



Ingeniería en
**Energías
Renovables**

TECNOLOGÍA DE LA MADERA APLICADA A LA BIOMASA DENDROENERGÉTICA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE CIENCIAS
FORESTALES



BCIE

**TECNOLOGÍA DE LA MADERA APLICADA A LA
BIOMASA DENDROENERGÉTICA**

AUTOR:

ROGER MOYA ROQUE

RECONOCIMIENTO TÉCNICO:

**CÉSAR AUGUSTO ALVARADO
FARAH MARCELA GIRÓN**

DICIEMBRE 2017

CONTENIDO

UNIDAD 1

INTRODUCCIÓN.....	5
1.- BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE.....	7
2.- SUBPRODUCTOS (ASTILLAS, BRIQUETAS, PELLETS, CARBÓN).....	13
3.- RENDIMIENTO DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA MEDIANTE GASIFICACIÓN SEGÚN ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y AMBIENTALES.....	23
BIBLIOGRAFÍA.....	26
4.- PROTOCOLO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA (EXPERIMENTOS Y VALIDACIÓN).....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	31
5.- USO DE SECADORAS SOLARES.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	36
6.- PROCESOS TERMOQUÍMICOS.....	37
7.- ESTUDIOS DEL EFECTO DE DIFERENTES FACTORES (ESPACIAMIENTOS, ESPECIES, EDADES Y SITIOS). PRUEBAS DE LABORATORIO APLICABLE A LA BIOMASA SEGÚN NORMAS ESTANDARIZADAS.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	52

CONTENIDO

UNIDAD 2

INTRODUCCIÓN	61
1.- ¿POR QUÉ LA BIOMASA CONSTITUYE UN BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO?.....	65
ORIGEN SOLAR DE LA ENERGÍA PRESENTE EN LA BIOMASA.....	67
LAS PLANTAS COMO ACUMULADORES Y CAPTADORES DE ENERGÍA SOLAR.....	67
PRINCIPALES VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE.....	68
VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS.....	68
INCONVENIENTES MEDIOAMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICOS	69
ASPECTOS CLAVES PARA FAVORECER UN VECTOR ENERGÉTICO BASADO EN LA BIOMASA FORESTAL.....	69
2.- TRANSFORMACIÓN FÍSICA DE LA BIOMASA COMO COMBUSTIBLE	73
EL ASTILLADO.....	71
EL PELETIZADO	72
EL BRIQUETADO.....	73
EL EMPACADO.....	75
3.- PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS Y BRIQUETAS.....	77
EL PRETRATAMIENTO	78
EL TRITURADO.....	79
SECADO.....	79
LOS SECADORES PARA BIOMASA PUEDEN SER DE DOS TIPOS: DIRECTOS O INDIRECTOS.	80
SECADO DIRECTO O POR CONVECCIÓN.....	80
SECADERO INDIRECTO O POR CONDUCCIÓN	80
SECADEROS POR RADIACIÓN	80
MOLIENDA.....	81
COMPACTACIÓN	81
ENFRIAMIENTO.....	82
4.- LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN.....	83
USO DEL CARBÓN COMO MEJORADOR DE SUELOS E IMPORTANCIA.....	86
BIBLIOGRAFÍA	88

*Ningún ingeniero ni químico ha
pregonado tener la capacidad
de producir un material que sea
indistinguible de la piel humana.*

*Es posible que se logre con el
tiempo, pero aún en el supuesto de
que existiese este invento, sabríamos
lo poco importante que resulta
tratar de hacer más humana a una
"máquina pensante" cubriéndola
con esta carne artificial.*

Alan Turing (1912-1954)

*Cuatro cosas
no pueden ser
escondidas durante
largo tiempo: la
ciencia, la estupidez,
la riqueza y la
pobreza.*

Averroes



UNIDAD 1


INTRODUCCIÓN

En este módulo se introducirán los conceptos más relevantes sobre los procesos de transformación de la biomasa en subproductos y las tecnologías para producir electricidad. Para lograr este entendimiento es necesario conocer las técnicas de laboratorio y uso de los equipos para caracterizar el material lignocelulósico.

Existen múltiples formas de convertir la biomasa en energía, siendo las más comunes la combustión o el utilizar métodos mecánicos, termoquímicos, biológicos y químicos para producir biocombustibles. Cuando hablamos de recursos primarios bioenergéticos nos referimos a la aplicación directa de la biomasa para producir energía. Mientras que los recursos secundarios bioenergéticos es la biomasa ya convertida en biocombustibles, sean en forma sólida, líquida o gaseosa; para distintos usos energéticos, como la producción de electricidad, calefacción o transporte. La conversión termoquímica puede ser aplicada a todos los tipos de biomasa. Algunos tipos de transformación termoquímica son por combustión, gasificación, pirólisis o licuefacción. Las tecnologías de combustión son las tecnologías más utilizadas y maduras. La gasificación y la pirólisis son cada vez más importantes. Mientras que la licuefacción se utiliza raramente en la actualidad, pero también tiene una vasta historia comercial.

OBJETIVO GENERAL

Introducir al estudiante en la comprensión de las principales tecnologías utilizadas para producir energía eléctrica a partir de biomasa. Se hará énfasis en pequeñas y medianas potencias (hasta 5000 kWe). Luego de analizar los procesos existentes para esta conversión energética y teniendo en cuenta los aspectos más relevantes citados en la literatura científica, se seleccionan los procesos y las tecnologías más adecuados para la implementación de programas de aprovechamiento de la biomasa como combustible. Entre las alternativas se destaca la gasificación de biomasa acoplada a motores de combustión interna.



*Mientras la ciencia
tranquiliza, el arte
perturba.*

Georges Braque (1882-1963)

1.- BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE

OBJETIVO

En esta unidad se busca que el estudiante conozca el origen biológico de la biomasa y más específicamente la biomasa forestal y su importancia como biocombustible sólido con las posibilidades de su transformación en calor, electricidad y otros subproductos.

¿QUÉ ES LA BIOMASA?

En esta unidad hablaremos de la biomasa dentro del ámbito de las energías renovables, como la materia orgánica de origen natural reciente que sirve para la generación de electricidad, calor, biocombustibles, procesos de calefacción, materias primas para la industria química, compostaje y otras aplicaciones.

Cuando nos referimos a la biomasa como un recurso, se define como **“materia orgánica de origen biológico reciente”** (San Miguel y Gutiérrez, 2015). Este concepto nos sirve para determinar la primera caracterización importante de la biomasa y es su origen natural u orgánico. Incluye los productos de origen animal, vegetal o microbiano. También

la materia orgánica presente en las aguas residuales y la basura que producimos.

Además de la biomasa natural, existe la biomasa residual producto de las actividades humanas, como la agricultura, la ganadería y la industria, entre otras. También pueden ser usados los excedentes de cosechas y hasta se pueden desarrollar cultivos energéticos, de plantas sembradas con el fin específico de producir energía.

Algunos ejemplos de biomasa para la generación de energía de amplio uso en la actualidad son las especies de árboles de rápido crecimiento, cereales, aceites vegetales y residuos agrícolas, como en el caso de la broza del café, cascarilla de arroz, residuos de piña y banano, podas de cítricos, coquito de la palma y la caña de azúcar.

Los combustibles fósiles y las materias derivadas de estos, como los plásticos y otros productos sintéticos, no pueden ser incluidos dentro de la caracterización de la biomasa, principalmente porque carecen de un carácter renovable.

Al hablar de la biomasa en el contexto energético, ésta se incluye **dentro de las fuentes de energía de carácter renovable**, ya que su contenido energético proviene a final de cuentas de la energía solar que es fijada por las plantas en el proceso fotosintético y acumulada en las moléculas orgánicas que conforman la biomasa.

Esta biomasa la podemos transformar en biocombustibles por diferentes procesos, para una gran variedad de aplicaciones. Los combustibles que se producen se dividen en sólidos, líquidos y gaseosos, según su estado físico (Figura 1).

Los biocombustibles pueden ser usados como biocarburantes para vehículos de transporte, en la generación de electricidad mediante variados procesos, para la calefacción mediante su combustión y hasta para la industria química.

<p>FUENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Biomasa natural ● Biomasa residual <ul style="list-style-type: none"> ● Agrícola ● Forestal ● Ganadera ● Industrial ● Urbana ● Excedentes de cosechas ● Cultivos energéticos 	<p>BIOCOMBUSTIBLES</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Sólidos ● Líquidos (Biocarburantes) ● Gaseosos <hr/> <p>APLICACIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Combustión ● Motores (de explosión y combustión interna) ● Materias primas industria química
<p>PROCESOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Mecánicos ● Termoquímicos ● Biotecnológicos ● Extractivos 	<p>SECTORES DE USO</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Calefacción doméstica ● Calor para usos industriales ● Electricidad ● Transporte ● Industrias químicas

FIGURA 1. CAMPOS QUE ABARCA EL ÁREA DE BIOMASA. LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS ESTÁN FORMADOS POR CINCO ELEMENTOS, CADA UNO DE ELLOS TOMADO DE LOS CINCO CAMPOS QUE ABARCA EL ÁREA DE LA BIOMASA. CADA CAMPO ES UN CONJUNTO HETEROGÉNEO DE ELEMENTOS.

