se traduce en ahorros en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero que se obtienen al reemplazar combustibles fósiles por la cachaza. La ecuación utilizada para la estimación de la cantidad de CO₂ dejados de emitir fue presentada mediante la ecuación II.33 donde el total de emisiones dejadas de emitir equivale fue de $E = 218\,026,47 \text{ t CO}_2$. La cachaza se utiliza como fertilizante en los campos de caña de azúcar. Para limitar el costo de transporte, la mayor parte de esta se deposita en los campos cercanos a las fábricas de azúcar, lo que da lugar a una fertilización excesiva de los campos de caña, con serias implicaciones en el suelo, por lo que se persigue un aprovechamiento integral, que llega hasta los productos residuales; empleando de manera que no causen daño al medio ambiente

Tecnología

La cachaza se puede utilizar como combustible en los hornos de las calderas de fábrica, pero su contenido de agua debe ser reducido. Se propone la deshidratación de la cachaza a 35-40% de humedad usando una prensa de filtro de correa. Las fábricas de azúcar en Cienfuegos producen hasta 3,5 t / h cachaza. Con el rendimiento mejorado, la producción de cachaza aumentaría hasta 6,6 t / h. Un filtro prensa de cinta para desecar 4,5 t / h de cachaza produce 2,4 t / h de agua residual y 2,1 t / h de cachaza (40% de humedad). Este filtro prensa de cinta cuesta alrededor de 30.000 MN y una prensa de filtro de cinta con una capacidad de 7 t / h cuesta alrededor de 45.000 MN. Para desecar la torta de filtración producida en fábricas de azúcar se requieren 5 filtros de cinturón de diferentes capacidades de producción para el rendimiento actual y mejorado, respectivamente. Hoy en día las unidades de generación eléctrica de las fábricas de azúcar operan por debajo de su capacidad nominal. El uso de la cachaza ayuda a acercar la producción a su capacidad nominal.

Rendimientos de la caña de azúcar. La adquisición de los filtros de correa requiere una inversión de 150.000 MN para cubrir el rendimiento actual y 225.000 MN para el rendimiento mejorado. El período de recuperación para los rendimientos agrícolas actuales y mejorados oscila entre 0,9 y 0,7 años. El atractivo de esta opción es doble: (1) aumenta el excedente de producción de electricidad, y (2) evita el costo de transporte de la cachaza y su eliminación como fertilizante (Gutiérrez et. al, 2016).

III.2.1.3 Residuos de la cosecha

El empleo de la paja para la producción de energía, por sus ventajas como recurso renovable, ha sido siempre preocupación de investigadores y especialistas y constituye un tema latente de investigación. En la Tabla II.6 se presentan los datos de la cantidad de paja en los centros de limpieza.

Tabla III.8 Paja en los Centros de Limpieza en las tres últimas zafras. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016)

Cosechas	Pajas en centros de limpieza(t)
2013-2014	80 264.40
2014-2015	82 849.70
2015-2016	87 345.75
Total	250460.86

En la tabla anterior se muestran 250460.86 t de paja en los centros de limpieza. La utilización de residuos como combustible se aplica actualmente en varios países, aunque todavía de forma aislada (Tabla III.9).

Tabla III.9: Equivalencia como combustible de paja contra petróleo. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2016)

Combustible	Petróleo	Paja (10% de humedad)
Valor Calórico (kJ/kg)	39 542	17 445
Eficiencia de hornos y carderas	85%	70%
Combustible necesario en peso para generar la misma cantidad de energía calorífica	1	2,85

La paja de caña puede ser aprovechada de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlada ya que esta posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calorífico de la paja es de 17,2 MJ/kg, con un 45% de humedad como se muestra en la Tabla III.10

Tabla III.10 La composición química y los valores calóricos de la paja de caña en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

Biomásas	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b.s} (MJ/kg)	PCS_{b.s} (MJ/kg)
Paja de la caña	45	43.5	6.1	41.1	9.3	15.7	17.2

A partir del PCS_{b.s} que se muestra en la Tabla III.10 se calcula la energía total de la paja de la caña mediante la ecuación II.22 donde $E_{total} = 398\,882\,100$ kWh.

La paja de la caña es incinerada en las instalaciones de limpieza sin utilización energética alguna, donde se produce una contaminación del medio ambiente con diseminación de cenizas, humos y gases tóxicos, por lo que la eficiencia energética de utilización es nula. La paja de la caña representa un potencial de biomasa equivalente a 30% de toda la materia seca aprovechable en la cosecha de la caña, con un valor calórico alrededor de 17.2 MJ/kg, en dependencia del contenido de humedad. De esto se deriva que, en términos energéticos, por cada tonelada de paja pueden ser sustituidas 2,85 toneladas de petróleo combustible. Esto ofrece oportunidades al desarrollo de tecnologías rentables que permiten disminuir los costos de producción en el sector de la industria azucarera y en otros de la economía nacional.