EL ORIGEN SOLAR DE LA ENERGÍA PRESENTE EN LA BIOMASA

La biomasa la podemos incluir dentro de las energías renovables dentro de un tipo de energía solar de aprovechamiento directo. El origen energético de la biomasa proviene de la fotosíntesis, que sirve para transformar la energía solar a energía química, que luego es acumulada en las moléculas orgánicas que componen la biomasa.

El proceso fotosintético es muy complejo y ocurre en los cloroplastos, que son unos orgánulos localizados en el interior de las células de las hojas y partes verdes de los vegetales. En este proceso los vegetales captan el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico y, utilizando el agua (H_2O) y la energía solar, lo transforman en compuestos orgánicos, según la siguiente ecuación general:



Este proceso, que además es altamente eficiente en la captación y almacenamiento de energía, tiene la ventaja adicional de que fija el carbono del ambiente y libera oxígeno.

Después, en el proceso de producción de energía, a la biomasa se le suma oxígeno en determinados procesos de combustión, con lo que se obtiene por resultado la liberación del dióxido de carbono y de la energía fijada. El CO_2 tomado de la atmósfera y retenido en las partes vegetales es nuevamente liberado al ambiente.

LAS PLANTAS COMO ACUMULADORES Y CAPTADORES DE ENERGÍA SOLAR

- Producen los semiconductores (moléculas de clorofila) que pueden actuar como captadores de los fotones solares.
- Producen sus propios paneles solares captadores de la radiación solar (hojas) y disponen de sistemas de orientación de éstos.
- Utilizan el agua como fuentes de electrones para reponer los electrones cedidos por la clorofila para reducir el CO_2 .
- Utilizan la transpiración para disipar el exceso de calor producido por el componente térmico de la radiación solar.
- Transforman la energía solar en energía química, que puede ser utilizada para fines energéticos o como materia prima.
- Producen su propio acumulador de energía (biomasa) que puede llegar a durar decenas o centenares de años.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA BIOMASA

Los distintos elementos que componen la biomasa tienen una influencia determinada en las características energéticas de ésta. Algunos elementos influyen en la combustión, otros en la corrosión y en el ambiente, y otros en las características de las cenizas residuales. Por esto es importante conocer cuáles son los elementos de mayor abundancia en este tipo de materia.

ELEMENTOS DE MAYOR ABUNDANCIA:

- El Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Azufre (S) son los seis elementos de mayor abundancia en la biomasa, también llamados macroelementos por su abundancia relativa. Constituyen el 96% de la biomasa en base seca y forman parte de las moléculas más abundantes.
- De estos elementos el carbono y el oxígeno son los elementos más abundantes con proporciones análogas, del 43% al 48% del peso seco.
- El hidrógeno está presente entre el 5.5% al 6.5%.
- El nitrógeno está presente entre el 1.5% y el 5%, según el contenido proteico de la biomasa.
- El Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Cloro (Cl), Yodo (I) y Magnesio (Mg) y Hierro (Fe) son siete elementos que también son esenciales, pero tienen abundancia menor. En conjunto constituyen cerca de un 3.9% de la biomasa en base seca. Forman parte de sales o de moléculas específicas como el caso del magnesio en la clorofila o el hierro en la hemoglobina.
- El Cobre (Cu), zinc (Zn), Manganeso (Mn), Cobalto (Co), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Selenio (Se) y Silicio (Si), son los ocho elementos restantes entre los más esenciales de la biomasa. Se les llama también elementos traza y constituyen un 0.1% de la biomasa.
- También hay otra serie de elementos, como Aluminio, Arsenico, Bario, Cadmio, Cromo, Mercurio, Plomo, Antimonio, Titanio, Talio, Vanadio y Wolframio, están presentes en la biomasa en menor medida y aparecen en las cenizas, con mayor o menor proporción, pero su efecto sobre las actividades vitales, si es que lo tienen, se desconoce. Su uso práctico es

como fertilizante.

ELEMENTOS QUE TIENEN EFECTOS SOBRE LA COMBUSTIÓN

El carbono y el hidrógeno desprenden energía al oxidarse completamente. Además, el oxígeno favorece la combustión completa, por lo que disminuye la cantidad de aire necesaria en el proceso de producir energía.

ELEMENTOS CON INFLUENCIA SOBRE LA CORROSIÓN Y/O EL MEDIO AMBIENTE

El cloro puede dar lugar a dioxinas y cloro libre, que son nocivos para el medio ambiente. También se puede dar la formación de cloruro de hidrógeno, que junto al vapor de agua puede causar la corrosión de materiales de hierro.

El nitrógeno contenido en la biomasa, al oxidarse en la combustión, puede originar óxidos de nitrógeno, que sumados a los que se producen normalmente a altas temperaturas con el nitrógeno atmosférico, puede aumentar considerablemente la presencia de estos gases en las emisiones, resultando en efectos nocivos para la salud. Por esto, en principio se debe evitar quemar biomasa con alto contenido en nitrógeno.

El azufre al oxidarse en la combustión produce óxidos de azufre, que con el vapor de agua se transforma en ácido sulfúrico. Este ácido puede causar corrosiones en materiales de hierro y al propagarse con las emisiones al aire es uno de los causantes de las lluvias ácidas.

ELEMENTOS MAYORITARIOS EN LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS

Entre los elementos que más presentes en forma de óxido en las cenizas de la combustión de la biomasa están aluminio, calcio, cloro, hierro, potasio, magnesio, sodio, fósforo, selenio, silicio y titanio.

- El sodio y el potasio pueden influir en la vitrificación de las cenizas, en relación a su abundancia y a la temperatura de combustión.
- El calcio y magnesio pueden neutralizar el efecto del sodio y el potasio en la vitrificación de las cenizas.
- El contenido de potasio, fósforo, magnesio e hierro en las cenizas puede determinar su uso como fertilizante. (San Miguel y Gutiérrez, 2015)

ELEMENTOS MINORITARIOS EN LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS

Algunos elementos que se encuentran en menores proporciones en las cenizas de la combustión de biomasa pueden tener aplicación como micronutrientes en su aplicación como fertilizantes. Varios de estos microelementos, tales como cadmio, bario, mercurio o zinc -dependiendo de la concentración que alcancen- pueden hacer que la ceniza no se deba utilizar como fertilizante por ser nocivos para la salud humana.

ROL DE LA BIOMASA COMO ENERGÍA RENOVABLE

Se reconoce en la biomasa un menor impacto ambiental que el derivado del uso de los combustibles fósiles, ya que la biomasa suele ser un combustible más limpio en azufre y en metales; y además, el CO₂ procedente de la biomasa se fija de forma natural en el proceso de renovación de ésta.

En segundo lugar, los combustibles fósiles, en particular los hidrocarburos, tienen un límite cercano en el tiempo para que se agoten sus reservas y se estima que a mediados de este siglo XXI descenderá fuertemente la capacidad de extracción de petróleo y gas natural.

LITERATURA RECOMENDADA

- Esquivel E. (2013). Dendroenergía: una posibilidad para Costa Rica. Revista Germinar. Costa Rica. Ene3 (10), 9-10.
- Esquivel E., Arias D., Briceño E., Guevara M., Chavarría A., Camacho D., Moreira I., Arnáez E., Canessa R., 2015. Dendroenergía: Plantaciones Forestales hacia la Producción de Biomasa para Múltiples Propósitos. Taller “Validación de paquetes tecnológicos para la producción de biocombustibles a partir de residuos agrícolas, silvícolas, agroindustriales y otros. Ciudad de México. México. DOI: 10.13140/RG.2.1.1520.7444
- Esquivel E., Guevara M., Briceño E., (2016). Dendroenergía, resultados promisorios, una realidad en Costa Rica. XIV Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y Ambiental. San José, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.2.34602.62409.
- Hughell, D. A. (1990). Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en América Central (No. 22). CATIE.
- Murillo, O., & Valerio, J. (1991). Melina: *Gmelina arborea* Roxb. Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica No 181. Proyecto MADELEÑA, CATIE. Turrialba Costa Rica, 69.
- Ugalde, L. (1997). Resultados de 10 años de investigación silvicultural del Proyecto Madeleña en Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.

2.- SUBPRODUCTOS (ASTILLAS, BRIQUETAS, PELLETS, CARBÓN)

OBJETIVO

En esta unidad se busca que el estudiante conozca la aplicación del uso de la biomasa a través de la producción de diferentes biocombustibles sólidos y que representen una alternativa para la generación de calor y electricidad como mecanismo de disminuir el uso de derivados del petróleo.

APLICACIONES DE LA BIOMASA

La biomasa es actualmente transformada mediante diversas tecnologías para la obtención de productos alternativos a los obtenidos a partir del petróleo, en un mercado tradicionalmente dominado por los hidrocarburos. La evolución del precio del petróleo y su tendencia ascendente en los últimos años debido a la creciente demanda mundial y agotamiento en las explotaciones de este recurso, son factores que favorecen el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa como recurso renovable. La bondad de los proyectos hidroeléctricos en algunos países tiene también sus riesgos ante la

variabilidad climática que obliga mantener la energía de respaldo mediante las plantas termoeléctricas. Ante este escenario, los países buscan diversificar la matriz energética mediante fuentes renovables.

En este campo de las energías renovables, las principales aplicaciones de la biomasa son las siguientes:

- Obtención de energía eléctrica/térmica a través de la biomasa como combustible:
 - Valorización directa de la biomasa. Obtención de energía térmica y/o eléctrica.
 - Valorización indirecta de la biomasa. Obtención de gas combustible, biocombustibles líquidos (bioalcoholes, biodiesel), residuos sólidos del tratamiento térmico (carbón vegetal y cenizas).
- Obtención de productos químicos: materias químicamente simples a través de procesos de síntesis a partir de gases, productos de fermentación y destilación, entre otros procesos.

Muchas de las técnicas utilizadas con la biomasa se han utilizado durante años, algunas de ellas perdurando en la actualidad (ej.: uso de la leña en los hogares). Otras técnicas son de reciente implementación y demostración (gasificación) y otras parecen tener un buen potencial para llegar a ser técnicas futuras concebibles, aunque no se haya demostrado aún su aplicación directa y rentabilidad para un uso industrial (pirólisis).

Por otro lado, la obtención de productos químicos a partir de recursos renovables es también en la actualidad objeto de estudio a escala internacional. En el marco de la Química Verde la investigación se enfoca en la búsqueda de nuevos productos menos contaminantes a partir de recursos forestales, agrícolas, cultivos energéticos u otros residuos de origen lignocelulósico, substituyendo a los actuales productos químicos de procedencia no-renovable.

A continuación se presenta una revisión del conjunto de tecnologías basadas en la combustión de la biomasa desde la preparación física de la biomasa como forma estándar de combustible.

TRANSFORMACIÓN FÍSICA DE LA BIOMASA COMO COMBUSTIBLE

La heterogeneidad en la naturaleza y formas de la biomasa primaria hace que sea necesaria la adecuación y estandarización del formato y de las características físicas de la biomasa a las requeridas según la tecnología de conversión de energía posteriormente empleada.

Las tecnologías de preparación física de la biomasa se basan en procesos de densificación/compactación (astillado y la molienda) con el objetivo de homogeneizar las propiedades físicas del material, incrementar la densidad calorífica y estandarizar el formato de la biomasa.

EL ASTILLADO

El astillado de la biomasa se basa en la trituración de la materia para la obtención de fragmentos (entre 2 y 10 cm de longitud). El producto final, la astilla, es la que se utiliza en la totalidad de procesos de transformación energética de biomasa de media y gran envergadura. Se caracteriza por tener una forma plana o cilíndrica, predominando la longitud (3 - 10 cm) y la amplitud (2 - 6 cm) sobre el grosor (<2 cm). La densidad aparente es baja (250 - 350 kg/m³) en relación a otros combustibles como el carbón y los pellets de madera.

La trituración de la biomasa, a diferencia de otros procesos de transformación física, se puede efectuar tanto en el lugar de origen o precedencia de la biomasa (trituración *in-situ*), como fuera del entorno de origen o en la propia planta de conversión energética (trituración *ex-situ*).

Las astilladoras se pueden clasificar según el tipo del equipo, mecanismo de astillado, modo de alimentación del material a triturar y salida de la astilla (ver cuadro 1). En la Figura 1 se ilustra el funcionamiento de las astilladoras en el campo.

CUADRO 1. CLASIFICACIÓN DE LAS ASTILLADORAS

Tipo de clasificación	Tipo de astilladora		
	Fijas Autopropulsadas o autónomas	Montadas Móviles	Remolcadas Acopladas
Mecanismo de astillado	Tambor	Disco	Cuchillas
Alimentación / entrada del material	Manual		Mecánica
Salida de la astilla	Por gravedad		Por ventilación



FIGURA 1. ASTILLADORAS EN UN NÚCLEO DE PRODUCCIÓN FORESTAL.

EL PELETIZADO

El peletizado se basa en la compresión de la materia vegetal (astillas, aserrín, etc.) mediante la acción de unos rodillos (de 1 a 5 rodillos) contra una matriz de agujeros de entre 0.5 a 2.5 cm de diámetro (Figura 2). Si el material de entrada presenta dimensiones mayores a astillas, se requiere de un proceso de astillado previo al prensado con los rodillos. Una vez formado el pellet, es necesario un proceso de tamizado para la homogeneización del tamaño del producto final.

El pellet es un pequeño cilindro de tamaño variable (2 - 7 cm de longitud; 1.5 cm de amplitud), con una humedad inferior al 12%. La densidad del pellet es relativamente elevada en comparación a las astillas (1000 - 1300 kg/m³). Los factores que influyen en esta densidad son los siguientes:

- El tipo de materia prima prensada. A mayor densidad del material original, mayor es la densidad del pellet.
- La presión ejercida por la prensa, variable según la maquinaria utilizada.

El poder calorífico de los pellets es superior al de la leña, astillas y briquetas. Dependiendo de la densidad y humedad de la biomasa inicial, el producto contendrá un poder calorífico de entre 21-22 MJ/kg.



FIGURA 2. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PELETIZADORA.

EL BRIQUETADO

El briquetado consiste en la compresión de la materia vegetal (aserrín, restos de madera, cáscara de arroz, desechos de frutas, hierba, hojas, residuos de cocina, agricultura, residuos forestales, entre otros) superior a 200 MPa hasta producir un aumento de la temperatura del material hasta 100-150°C. A temperaturas elevadas la lignina se plastifica permitiendo la formación de unidades compactas.

Una briquetadora consiste en una tolva de alimentación, un sistema dosificador simple o múltiple de velocidad variable, una cámara de compactación o densificadora, un canal refrigerante y un sistema de corte (Figura 3). La prensa es el componente clave en la producción de briquetas. Se disponen de cuatro tipos de briquetadoras, utilizadas en función de su aplicación industrial y del tipo de material

a comprimir: (a) Prensa de impacto; (b) Prensa de extrusión; (c) Prensa de briquetado hidráulica o neumática; y (d) Prensa de doble rodillo. La Figura 3 ilustra una briqueteadora de fabricación china.

La característica común de las briquetas es su elevada densidad (1000 - 1300 kg/m³). La forma es normalmente cilíndrica con diámetros comprendidos entre 3 y 20 cm, y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otra forma usual de briqueta es el prisma cuadrado o el prisma hexagonal vacío. También se pueden obtener formas de ladrillo.

La humedad final de la briqueta depende de las características físico-químicas del material que se requiere prensar y de la forma final del producto (8 al 10% de humedad en la salida de la prensa).

Se pueden utilizar para proporcionar calor en las estufas, así como para cocinar. Además de su uso doméstico, se pueden producir entre un grupo de personas en cooperativa, y ser una fuente de ingresos para la comunidad, ya que se venden muy bien.

Propiedades:

- Poseen un alto poder calorífico.
- Muy poca humedad, lo cual favorece el encendido.
- Limpio: crea muy poca ceniza.
- Fáciles de almacenar.
- Bajísimo coste de producción.



FIGURA 3. BRIQUETEADORA DE FABRICACIÓN CHINA.

EL EMPACADO

El empacado se utiliza en la cosecha de algunos cultivos herbáceos (en su mayoría de cereales) con el objetivo de obtener paquetes comprimidos de materia. Los usos finales de estos paquetes, llamados pacas, son la alimentación ganadera (paja para forraje) o la producción de energía. Las pacas adquieren formas y volúmenes variables en función de la máquina utilizada. Los tipos de empacadoras comúnmente más utilizadas son las siguientes:

- Empacadora convencional. Produce paquetes prismáticos de peso inferior a 40 kg. Se distinguen empacadoras de alta presión, media presión y baja presión.
- Rotoempacadoras. Producen pacas cilíndricas de gran tamaño.
- Empacadoras rectangulares. Producen pacas prismáticas de peso superior a 100 kg.

Las pacas producidas en la cosecha suelen ser agrupadas en el campo para facilitar su secado, recogida y carga al remolque de un camión (Figura 4).



FIGURA 4. MAQUINARIA ENSILADORA DE PASTO PARA ILUSTRAR EL CONCEPTO DE LAS PACAS BIOENERGÉTICAS, PROCESO SIMILAR SE REALIZA CON LOS RESIDUOS DE LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZÚCAR.

LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN

Una forma de valorizar la biomasa lignocelulósica es mediante el proceso termoquímico, denominado carbonización. Consiste en el calentamiento de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, en el cual la materia es transformada en un sólido rico en carbono (carbón vegetal o biocarbón) y en

materia volátil (gases y líquidos), como agua (H_2O) metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), entre otros.

Las etapas que se presentan en la carbonización pirolítica se pueden dividir en cuatro. En el Cuadro 2 se describe cada etapa, y se presentan los rangos de temperatura a las que se dan.

CUADRO 2. ETAPAS DEL PROCESO PIROLÍTICO PARA PRODUCCIÓN DE CARBÓN.

Etapa	Descripción
I (T<100°C)	Corresponde a la etapa de secado. La biomasa se calienta a bajas temperaturas y se libera la humedad superficial, así como moléculas de agua débilmente unidas
II [T (100°C a 300°C)]	La segunda etapa o etapa intermedia. En esta etapa ocurre la deshidratación exotérmica de la biomasa con la liberación de agua y de gases de bajo peso molecular como CO y CO_2 (Basu, 2013), además de la destilación de aceites esenciales (Hernández, 2011).
III [T (200°C a 600°C)]	Se presenta la descomposición de moléculas largas de biomasa en carbón, gases condensables (GC) y gases no condensables (GNC).
IV [T (300°C a 900 °C)]	Se da el craqueo de volátiles a carbón y a gases no condensables (Basu, 2010)

El carbón vegetal es un sólido, poroso, frágil, de color negro, el cual tiene una amplia variedad de usos. Para su producción existen una variedad de técnicas empleadas para la producción de carbón, las cuales se basan en el principio de aislar la madera del exterior para evitar su contacto con el oxígeno, y evitar que se incendie. Dentro de los principales métodos utilizados para la producción de

carbón se tienen: fosas de tierra, hornos de ladrillo, hornos de tierra, hornos metálicos transportables, así como los métodos mejorados (Cuadro 3).