Sociedad

La composición de la paja es muy parecida a la del bagazo, a excepción de que la primera no contiene azúcares y posee una humedad natural inferior a la del bagazo. Para fines de alimentación animal, la paja con las vainas constituye la fracción menos asimilable, pero es la más atractiva desde el punto de vista de utilización energética. El empleo de la paja para la producción de energía, por sus ventajas como recurso renovable, ha sido siempre preocupación de investigadores y especialistas y constituye un tema latente de investigación. La utilización de residuos como combustible se aplica

actualmente en varios países, aunque todavía de forma aislada. Para el procesamiento mecánico de los residuos de la cosecha, se han empleado con determinado éxito, equipos originalmente empleados en la cosecha de forrajes tales como silocosechadoras y empacadoras que, realizando ligeras modificaciones, pueden ubicarse con carácter estacionario en las propias instalaciones de limpieza en seco. Un aspecto importante a considerar en los países productores de caña de azúcar y con deficiencias en masa vegetal para la alimentación animal, estriba en que se pueden conseguir por esta vía, en plena etapa de sequía, grandes cantidades de materia verde capaz de ser asimilada por el ganado y evitar la depauperación del mismo en este período. Una opción económicamente atractiva la constituye la utilización de la paja de la caña para la obtención de sustrato en el cultivo de hongos comestibles y al final del proceso productivo contar con un forraje beneficiado y enriquecido para el ganado. Para esta opción resultan particularmente importantes las fracciones secas, en las cuales son más moderados los procesos fermentativos que pudieran competir con el cultivo que se inocula en la masa vegetal. (Machín et. al, 2014)

Medio Ambiente

El impacto medioambiental para este caso en particular se traduce en ahorros en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero que se obtienen al reemplazar combustibles fósiles por la paja de la caña. La ecuación utilizada para la estimación de la cantidad de CO₂ dejados de emitir fue presentada mediante la ecuación II.33 donde el total de emisiones dejadas de emitir equivale fue de $E = 449\,540 \text{ t CO}_2$. La paja de la caña es quemada en las instalaciones de limpieza, produciendo una contaminación del medio ambiente con diseminación de cenizas, humos y gases tóxicos, que amenazan a la población aledaña con enfermedades bronco respiratorias, que afectan la calidad de vida del hombre, las plantas y los animales.

Tecnología

La paja de la caña se puede utilizar como combustible en los hornos de las calderas de fábrica después de la temporada de molienda de la caña de azúcar para extender el uso de la infraestructura de generación de electricidad a muy por encima de 3600 h anuales. Además, debe considerarse que el estado actual de desarrollo de Cuba, sólo ofrece una financiación limitada para las inversiones. También se puede obtener las

briquetas de la paja para uso doméstico o pequeñas producciones. La paja se quema mediante una combustión incompleta (pirolisis) obteniendo como resultado carbonilla y gases que son liberados a la atmósfera. Con ese material se realiza una pasta junto con un aglutinante (miel de caña al 2,5%, harina de trigo, almidón de maíz o de mandioca al 10%) y con esta se fabrican las briquetas. Estas briquetas son ligeramente más livianas que el carbón de leña. El poder calorífico de las mismas varía entre 18,4 MJ/Kg y 21,7 MJ/Kg dependiendo del aglutinante utilizado. Los usos que se pueden dar a las briquetas son los mismos que para el carbón de leña.

III.3 Estimación del potencial de biomasa del café.

III.3.2 Producción del grano

En la Tabla III.11 se muestra la composición del café mediante el proceso de beneficio húmedo en los últimas tres cosechas. El despulpado debe realizarse el mismo día de la cosecha, máximo de ocho a doce horas después de la misma, con el fin de evitar una indeseada fermentación del grano.

Tabla II.11: Beneficio Húmedo del Café en las últimas tres cosechas. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016)

Cosechas	Unidad	Cereza	Cáscara	Mucílago
2013-2014	Ton	132,16	54,98	20,62
2014-2015	Ton	104,68	43,55	16,33
2015-2016	Ton	121,87	50,70	19,01
Total		358,71	149,22	55,96

III.3.3 Análisis de los residuos de la producción de café

La tabla III.12 muestra que en las últimas tres cosechas se ha producido 334,62 toneladas de café, igualmente se han generado algo más de 94,38 toneladas de cascarilla.