Sobre la evaluación del carbón y sus propiedades, en el cuadro 4 se resumen los principales parámetros para su evaluación.

CUADRO 3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN COMUNES, ASÍ COMO UN MÉTODO MEJORADO.

Método	Descripción	Rendimientos	Ventajas	Desventajas
Fosas de tierra	Consiste en una excavación de terreno, en la cual se coloca la biomasa y se cubre con tierra y vegetación (BUN-CA, 2002)	Rendimientos muy bajos además de carbón de mala calidad (Pacheco & Carmona, 2005)	Es de bajo costo (FAO, 1983).	Se genera un carbón irregular, con mayor contenido de volátiles y contenido de cenizas, y con mayor probabilidad de formación de trozos de carbón mal carbonizados (Pacheco & Carmona, 2005). El carbón se contamina con tierra. Se da la pérdida de calor por radiación (Adam, 2009). Y según el mismo autor, se pueden presentar incendios impredecibles.
Parvas o hornos de tierra	Consiste en apilar la madera sobre el suelo, y cubrirla con tierra (FAO, 1983).	Rendimientos de 16 % a 25 %, siendo el más bajo el más frecuente (FAO, 1983).	Es de bajo costo y es más eficiente que las fosas de tierra (FAO, 1983)	Presenta rendimientos inciertos, y existe una alta probabilidad que se dé la contaminación del carbón con piedras y tierra (Pacheco & Carmona, 2005)
Hornos de ladrillo	Consiste en un horno, al cual se le controla la entrada del aire, y durante la fase del enfriamiento, se sella el horno rápida y herméticamente para impedir el ingreso del aire, y es de construcción sencilla (FAO, 1983).	Rendimientos sorprendentemente buenos de carbón vegetal (27 %), de calidad apta para todos sus usos industriales y domésticos (FAO,1983)	Son más eficientes que las fosas u hornos de tierra. Requieren poca mano de obra.	No se adaptan a la recuperación o quema reciclada de ningún subproducto, alquitran o gases, con lo que aumenta la contaminación del aire y reduce levemente la posible eficiencia térmica (FAO, 1983)
Método	Descripción	Rendimientos	Ventajas	Desventajas
Hornos metálicos transportables	Cualquier dispositivo cilíndrico, que contenga entradas y salidas de aire, y que sus partes se puedan separar para que sea transportable (Pacheco & Carmona, 2005).	26 % (FAO, 1983).	Al igual que el método de hornos de ladrillo este método es más eficiente que los métodos tradicionales. Con su uso se acorta la distancia de transporte de la madera (Pacheco & Carmona, 2005). Según la FAO (1983), es fácil de transportar, se obtienen mejores rendimientos con respecto a la masa, ya que se puede controlar mejor la entrada de aire y realizar el proceso en menor tiempo, y el carbón no se contamina con tierra. De acuerdo al mismo autor se pueden carbonizar diversos tipos de materiales, su operación es sencilla, y el proceso requiere menos supervisión que con los métodos anteriores. Es de bajo costo y su construcción es menos compleja que la de los hornos de ladrillo (Pacheco & Carmona, 2005). Puede ser desarmados con facilidad y frecuencia y transportados al lugar donde se encuentra la biomasa (Pacheco & Carmona, 2005).	La materia prima debe ser empaquetada con cuidado para lograr una eficiencia máxima, y los tamaños del material se deben reducir (FAO, 1983).
Sistema mejorado de producción de carbón (SMP)	Unidades piloto de bajo costo, desarrolladas en la India y África, tipo hornos metálicos, para generar un proceso de carbonización más sostenible y amigable con el ambiente (Adam, 2009).	(30 a 40) %	De acuerdo a Adam, J. (2009), los gases volátiles son aprovechados en el secado de la materia prima. El mismo autor menciona que se reducen las emisiones atmosféricas en cerca de 75 %, ya que presenta una fase en la que se queman los gases volátiles, los cuales son aprovechados para acelerar el proceso de carbonización. El ciclo de carbonización es de aproximadamente de 12 horas (Adam, 2009).	Se debe mejorar la vida útil del sistema (Adam, 2009). No es transportable.

USO DEL CARBÓN COMO MEJORADOR DE SUELOS E IMPORTANCIA

El carbón manufacturado a través de la pirólisis de la biomasa se denomina biocarbón. El biocarbón genera muchos beneficios ambientales y agronómicos al aplicarlo en el suelo. Se ha demostrado que el uso del carbón vegetal como enmienda en el suelo, no altera las concentraciones de los parámetros físicoquímicos, tanto del suelo, como de las plantas, y por el contrario mejora su calidad y el crecimiento de las plantas. Además se ha observado la reducción de la emisión del suelo de gases de efecto invernadero, también puede incrementar el rendimiento de los cultivos, especialmente por sus mecanismos como la retención de la humedad y la retención de nutrientes en el suelo, mejoras en la estructura del suelo, e incremento de la actividad microbiana, particularmente cuando se aplica en suelos pobres o degradados.

CUADRO 4. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL CARBÓN DE ACUERDO A VARIOS AUTORES.

Parámetro	Antal & Gronli (2003).	FAO (1983).	Norma EN 1860-2 (Pacheco & Carmona, 2005)	(Byrne & Nagle, 1997)
Densidad del carbón ($\frac{g}{cm^3}$)	-	-	-	0,07-0,6
Contenido de humedad (%)	-	5-15	8	-
Contenido de volátiles (%)	20-30 (Uso doméstico) 10-15 o menos (Metalurgia)	≤ 30	30	-
Contenido de cenizas (%)	0,5-5	0,5-5	8	-
Poder calórico ($\frac{Mj}{kg}$)	28 - 33	28 - 33	-	-
Carbono fijo (%)	-	50-95	50-95	-

Nota: El símbolo – indica que no se registró un valor para dicho parámetro.

LITERATURA RECOMENDADA

- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(1), 77-88.
- Deiana, A., Petkovic, L., Silva, H., Aguilar, E., Sardella, M., & Venturini, R. (2002). Residuos y subproductos para la obtención de briquetas de Carbón Activado. *Proceedings of the VI Curso-Taller Iberoamericano de Adsorbentes y Catalizadores para la Protección Ambiental, Redes Temáticas VC y VC-CYTED*, 9.
- Escobar, J. (2013). Biomasa lignocelulósica en Brasil Perspectivas de uso para pellets y briquetas en el sector industrial. *The Bioenergy International*, (18), 38-39.
- Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *Iteckne*, 9(1), 21-30.
- Valderrama, A., Curo, H., Quispe, C., Llantoy, V., & Gallo, J. (2007). Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales. *Revista de Investigación CEDIT*, 2.

3.- RENDIMIENTO DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA MEDIANTE GASIFICACIÓN SEGÚN ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y AMBIENTALES

OBJETIVO

En esta unidad se revisarán los principales resultados obtenidos en la literatura sobre los rendimientos típicos de las plantas de generación de energía con biomasa. Se busca que el estudiante mediante la consulta bibliográfica verifique cuál proceso de transformación de la biomasa es más eficiente considerando bajas potencias (menores que 10 MWe).

TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN

Existen diversas configuraciones y diseños de reactores para la transformación de la biomasa. Entre ellos se encuentran los de lecho fijo (contracorriente, equicorriente, flujo cruzado), lecho fluidizado (burbujeante y circulante), horno de arco, antorcha de plasma y horno eléctrico. Sin embargo, los más utilizados en procesos de generación

de energía eléctrica son los reactores de lecho fijo y los de lecho fluidizado entre bajas y medias potencias en condiciones de operación autotérmicas. Tales gasificadores se acoplan a turbinas de gas o motores de combustión, según las potencias de diseño de las plantas. En el Cuadro 5 se presentan las características clave de cada una de las plantas de gasificación de biomasa.

CUADRO 5. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS GASIFICADORES DE BIOMASA CON AIRE.

Gasificadores		Temperatura (°C)		Alquitranes	Partículas	Carga parcial	Posibilidad de ampliación	Capacidad máxima actual (t h ⁻¹)	MWe ^a	
		Reacción	Gas de salida						Mínimo	Máximo
Lecho fijo ^b	Equicorriente	1.000	800	Muy bajo	Moderado	Bueno	Bajo	0,5	0,1	1
	Contracorriente		250	Muy alto			Bueno	10 ^c	1	10
	Corriente cruzada	900	900	Alto	Justo	Bajo	1	0,1	2	
Lecho fluidizado	Un reactor	850	800	Justo	Alto	Bueno	Bueno	10 ^c	1	20
	Lecho fluidizado rápido		850	Bajo			Muy alto	Muy bueno	20 ^c	2
	Lecho circundante								100	
	Lecho arrastrado	1.000	1000	Bajo	Muy alto	Bajo	Bueno	20 ^c	5	100
	Doble reactor	800	700	Alto	Alto	Justo	Bueno	10 ^c	2	50
Lecho móvil	Varios hogares	700	600	Alto	Bajo	Bajo	Bueno	5	1	10
	Lecho móvil horizontal					Justo	Moderada			
	Hogar inclinado	800	700	Bajo	Alto	Bajo	Moderada	2	0,5	4
	Tornillo / horno con barrena			Alto		Justo				
Otros	Horno rotativo	800	800	Alto	Alto	Bajo	Moderada	10 ^c	2	30
	Reactores ciclón	900	900	Bajo	Muy alto			5	1	10

^a Con 36% de eficiencia total.
^b Algunas veces llamado *lecho móvil*; la biomasa se mueve lentamente.
^c Capacidad de ampliación en grandes niveles.

Fuente: adaptada de Bridgwater, ¹⁹⁹¹.

RENDIMIENTO DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA MEDIANTE GASIFICACIÓN SEGÚN ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y AMBIENTALES

Este rendimiento depende de la eficiencia de cada uno de sus componentes; sin embargo, se suele dar como función de los principales dispositivos que la conforman: gasificador, motor y generador. De esta manera, el rendimiento global del proceso es el producto de los rendimientos de cada uno de estos componentes (Ecuación 1).

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{gasificador}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{generador}} \tag{1}$$

Con el fin de determinar rendimientos típicos de los componentes, se refiere una búsqueda bibliográfica sobre las plantas de generación de energía con biomasa, teniendo en cuenta la tecnología, la potencia y los rendimientos. La información que se encontró y consultó se presenta en el Cuadro 6. El rendimiento reportado para el proceso de gasificación es en frío,

solo tiene en cuenta la energía química disponible en el gas de gasificación (poder calorífico). Este procedimiento es el más pertinente si se considera el uso posterior del gas en máquinas térmicas. Por otro lado, como la eficiencia del generador con frecuencia es muy alto (mayor al 95 %), se suele presentar el rendimiento conjunto del motor y el generador.

CUADRO 6. RENDIMIENTOS TÍPICOS DE COMPONENTES DE PLANTAS DE BIOPOTENCIA POR GASIFICACIÓN.

Gasificador (%)				Motor-generador (%)		Global (%)	
Lecho fijo		Lecho fluidizado		Motor-generador (%)	Referencia	Global (%)	Referencia
(%)	Referencia	(%)	Referencia				
70	[103]	60-75	[85]	24	[103]	17	[103]
75	[86]	60	[108]	28	[86]	20	[86]
67,6-86,8	[109]	67-75	[110]	17-25 y 22-25	[110]	12,5 y 17	[110]
50-70	[110]			25-30	[111]		
				25	[87]		
				24	[112]		

BIBLIOGRAFÍA

- Alimuddin, Z., Lahijani, P., Mohammadi, M., Mohamed, A. R. "Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010; 14:2852-2862
- Henriksen, U., Ahrenfeldt, J., Jensen, T.K., Gøbel, B., Bentzen, J.D., Hindsgaul, C. et al. (2006). The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. *Energy*, 31, 1542-1553.
- Heywood, J. *Internal Combustion Engines Fundamentals*. Nueva York: McGraw-Hill, 1988.
- Horttanainen, M., Saastamoinen, J. & Sarkomaa, P. (2002). Operational limits of ignition front propagation against airflow in packed beds of different Wood fuels. *Energy and Fuels*, 16, 676-686.
- Lenis, Y., Agudelo, A.F. & Pérez, J.F. (2013). Analysis of statistical repeatability of a fixed bed downdraft biomass gasification facility. *Applied Thermal Engineering*, 51, 1006-1016.
- Masek, O., Konno, M., Hosokai, S., Sonoyama, N., Norinagak, K. & Hayashi, J. (2008). A study on pyrolytic gasification of coffee grounds and implications to allothermal gasification. *Biomass and Bioenergy*, 32, 78-89.
- Mohan, D., Pittman, C.U. & Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20, 848-889.
- Pérez, J.F. (2009). *Gasificación de biomasa. Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Pérez, J.F., Díaz, O., Obando, R. & Molina, A. (2009). Design methodology of a pilot-scale downdraft fixed bed biomass gasifier (in spanish). *Revista Tecnológicas*, 22, 121-140.
- Quaak, P., Knoef, H. & Stassen, H. (1999). *Energy from Biomass: A review of Combustion and Gasification Technologies*. World Bank Technical Paper N.º 422. Energy Series. 79.
- Shin, D. & Choi, S. (2000). The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. *Combustion and Flame*, 121, 167-180.
- Souza-Santos, M.L. de. (2004). *Solid Fuels Combustion and Gasification. Modeling, simulation and equipment operations*. New York: Marcel Dekker.
- Wu, C.Z., Huang, H., Zheng, S.P. & Yin, X.L. (2002). An economic analysis of biomass gasification and power generation in China. *Bioresource Technology*, 83, 65-70.
- Zainal, Z.A., Rifau, A., Quadir, G.A. & Seetharamu, K.N. (2002). Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 23, 283-289.

4.- PROTOCOLO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA (EXPERIMENTOS Y VALIDACIÓN)

OBJETIVO

En esta unidad se ilustra al estudiante sobre el procedimiento para el estudio experimental del proceso de gasificación. Se brinda una noción ilustrada del equipamiento de laboratorio así como las principales fórmulas para el cálculo de los parámetros experimentales que son la base para la caracterización del proceso para las especies de interés y el tipo de partícula utilizado

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE LAS MADERAS

El estudio de la velocidad del frente de llama bajo gasificación en lecho fijo equicorriente se ha convertido en uno de los métodos experimental es más económicos y efectivos para el diseño de gasificadores a escala piloto e industrial, ya que permite estudiar el proceso de gasificación o combustión en lecho fijo de diferentes combustibles sólidos. Esta metodología posibilita evaluar el efecto de distintos factores controlables en el proceso termoquímico, como el tipo de biomasa y su contenido de humedad,

el flujo de aire y la geometría del reactor, entre otros, con el fin de establecer los parámetros de diseño adecuados para las dimensiones globales de los gasificadores (Pérez *et al.*). En la literatura consultada se presentan varios estudios, cuyo objetivo principal es caracterizar el proceso de gasificación mediante investigaciones experimentales en plantas piloto y a escala de laboratorio. Varios autores se ocupan del efecto de las variables de entrada en los principales parámetros de salida, como la composición, el poder calorífico del gas y la eficiencia del proceso. Una forma de caracterizar el proceso de gasificación a escala de laboratorio es mediante un lecho fijo equicorriente invertido a escala (Figura 1). El reactor consta de un tubo de acero inoxidable, aislado con una capa de lana de roca; tiene un diámetro interno de 100 mm y una longitud de lecho de 500 mm.

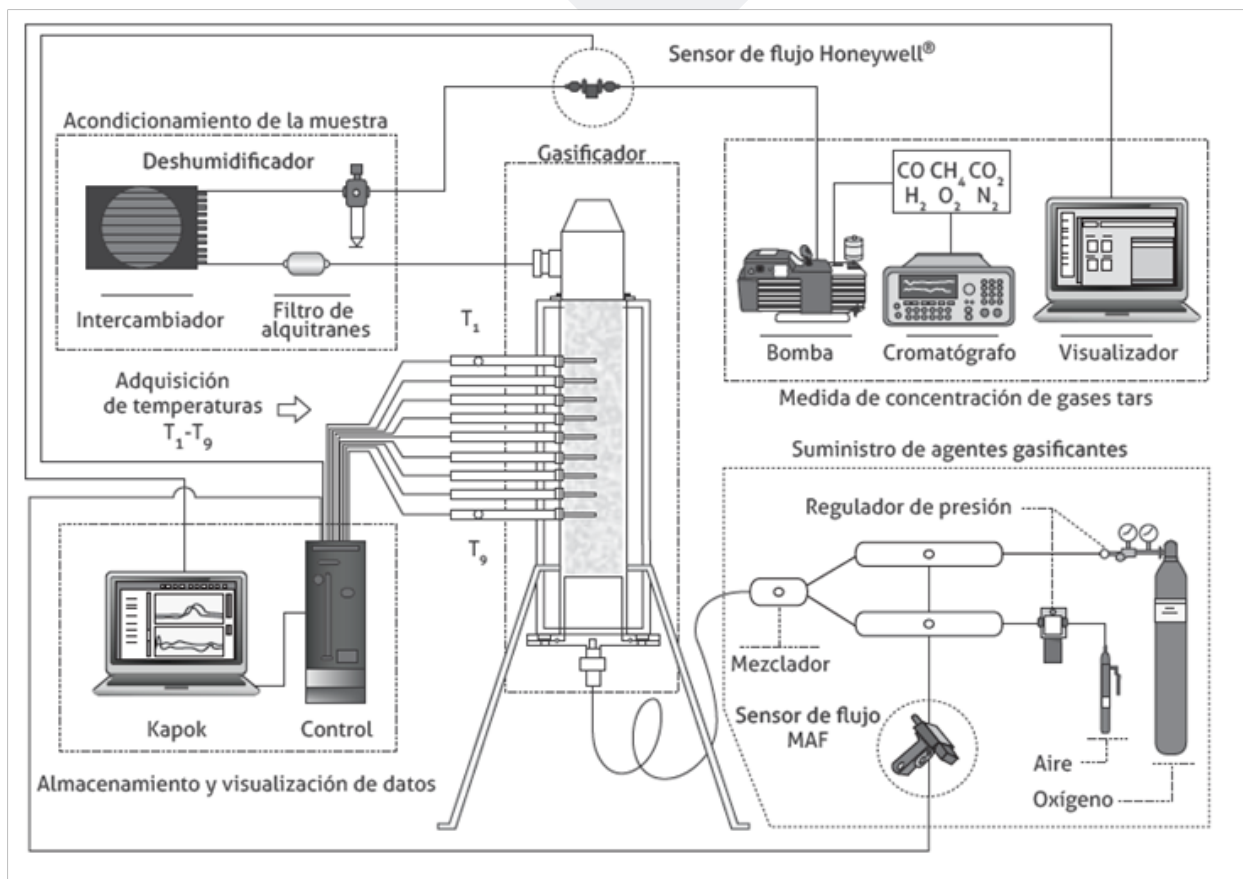


FIGURA 1. DISEÑO BÁSICO DE UN SISTEMA DE LECHO FIJO EQUICORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO.