Tabla III.12: Producción de café y la generación de cascarilla en las últimas tres cosechas. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016)

Cosecha	Pergamino Seco(t)	Café Oro(t)	Cascarilla(t)
2013-2014	178,21	139,00	39,21
2014-2015	133,92	104,46	29,46

Capítulo III Evaluación del potencial de las diferentes biomasas. Cantidades y usos actuales.

2015-2016	116,88	91,17	25,71
Total	429,01	334,62	94,38

La cascarilla de café puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlada, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calorífico de la cascarilla es de 18,7 MJ/kg, con un 7,6% de humedad como se muestra en la Tabla III.13

Tabla III.13 La composición química y los valores calóricos de la cascarilla de café en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b,s} (MJ/kg)	PCS_{b,s} (MJ/kg)
Cascarilla de café	7,6	50.3	5,3	43.8	0,5	17.5	18.7

A partir del PCS_{b,s} que se muestra en la Tabla III.13 se calcula la energía total de la cascarilla de café mediante la ecuación II.25 donde $E_{total} = 163\,434,4$ kWh. Los calentadores de aire instalados en los hornos que actualmente se utilizan para quemar la cáscara de café en la empresa tienen una alta eficiencia de utilización, aprovechándose una parte considerable de la materia prima generada como residuo en forma de calor en el proceso de combustión de esta biomasa.

Sociedad

Tradicionalmente la pulpa y la cascarilla del café han encontrado un rango limitado de aplicaciones, se ha usado la cascarilla para la producción de ácido cítrico y algunos otros compuestos aromáticos usados en la industria alimentaria. Particularmente la cascarilla se ha usado en Cienfuegos, tradicionalmente como combustible con el fin de generar calor que puede ser usado en el proceso de secado del grano de café.

La pulpa del café resulta útil para numerosos usos, entre los más frecuentes se encuentra la fabricación de alimentos para animales en granjas, también se ha usado en la obtención de cafeína, extractos proteínicos para ser usados en la industria alimenticia, fermentación para la producción de alcoholes. También se ha usado la

pulpa para producción de abonos orgánicos con la ayuda de la lombriz de tierra común y en el cultivo de hongos de valor comercial.

Medio Ambiente

El impacto medioambiental para este caso en particular se traduce en ahorros en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero que se obtienen al reemplazar combustibles fósiles por la cascarilla de café. La ecuación utilizada para la estimación de la cantidad de CO₂ dejados de emitir fue presentada mediante la ecuación II.33 donde el total de emisiones dejadas de emitir equivale fue de $E = 184 \text{ t CO}_2$

Tecnología

En Cuba el secado del café se ha realizado tradicionalmente mediante dos métodos: el secado solar y el secado mecánico, existiendo la necesidad de realizar investigaciones buscando que estos procesos cada día sean más eficientes y menos contaminantes desde el instante en que se diseñan los equipos hasta la operación y mantenimiento de los mismos.

Los hornos actuales que queman afrecho para calentar el aire que se utiliza posteriormente en el secado del grano de café emplean un tipo de intercambiador de superficie de tubo en tubo, con flujo lineal en paralelo de las corrientes de gases y aire. Si la quema de la cáscara de café se realiza con eficiencia, mediante el perfeccionamiento de la aerodinámica del proceso de combustión y se aprovecha al máximo posible el calor contenido en los gases, una vez que estos han abandonado la zona de combustión del horno, colocando equipos intercambiadores de calor más efectivos, la eficiencia térmica general obtenida cuando se utiliza la biomasa para satisfacer la demanda de calor del proceso de secado industrial debe aumentar de manera apreciable. En la Figura III.1 se muestra una representación esquemática del proceso de calentamiento del aire al utilizar el Horno de Capa Cónica Deslizante (HCCD),

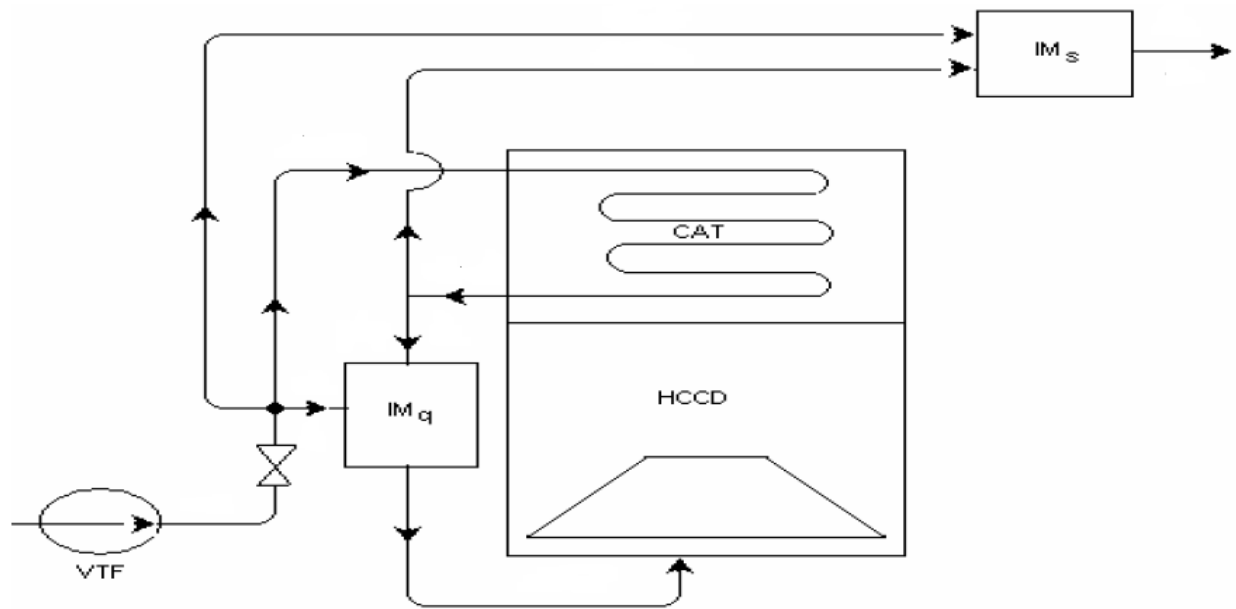


Figura III.1 Esquema del proceso de calentamiento del aire al utilizar el Horno de Capa Cónica Deslizante (HCCD) Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”, 2016)

Nomenclatura

VTF: Ventilador de Tiro Forzado

CAT: Calentador de Aire Tubular

IMs: Intercambiador de Mezcla para el flujo de aire que se dirige a la secadora.

IMq: Intercambiador de Mezcla para el flujo de aire que se dirige al quemador

HCCD: Horno de Capa Cónica Deslizante

III.4 Potencial de los residuos biomásico del arroz

Según el (Centro Nacional de Control de la Tierra, 2015) en Cienfuegos existen 7 440,28 ha destinadas al sembrado del arroz lo que generó una producción para el año 2016 de aproximadamente 10 515,70 toneladas según la (Empresa de Granos Aguada, 2017) siendo la zona de Aguada de Pasajeros la de mayor producción. En esta región existen zonas donde se cultivan importantes áreas de arroz, lo que ha originado la formación de industrias molineras localizadas estratégicamente a lo largo de la región.

Tabla III.14: Producción en toneladas de arroz y sub-productos en la provincia de Cienfuegos en el 2016. Fuente: (Oficina Estadística Empresa de Granos Aguada, 2016)

Entrada	Obtenido	Rend. Industrial	Residuos			Desechos
			Polvo (t)	Cabecilla (t)	Cuarto Grano(ton)	Cascarilla (t)
Arroz(Cascara) (ton)	Arroz(Listo) (t)					
16 019,94	10 515,70	65,6	1 349,78	255,57	52,364	3 846,52

La cascarilla de arroz puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlado, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calorífico de la cascarilla es de 17,2 MJ/kg, con un 45% de humedad como se muestra en la Tabla III.15

Tabla III.15 La composición química y los valores calóricos de la cascarilla de arroz en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI _{b,s} (MJ/kg)	PCS _{b,s} (MJ/kg)
Cascara de arroz	8–10	38.2	5.6	33.7	22.5	15.2	16.5

A partir del PCS_{b,s} que se muestra en la Tabla III.15 se calcula la energía total de la cascarilla de arroz mediante la ecuación II.28 donde $E_{total} = 17\,629\,880$ kWh. La cascarilla de arroz no se utiliza con fines energéticos en la provincia por lo que la eficiencia de utilización de la energía es nula. Los problemas que se encontraron son principalmente mala disposición de los residuos, uso de combustible para el proceso de secado y uso de equipos fuera del negocio de la empresa. La solución potencial consistió en el uso de la cascarilla de arroz, como sustituto del combustible, y con esta se evitan los costos y la necesidad de hacer uso de equipos para comprimir la cascarilla ni para la disposición de esta.

Sociedad

Aunque existen métodos disponibles para el uso de la paja, por ejemplo: como alimento animal, combustible, fibras para pulpeado, etc., la práctica más usual es quemarla a cielo abierto, provocando contaminación atmosférica y erosión en los suelos. En cuanto a la cáscara de arroz la tendencia mundial es la conversión en energía mediante

procesos termo-químicos debido a su alto contenido en componentes inorgánicos. La cascara de arroz actualmente es considerada como un producto de desecho del proceso de pilado del arroz cáscara y que actualmente no es valorado comercialmente por los molinos de arroz.