El flujo de aire es controlado y medido mediante un medidor de flujo (tipo Venturi) Honeywell® AWM5104VN, que se encuentra acoplado a la línea de aire comprimido del laboratorio. Este medidor asegura una cantidad específica de aire, lo que permite lograr alta receptibilidad de las pruebas experimentales. El acondicionamiento del gas de gasificación (remoción de alquitranes y filtrado) posibilita medir la concentración de sus componentes (O_2 , N_2 , CO_2 , CO , H_2 y CH_4) por medio de un cromatógrafo de gases. En este tipo de reactores se comienza ingresando la biomasa y encendiéndola en la parte superior. Simultáneamente, el aire es suministrado por la parte inferior. El frente de llama empieza a descender hasta alcanzar

la parte inferior del gasificador. Las fases del proceso se organizan según la configuración *downdraft*. En el transcurso del experimento (mientras el frente de llama desciende por el gasificador), el perfil de temperatura en el reactor se mide a través de nueve termopares tipo K, instalados con una separación de 30 mm entre sí a lo largo del lecho, y se introducen hasta el centro del gasificador. Para evitar la formación de caminos preferentes, los termopares se retiran durante el proceso de llenado y se van introduciendo gradualmente mientras se llena el gasificador. Este procedimiento se repite durante todas las pruebas. Un campo típico de temperaturas y de flujo de aire de la instalación experimental durante las pruebas de gasificación se muestra en la Figura 2.

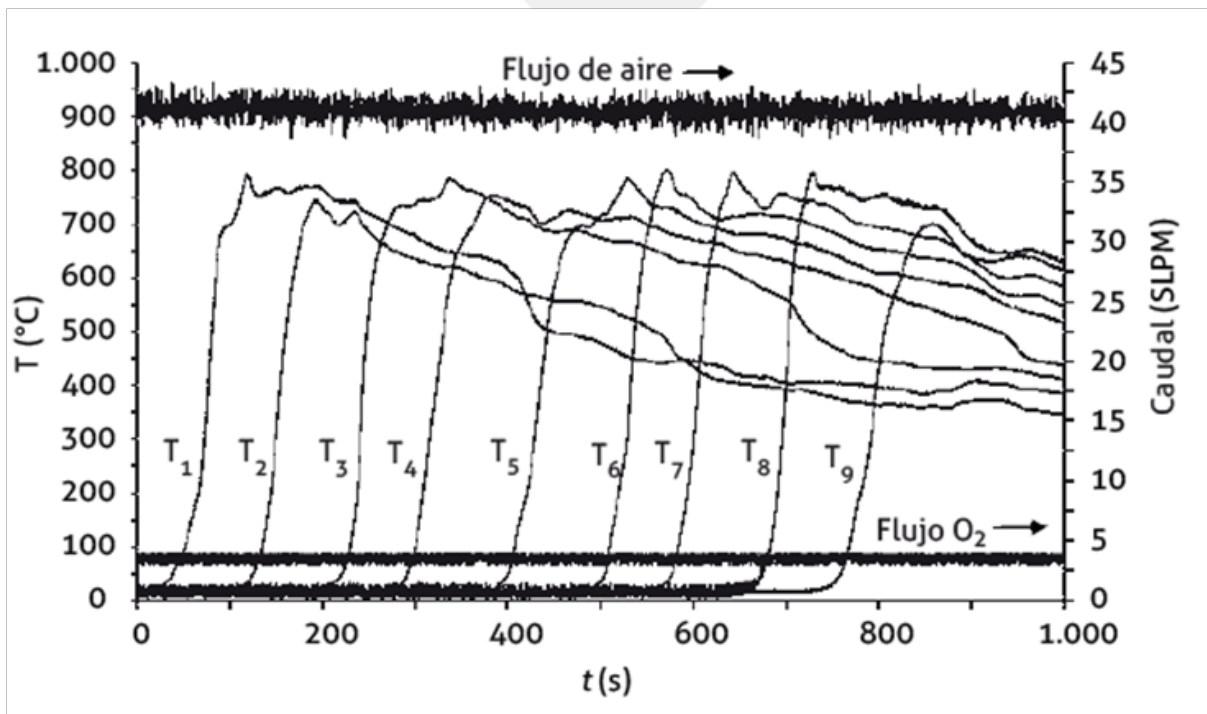


FIGURA 2. CAMPO DE TEMPERATURA Y DE CAUDAL DE FLUJO DE AIRE DURANTE UN EXPERIMENTO.

CÁLCULO DE PARÁMETROS EXPERIMENTALES

Los experimentos en lecho fijo equicorriente permiten calcular parámetros considerados como herramientas empíricas de gran utilidad para el diseño escalado de reactores. Entre esos parámetros están el dosado relativo de gasificación (F_{rg}), la tasa de consumo de biomasa por unidad de área (m_{bms}), la velocidad del frente de llama (V_{ff}), la temperatura máxima alcanzada en el interior del gasificador ($T_{m\acute{a}x}$) y el poder calorífico del gas en función de la composición del gas. Para su cálculo, en el experimento se mide la velocidad superficial del aire (SV, flujo volumétrico de agente gasificante/sección transversal del gasificador), el campo de temperaturas, la composición del gas de gasificación, los análisis último y próximo de la biomasa, el tamaño de partículas y la densidad de la biomasa. Además, la relación combustible/aire (F_{rg}) permite estudiar procesos de combustión con exceso o defecto de combustible. En el Cuadro 1 se describen las ecuaciones que relacionan estos términos. El

F_{rg} se estima mediante la medición del tiempo que cada termopar tarda en alcanzar los 300 °C, como se describe en las ecuaciones del Cuadro 7. El poder calorífico del gas se calcula mediante la concentración de las especies principales; el rendimiento energético resulta de la ecuación de la eficiencia energética gas frío (%).

CUADRO 7. BASE DE FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS EXPERIMENTALES.

Parámetro	Relación matemática
Relación combustible / aire (-)	$F_{rg} = \frac{\dot{m}_{bms} / \dot{m}_{air}}{F_{stq}}$
Poder calorífico inferior (b. s.) (kJ / Nm ³ o kJ / kg)	$PCI_{pg} = \sum_j X_j \times PCI_j$ $\therefore j = CO, CH_4, H_2$
Eficiencia energética gas frío (%)	$\eta_{cold-gas} = \left(\frac{E_{gp}}{E_{bms}} \right)$

donde:


$$E_{gp} = a(\bar{h}_{ff,CO}^0 - \bar{h}_{f,CO_2}^0) + c(\bar{h}_{f,H_2O}^0) + d(\bar{h}_{ff,CH_4}^0 - \bar{h}_{f,CO_2}^0 - \bar{h}_{f,H_2O}^0)$$

$$E_{bms} = PCI_{m,bms} M_{bms}$$

$$a = \frac{\%CO}{\%CO + \%CO_2 + \%CH_4}, \quad c = \frac{\%H_2}{\%CO + \%CO_2 + \%CH_4}, \quad d = \frac{\%CH_4}{\%CO + \%CO_2 + \%CH_4}$$

BIBLIOGRAFÍA

- Dasappa, S., Paul, P.J., Mukunda, H.S. & Shrinivasa, U. (1998). Wood-char gasification: Experiments and analysis on single particles and packed beds. Symposium (International) on Combustion, 27, 1335-1342.
- Henriksen, U., Ahrenfeldt, J., Jensen, T.K., Gøbel, B., Bentzen, J.D., Hindsgaul, C. et al. (2006). The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. Energy, 31, 1542-1553.
- Melgar, A., Pérez, J.F. & Horrillo, A. (2009). Biomass gasification process in a downdraft fixed bed gasifier: a real time diagnosis model based on gas composition analysis. Revista Facultad de Ingeniería, 49, 9-18.
- Pérez, J.F., Díaz, O., Obando, R. & Molina, A. (2009). Design methodology of a pilot-scale downdraft fixed bed biomass gasifier (in spanish). Revista Tecnológicas, 22, 121-140.
- Tinaut, F.V., Melgar, A., Pérez, J.F. & Díez, A. (2005). Analysis of parameters influencing biomass gasification by means of a small scale fixed bed gasifier. En 14th European Biomass Conference and Exhibition. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, París. 124. Tinaut, F., Melgar, A., Pérez, J.F. & Horrillo,
- Tinaut, F., Melgar, A., Pérez, J.F. & Horrillo, A. (2008). Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study. Fuel Processing Technology, 89, 1076-1089.