La cascarilla de arroz puede ser aprovechada de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlada, ya que la cascarilla de arroz posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente.

Medio Ambiente

El impacto medioambiental para este caso en particular se traduce en ahorros en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero que se obtienen al reemplazar combustibles fósiles por la cascarilla de arroz. La ecuación utilizada para la estimación de la cantidad de CO₂ dejados de emitir fue presentada mediante la ecuación II.33 donde el total de emisiones dejadas de emitir equivalente fue de $E = 19\,868,87 \text{ t CO}_2$. Para el caso de la industria molinera, el impacto ambiental es bastante alto, pues ésta genera grandes cantidades de cascarilla de arroz, es un residuo que actualmente es manejado inadecuadamente, porque es dispuesto en botadores de basura a cielo abierto, se presenta incineración y quema indiscriminada del mismo residuo afectando así el suelo, el paisaje y el recurso aire. Hasta el momento, no existe una alternativa que permita su adecuado manejo o su inclusión en un proceso industrial productivo que asegure el uso masivo del residuo para un producto factible de ser comercializado. Se convierte así la disposición final de la cascarilla de arroz en otro de los factores que alteran el ecosistema y el medio ambiente en nuestro territorio.

Tecnología

Gasificación de la cascara de arroz para producción de calor y electricidad

El procesamiento industria del arroz en Cuba se realiza por medio de una base industrial que cuenta con 10 complejos industriales arroceros (molino y secadero), 29 instalaciones de secado y 13 molinos. Anualmente se procesan más de 500 000 tn de arroz húmedo que dan lugar a más de 50 000 t de cascara de arroz como residuo agroindustrial. La deposición de estos residuales al aire libre constituye hoy un problema de orden ambiental para la industria. La opción tecnológica considerada es la gasificación de la cascara de arroz, el uso del gas producido para la sustitución del

diésel utilizado en el secado del arroz y el gas excedente en la producción de electricidad por medio de grupos moto-eléctricos. Como resultado de su implementación se sustituiría totalmente el uso del diésel en el secado, la industria se autoabastecería de electricidad y entregaría a red eléctrica el exceso producido. La capacidad eléctrica a instalar asciende a los 20 MW. Obteniendo como beneficio un costo de inversión de 86 millones MN. Los ingresos netos por la sustitución del diésel y el costo evitado al sistema eléctrico (SEN) por la electricidad generada son del orden de los 18 millones MN (Pérez, 2013).

III.5 Potencial de los residuos aserraderos

La Tabla III.16 muestra el comportamiento de la madera aserrada en los 3 últimos años teniendo un total de 8 073,500 m³.

Tabla III.16: Madera aserrada en los tres últimos años. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016)

	U/M	2014	2015	2016	Rend. %
Total	m ³	2 663,90	2 783,70	2 625,90	55
Aserríos de tecnología atrasada	m ³	1 065,56	1 113,48	1 050,36	53
Aserríos de tecnología avanzada	m ³	1 598,34	1 670,22	1 575,54	55

En este trabajo fueron analizados los residuos en el proceso. Se recolectaron en la Tabla III.17 las cantidades de aserrín, los trozos de madera y costaneras que se obtuvieron, alcanzando un total de residuos en los tres años de 6827,162 m³. Según (Bucheli et. al, 2016) La densidad aparente para los residuos aserraderos es de 160 kg/m³ para las coníferas, obteniendo un total de residuos de 1 092 320 kg

Tabla III.17: Cantidades totales de residuos en los últimos cuatro años en Cienfuegos. Fuente: (Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016)

2014				
	Madera Bolo	Total Residuos	Serrín	Costanera
Total	4 916,56	2 252,66	1 943,11	309,55
Aserríos de tecnología	2 010,49	944,93	831,53	113,39

atrasada				
Aserríos de tecnología avanzada	2 906,07	1 307,73	1 111,57	196,15
2015				
	Madera Bolo	Total Residuos	Aserrín	Costanera
Total	5 137,66	2 353,96	2 030,49	323,47
Aserríos de tecnología atrasada	2 100,9	987,42	868,93	118,49
Aserríos de tecnología avanzada	3 036,76	1 366,54	1 161,56	204,98
2016				
	Madera Bolo	Total Residuos	Aserrín	Costanera
Total	4 846,42	2 220,52	1 915,39	305,13
Aserríos de tecnología atrasada	1 981,81	931,45	819,67	111,77
Aserríos de tecnología avanzada	2 864,61	1 289,07	1 095,71	193,36

Los residuos aserraderos puede ser aprovechado de diferentes formas una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de combustión controlado, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente. El poder calorífico de estos es de 18,5 MJ/kg, con un 15% de humedad como se muestra en la Tabla III.18

Tabla III.18 La composición química y los valores calóricos de la cascarilla de arroz en Cuba (base seca). Fuente: (Gutiérrez et. al, 2016).

Biomasa	HR(%)	C(%)	H(%)	O(%)	Ash(%)	PCI_{b,s} (MJ/kg)	PCS_{b,s} (MJ/kg)
Residuos aserraderos	15	51.4	5.7	38.7	3.8	19,2	18.5

A partir del PCS_{b,s} que se muestra en la Tabla III.18 se calcula la energía total de la cascarilla de arroz mediante la ecuación II.31 donde $E_{total} = 2\,082\,278$ kWh. Hasta el

momento, no existe una alternativa que permita su adecuado manejo o su inclusión en un proceso industrial productivo que asegure el uso masivo del residuo para un producto factible de ser comercializado. Se convierte así la disposición final de los residuos aserraderos en otro de los factores que alteran el ecosistema y el medio ambiente en nuestro territorio, por tanto, la eficiencia de utilización con fines energéticos es nula.

Sociedad

En general, el “origen vital” directo de muchos de los residuos y subproductos forestales y su elevada humedad, les puede hacer particularmente lábiles a diversos procesos de fermentación y descomposición, que dificultan su almacenamiento y pueden ser causa de su destrucción con efectos contaminantes graves. Asimismo, en muchos países han sido frecuentes los estudios sobre aprovechamiento de los referidos residuos forestales, directamente o sometidos a diversos tratamientos, así como sobre los subproductos de las industrias madereras y del papel. La utilización en los follajes de las aves, ganado y otros animales de granjas provocando susceptibilidad reducida a las enfermedades, aumento del peso, incremento de la producción de huevos y producción de leche, mejora la capacidad reproductora. Las sustancias leñosas contenidas en el serrín de la madera de pino y en la pasta de madera para la fabricación de papel sin trastornos orgánicos, aunque no los toman con gusto y son alimentos muy pobres para que se generalice su aprovechamiento en la práctica (Rojas, 2013).

Medio Ambiente

El impacto medioambiental para este caso en particular se traduce en ahorros en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero que se obtienen al reemplazar combustibles fósiles por los residuos aserraderos. La ecuación utilizada para la estimación de la cantidad de CO₂ dejados de emitir fue presentada mediante la ecuación II.33 donde el total de emisiones dejadas de emitir equivale fue de $E = 2\,346,72 \text{ t CO}_2$. El impacto ambiental es bastante alto, pues ésta genera grandes cantidades de residuos aserraderos, es un residuo que actualmente es manejado inadecuadamente, porque es dispuesto en botadores de basura a cielo abierto, se presenta incineración y quema indiscriminada del mismo residuo afectando así el suelo, el paisaje y el recurso aire.

Tecnología

Gasificación de residuos aserraderos para la producción de electricidad

La introducción de esta tecnología tiene grandes perspectivas, y ya existen plantas, por ejemplo, en la Isla de la Juventud donde funciona un motor diésel de 50 kW con gasificación de biomasa forestal.

Debido a que en Cuba existe un potencial importante de biomasa forestal, es que se evalúa como opción de mitigación respecto a una termoeléctrica convencional de 100 MW. Obteniendo como beneficio un 5% menor de factor de utilización y costos de inversión instalado que es mucho mayor a los de una termoeléctrica, pero al igual que en el caso anterior, el costo de combustible es insignificante, con un ahorro anual de 57 millones MN respecto a la termoeléctrica.

La industria del procesamiento de la madera es una actividad que por naturaleza produce significativas cantidades de residuos de biomásas. En el caso de Cuba se procesan aproximadamente 200 000 m³ de madera anualmente lo que se estima produce un volumen de residuos en el orden de los 90 000 m³. Debido a que la capacidad productiva de estos aserraderos no permite la instalación de capacidades de generación eléctrica superiores a los 2 MW, se ha escogido como tecnología para su uso en la generación de electricidad, la gasificación de biomasa. Por medio de esta opción es posible instalar cerca de 19 MW de potencia, abastecer la industria y convertirse en un generador neto de electricidad, a la vez que se resuelve el problema medio ambiental asociado a la deposición de estos residuos, se reduce el peligro de incendios. Obteniendo como beneficio el costo de inversión para implementar esta opción se estima en 38 millones de MN y los ingresos por el costo evitado al SEN en la generación de electricidad está en el orden de los 11,5 millones de MN. (Pérez, 2013).