*Los recursos de la
tierra bastan para
todos, pero no para
la exigencia de los
consumidores.*

Mahatma Gandhi

5.-USO DE SECADORAS SOLARES

OBJETIVO

En esta unidad se estudiará la biomasa como un recurso energético renovable de gran potencial, ya que permite obtener combustibles en fases sólida, líquida y gaseosa, cuyas tecnologías de combustión están ampliamente desarrolladas a partir de los combustibles fósiles. El objetivo es que el estudiante comprenda los procesos más importantes de transformación termoquímica de la biomasa y las características más sobresalientes de las escalas de las tecnologías de transformación y sus usos.

INTRODUCCIÓN

El secado de leña y especialmente astillas que tradicionalmente se lleva a cabo en la región centroamericana es al aire libre. Este tipo de secado tiene la gran desventaja de que logra bajar los contenidos de humedad entre 18 y 24%, dependiendo de la región geográfica donde se realice el proceso de secado. Estos valores no son los óptimos para trabajar los biocombustibles sólidos que luego serán transformados en energía, pues por lo general existen problemas ocasionados por el contenido de humedad y la densificación de la biomasa, entre otros. La otra opción que existe es la de utilizar hornos o estructuras de mayor tamaño alimentadas por calor de los mismos procesos de transformación de la biomasa, pero este sistema sólo está disponible en otras

latitudes con escalas de operación mucho mayores, debido a su alto costo de inversión y de operación. La tecnología intermedia entre el secado al aire libre y el secado en horno convencional, es el uso de secadoras solares. La inversión inicial en la construcción de este tipo de secadoras no es muy alta y los diseños y modelos no son complejos de construir ni de operar; se puede obtener material seco más rápidamente y con contenidos de humedad óptimos para el producto acabado. Se ha comprobado en Honduras y México, el uso de secadoras solares desde hace más de 15 años, esta tecnología es de bajo costo, muy accesible a los pequeños y medianos productores, tienen un bajo consumo de energía convencional, requieren de un mantenimiento básico y sencillo y no generan contaminación ambiental.

LAS SECADORAS SOLARES

Las secadoras solares son cámaras que tienen la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La idea es que el calor que se genera sea útil en el proceso de secado de la madera. Las cámaras de secado tienen dos partes fundamentales: la primera se ubica en la parte superior de la cámara y es la responsable de que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de la madera que se requiere secar (Figura 1).

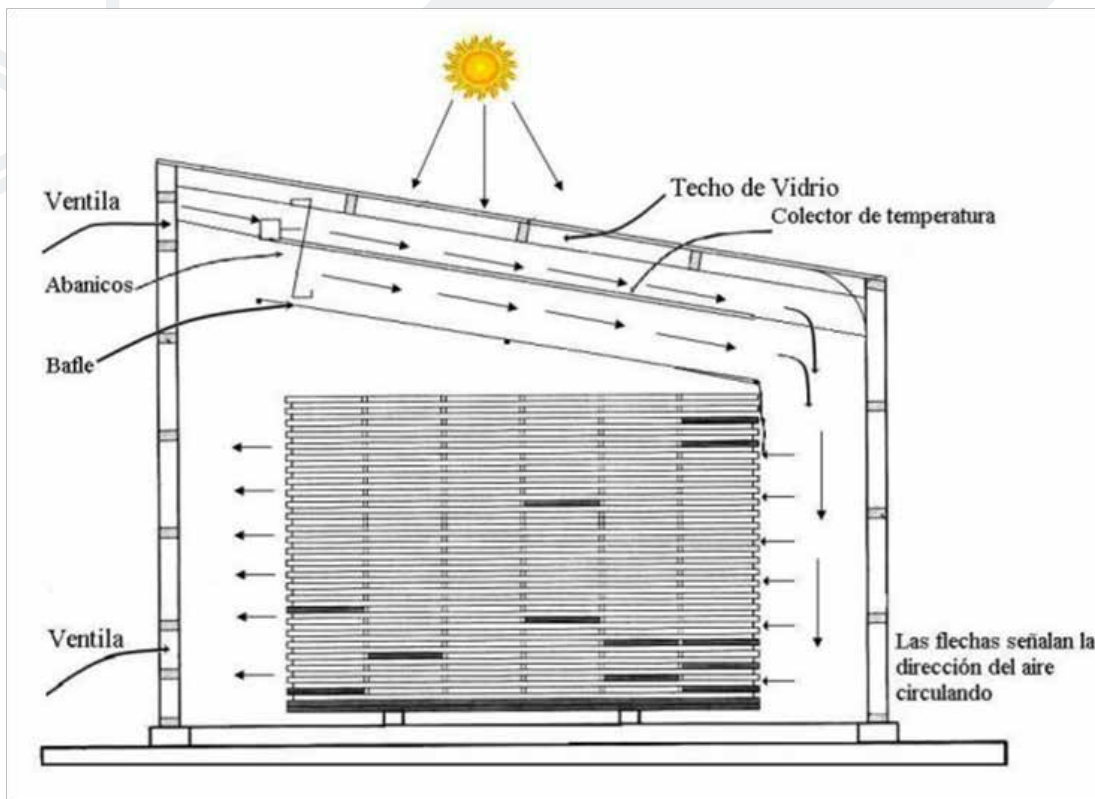


FIGURA 1. PRINCIPIO GENERAL DE UN SECADOR SOLAR PARA MADERA.

El principio de funcionamiento de una secadora solar es simple. Una vez que el aire se calienta a lo interno de la secadora, ese aire se pone a circular entre la madera gracias a un sistema de ventiladores. La masa de aire caliente se hace circular continuamente a través de la madera con el fin de que esta se caliente. Al elevar la temperatura el material empieza a liberar el agua que contiene y por ende se seca. Esto permite que la madera descienda sus contenidos de humedad a los niveles deseados, según sean las necesidades de la industria. Las secadoras solares a pesar de que son muy simples en cuanto a diseño y funcionamiento, permiten y a la vez requieren de algún grado de control de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa. Esto es posible gracias a la instalación de ventanas o ventilas que permitan intercambiar el aire húmedo de la cámara por aire más seco del exterior de la cámara.

POSICIÓN DE LA SECADORA

La posición de un secador solar depende de la incidencia de los rayos solares. Por ello, en primera instancia deben orientarse de norte a sur, para el caso de Honduras, pues el país se ubica en el Hemisferio Norte. La caída o inclinación del techo, en el caso de Honduras, debe ser hacia el sur, de tal forma que se asegure la incidencia de los rayos solares lo más perpendicularmente posible, a lo largo del año. El grado de inclinación va a corresponder con la latitud del país. Una inclinación cercana al 10% permite que la variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares en las diferentes épocas del año, no afecte la eficiencia en la captación de la energía sobre el techo y el colector de la secadora (Figura 2).

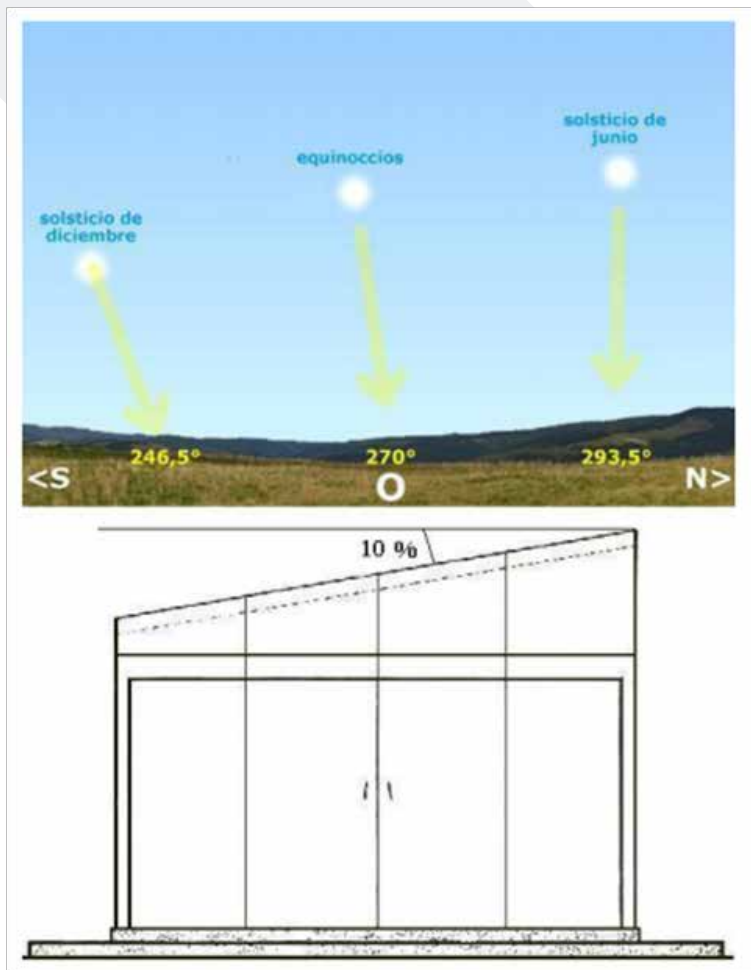


FIGURA 2. POSICIÓN DE LA SECADORA SOLAR E INCLINACIÓN CON RESPECTO A LA INCIDENCIA DE LOS RAYOS SOLARES

** Los detalles de construcción, costos y diagramas de funcionamiento vienen en un manual específico.*

BIBLIOGRAFÍA

- Benítez, R.; Calderón, A. (1993). Secador solar para madera. Tegucigalpa, HO, CEMAPIF - CUPROFOR. 23 p.
- Forest Products (1992, Nancy, FR). Proceedings of All Division. Nancy, FR, IUFRO. p. 497-507.
- Helwa, N. 2004. Experimental evaluation of solar kiln for drying wood. *Drying Technology* 22(4):703-717.
- Martínez-Pinillos, E. (1997). Diseño y ensayo de una secadora solar para madera. *Madera y Bosques* 3(2):13- 28.
- Simpson, W.T. (1992). Drying technology issues in tropical countries. Conference. In IUFRO (International Union of Forestry Research Organisations).