Conclusiones parciales

1. En el capítulo se realizó el levantamiento de la biomasa cañera, cafetalera, arroceras, residuos aserraderos a partir de las informaciones aportadas por las principales empresas productoras.
2. En la caña de azúcar la producción de bagazo en las tres últimas tres zafras fue de 1 571 600 tn de ello el bagazo producido fue de 1 571 600 tn lo que equivale a 2 517 470 000 kWh, dejando de emitir a la atmósfera 2 836 188,7 t CO₂. La

producción de cachaza obtenida fue de 144 092,4 tn lo que equivale a 193 457 400 kWh, dejando de emitir 218 026, 47 t CO₂. En los centros de limpieza de la provincia se procesaron un total de 250460,86 tn de paja lo que genera 398 882 100 kWh/año, dejándose de emitir 449 540 t CO₂.

3. La producción total de café oro fue de 334,62 tn, de ellas 91,17 tn corresponden a la última cosecha. Uno de los principales residuos que se utiliza con fines energéticos es la cascarilla, contando con un total de 94,38 tn lo que genera 163 434,4 kWh, dejando de emitir 184 t CO₂.
4. La producción de arroz fue de 16 019,94 tn para el último año, obteniendo 3 846,52 tn de cascarilla de arroz, lo que genera 17 629 880 kWh, dejando de emitir 19 868,87 t CO₂.
5. El total de residuos aserraderos para los últimos tres años fue de 1 092 tn lo que genera 2 082 278 kWh, dejando de emitir 2 346,72 t CO₂.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El uso de las fuentes biomásica como energía renovable presentan un alto potencial mundial para paliar los efectos negativos del cambio climático. Presentando Cuba un alto potencial de muchas de estas biomásas siendo los principales: cañera, cafetalero, arrocerero y forestal
2. Se propone una metodología la valoración de estas biomásas potenciales en Cienfuegos basado en cuatro categorías: económico, social, medio ambiental y tecnológico.
3. En la caña de azúcar la producción de bagazo en las tres últimas tres zafas fue de 1 571 600 tn de ello el bagazo producido fue de 1 571 600 tn lo que equivale a 2 517 470 000 kWh, dejando de emitir a la atmósfera 2 836 188,7 t CO₂. La producción de cachaza obtenida fue de 144 092,4 tn lo que equivale a 193 457 400 kWh, dejando de emitir 218 026, 47 t CO₂. En los centros de limpieza de la provincia se procesaron un total de 250460,86 tn de paja lo que genera 398 882 100 kWh/año, dejando de emitir 449 540 t CO₂.
4. La producción total de café oro fue de 334,62 tn, de ellas 91,17 corresponden a la última cosecha. Uno de los principales residuos que se utiliza con fines energéticos es la cascarilla, contando con un total de 94,38 tn lo genera 163 434,4 kWh, dejando de emitir 184 t CO₂.
5. La producción de arroz fue de 16 019,94 tn para el último año, obteniendo 3 846,52 tn de cascarilla de arroz, lo que genera 17 629 880 kWh, dejando de emitir 19 868,87 t CO₂.
6. El total de residuos aserraderos para los últimos tres años fue de 1 092 tn lo que genera 2 082 278 kWh, dejando de emitir 2 346,72 t CO₂.

RECOMENDACIONES

1. Seguir profundizando en este trabajo en técnicas de análisis multivariado, así como en el estudio de la factibilidad de estas tecnologías mediante el análisis de costo-beneficio.
2. Discutir este trabajo con los diferentes directivos que usan estas biomásas, así para materializar proyectos que permitan su aplicación

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, K. A. F. (2013). *Evaluación técnico-económica de alternativas de adaptación tecnológicas para biorrefinerías en una industria de la caña de azúcar*. (Tesis de Grado), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
- La Biomasa en Andalucía*. (2015). Andalucía, España: Agencia Andaluza de la Energía
- Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J., & Gonzalo, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa.
- Borges, R. J., Llanes, J. L., Yanes, J. P. M., Victoria, H. P. de A., Delgado, R. Á., & Sarmiento, D. D. C. (2016). *Potencialidades de entrega de energía eléctrica en dos centrales azucareros en la provincia de Cienfuegos*. Cienfuegos, Cuba. Tomado de <http://centroazucar.uclv.edu.cu>
- Bucheli, A. D. P., Ordóñez, J. C. G., & Muñoz, J. F. C. (2016). *Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: caso de estudio*. Nariño, Colombia. Tomado de <http://dx.doi.org/10.16925/in.v19i20.1415>
- Balance de Uso y Tenencia de la Tierra. (2015). Centro Nacional de Control de la Tierra. La Habana, Cuba
- Cerdá, E. (2012). *Energía obtenida a partir de biomasa*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Cruz, A. M. (2014). *Panorama energético global: Recursos y reservas, tendencias, tecnologías emergentes y áreas de investigación* (Tesis de Maestría). Universidad Técnicas München, München, Alemania.
- Delgado, A. V. (2016). *Biomasa para producir electricidad, prioridad en Cuba*. Cuba. Tomado de <http://www.prensa-latina.cu/index.php?o=rn&id=30916&SEO=uso-de-cana-biomasa-para-producir-electricidadprioridad-en-cuba>
- Fonseca, I. S., Coureaux, I. O. M., & Solanes, M. C. (2009). Estimation of reduction of CO2 emission by electric power saving project in the Cuba conditions.

Bibliografía

- Francescato, V., Antonini, E., & Bergomi, L. Z. (2008). *Manual de combustibles de la madera*. España. Tomado de www.biomassstradecentre2.eu
- García, A. R. (2016). *Analysis of the evolution of settlements in Cienfuegos province*. Cienfuegos, Cuba. Tomado de <http://www.novpob.uh.cu>
- Gómez, C. D. M. (2013). La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: Optimización energética y exegética. (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Políticas y Sociología, Madrid, España.
- Guerra, R. (2016). Cartelera de oportunidades de inversión extranjera 2016 - 2017.
- Gutiérrez, A. S., Eras, J. J. C., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2016). The Biomass Based Electricity Generation Potential of the Province of Cienfuegos, Cuba.
- López, A. (2014). Electricidad y emisiones de CO₂. *Mesa Redonda*. Cuba.
- López, I. S. (2014). Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. Tomado de <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf>
- Machín, L. R., Bermúdez, R. A. B. P., Glean, D. H., Pérez, L. E. A., & Álvarez, B. F. M. (2014). Empleo de la relación residuo producto para la estimación de biomasa cañera potencial. *Caso de estudio*, 48(3), 32–40.
- Martínez, P. E. P. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual.
- Molina, J. M. (2017a). Experimentan salto en producción de carbón vegetal en Cienfuegos.
- Molina, J. M. (2017b). Todo el café del Escambray por el mismo colador. Tomado de <http://www.granma.cu/cuba/2014-04-23/todo-el-cafe-del-escambray-por-el-mismo-colador>
- Oficina Estadística de AZCUBA. (2016). Análisis multivariado de los residuos de la caña de azúcar.
- Oficina Estadística de la Empresa Forestal Integral Cienfuegos, 2016. (2016). Madera aserrada y residuos generados en los tres últimos años.

Bibliografía

- Oficina Estadística de la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín.” (2016). Producciones de café y sus residuales anuales.
- Cierre anual de las producciones de arroz y sus residuales. (2016). Cienfuegos, Cuba: Oficina Estadística Empresa de Granos Aguada.
- Orozco, L. A. H. (2002). Estudio de viabilidad para la conversión de biomasa en energía eléctrica y térmica en una comunidad rural e indígena: Caso San Antón.
- Pérez, D. (2013). Evaluación de Necesidades Tecnológicas ante el Cambio Climático.
- Pérez, L. E. A., Segura, C., & Santana, K. D. (2015). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica.
- Pinedo, A. U. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Educación a Distancia Facultad de Ciencias Departamento de Ciencias Analíticas. Tomado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSI_C.pdf
- Piñas, J. V. (2014). Evaluación del potencial de generación energética con cascara de arroz en la zona del Huallaga Central del Departamento de San Martín. Tomado de <http://www.dremsm.gob.pe/archivos/electricidad/Potencial%20energetico.pdf>
- Riegelhaupt, E. (2016). *Biomasa para cogeneración de calor y electricidad en República Dominicana*. República Dominicana. Tomado de www.rembio.org.mx
- Rojas, L. L. (2013). *Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ciencias Forestales, Nuevo León, España.

Bibliografía

- Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles, *104*(2), 331–345.
- Sawin, J. (2016). *Energías renovables 2016. Reporte de la situación mundial*. París, Francia.

ANEXOS

Anexo 1: Produccion de biomasa como combustible de la caña de azúcar.



Anexo 2: uso importante de los residuos de la caña de azúcar.



Anexos

Anexo 3 : Llenado de los sacos de café oro de la Empresa procesadora de Café “Eladio Machín”



Anexo 4: Proceso de secado en la Empresa Procesadora de Café “Eladio Machín”



Anexos

Anexo 5 : UEB La Paqueta. Empresa de Granos de Aguada