6.- PROCESOS TERMOQUÍMICOS

OBJETIVO

En esta unidad se estudiará la biomasa como un recurso energético renovable de gran potencial, ya que permite obtener combustibles en fases sólida, líquida y gaseosa, cuyas tecnologías de combustión están ampliamente desarrolladas a partir de los combustibles fósiles. El objetivo es que el estudiante comprenda los procesos más importantes de transformación termoquímica de la biomasa y las características más sobresalientes de las escalas de las tecnologías de transformación y sus usos.

LOS PRINCIPALES PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Los principales procesos termoquímicos aplicados a la biomasa para su valorización energética son: la combustión, gasificación y pirólisis (Cuadro 8). Existe un cuarto proceso denominado licuefacción que consiste en la conversión de la biomasa en un hidrocarburo líquido. Según las opciones descritas, la biomasa puede ser quemada directamente para la obtención de gases calientes y generación de energía térmica (mediante el intercambio del calor de los gases de combustión con agua), y/o energía eléctrica (sobrecalentando el agua hasta llegar a vapor, y mediante la expansión del gas en una turbina, se obtiene movimiento generando electricidad).

CUADRO 8. PROCESOS, PRODUCTOS Y APLICACIONES DE LA BIOMASA MEDIANTE PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Proceso	Producto	Aplicaciones	
Combustión	Gases calientes de escape	Caldera/máquina de vapor	Calefacción, proceso de calor Agua caliente, Electricidad/calor
Gasificación	Gas combustible	Caldera, Motor de gas, turbina de gas, celda de combustible	Calor Electricidad/calor
	Gas de síntesis	Gas natural sintético Combustible líquido de motor	Calor Transporte
Pirólisis	Gas combustible	Motor	Electricidad/calor
	Líquidos Carbón (combustible sólido)	Caldera Motor	Electricidad/calor Transporte

La gasificación y la pirólisis se basan en la obtención de gases y líquidos que pueden ser quemados obteniendo los mismos productos que en la combustión directa de la biomasa. La gasificación implica la implantación de otras tecnologías que aprovechan la cinética y propiedades físicas del gas obtenido (motor de gas) antes de ser quemado en plantas de ciclo combinado, y la generación de gases para la síntesis de nuevos productos de interés en la industria química. En la pirólisis, las fracciones obtenidas son tratadas por separado, en algunos casos quemando parte de los productos para la obtención de energía que será usada en el mismo proceso, o para la venta de la fracción líquida como combustible.

EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

La combustión se basa en la transformación de la energía intrínseca de la materia para la generación de energía térmica a través de la oxidación total del combustible con un agente oxidante (oxígeno contenido en el aire). Las principales reacciones de oxidación dadas en la combustión son las siguientes:



En la reacción de oxidación de la biomasa, la energía intrínseca de la materia es transmitida a los gases y partículas generados en forma de energía térmica. La cantidad de energía producida en la combustión varía en función de la composición y propiedades físicas del combustible, y se ve reducida proporcionalmente al grado de humedad.

APLICACIONES PRINCIPALES DE LA COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA

Las principales aplicaciones basadas en la combustión de biomasa son las siguientes:

- **Aplicaciones de aprovechamiento térmico:** El gas resultante de la combustión circula a través de un intercambiador de calor, permitiendo la transferencia de energía calorífica del gas al agua circulante de la caldera. El resultado es la generación de agua caliente para usos de consumo humano y/o usos sanitarios y/o para calefacción.
- **Generación de electricidad:** Parte de la generación de vapor a elevada temperatura y presión a partir del contacto del gas de combustión con tubos de agua circulante. En la turbina, la expansión del vapor a través de las hélices genera energía mecánica. El movimiento circular acciona un alternador que genera la corriente eléctrica.
- **Cogeneración:** La cogeneración se basa en la generación de energía térmica y eléctrica a partir de un mismo combustible. El proceso se basa en el aprovechamiento térmico del gas exhausto procedente de una turbina de vapor. La energía térmica es obtenida a partir de un condensador del vapor exhausto de la turbina o del agua caliente generada en un intercambiador de calor. La cogeneración con biomasa es presente en aplicaciones industriales como la industria de la pulpa y del papel, la del contrachapado y agroindustrias. El agua caliente producida también tiene usos para consumo sanitario o para calefacción residencial.

Según la aplicación deseada de la combustión y la magnitud en el aprovechamiento energético (potencia del sistema de generación

de energía), se distinguen diversas escalas por las que la tecnología diverge en configuración y magnitud. Para el análisis de la tecnología de la combustión se han distinguido tres escalas según la potencia instalada:

Pequeña escala (5-500 kW): Incluye desde hogares domésticos hasta calderas para el suministro de agua caliente o calor a escala residencial y comunitaria. Se caracterizan por:

- Producción de energía térmica en estufas y hogares a partir de la combustión de biomasa en una parrilla fija plana, con propagación del calor desde la fuente generadora mediante aire.
 - Incorporación de intercambiadores de calor (sistema caldera) (Figura 1) en los sistemas de más elevadas potencia ($\geq 15\text{kW}$) para la producción de agua caliente con fines de calefacción residencial y consumo sanitario.
 - Control de la entrada de aire mediante respiraderos o rendijas en los sistemas de menor potencia. Para mayores potencias, el control es automático.
 - Eliminación de las cenizas manual, excepto en los sistemas que incorporan una entrada automática de combustible (pellets y astillas) donde la ceniza es arrastrada y recogida en un cenicero.
 - Instalación de silos o cámaras de almacenado de combustible en calderas domésticas de elevada potencia con la finalidad de garantizar una operación continua a lo largo de días o semanas. El combustible de biomasa es transportado desde el silo hasta la caldera mediante un transportador sinfín (pellets y astillas).
- Las tecnologías de combustión de pequeña escala no incorporan sistemas de limpieza de gases. Solamente son instalados tubos de evacuación de humos con acceso al exterior del recinto donde es instalado el sistema de combustión.



FIGURA 1. CALDERAS DE BIOMASA PARA CALEFACCIÓN DE EDIFICIOS (1) CALDERA DE 14,9 KW, (2) CALDERA <500KW

CUADRO 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE PEQUEÑA ESCALA

Tipología de horno	Potencia	Tipo de energía	Entrada combustible	Retirada de ceniza
Hornos de palos y briquetas				
Hogares	3 – 5 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Estufas	3 – 8 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Estufas de cerámica	8 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Calderas	15 kW	Agua caliente	Manual	Automática
Hornos para astillas	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Automática	Automática
Hornos para pelets	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Automática	Automática
Hornos para palos y pelets	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Manual/automática	Automática

Mediana escala (500 kW a 5 MW): Incluye calderas para el suministro residencial, de edificios y/o pequeños distritos, dependiendo de la potencia instalada. La energía producida es térmica y/o eléctrica, según el equipo instalado. Para potencias superiores a 1MW, se suelen instalar turbinas de gas o vapor para la generación de electricidad. El suministro de biomasa de origen forestal implica un alcance regional. Se caracteriza por lo siguiente:

- Consumo de astillas de madera en la totalidad de experiencias debido a su menor coste en relación a los pellets.
- Operación del hogar a partir de una parrilla fija plana, inclinada o escalonada, con aportación de la biomasa mediante un transportador sinfín tanto por la parte superior, como inferior u horizontal respecto a la parrilla.
- Producción de energía térmica en las experiencias de menor potencia para la calefacción de edificios. También se instalan sistemas de cogeneración. Las eficiencias de conversión energética son variables en función de la tecnología instalada.
- Instalación necesaria de silos, tanques o cámaras de almacenado que aporten combustible continuamente a la caldera. Las dimensiones de éstos varían en función de la potencia y eficiencia de conversión del sistema instalado.
- Instalación de ciclones o pequeños multiciclones para la eliminación de partículas de los gases de combustión. A medida que aumenta la potencia instalada, se requieren sistemas de separación de partículas más eficientes y de mayor magnitud debido al elevado volumen de gas de combustión generado. En estos casos, se instalan sistemas combinados como ciclones o multiciclones juntamente con filtros de mangas o precipitadores electrostáticos.
- En algunas experiencias europeas son presentes sistemas de quema de “pacas” de paja o “Cigar burning” para potencias de 1 - 2 MWth.

La Figura 2 muestra los diversos tipos de hogares utilizados en la combustión de mediana escala. La Figura 3 identifica las pérdidas energéticas en la generación de electricidad y calor, a partir de un horno de parrilla con astillas de madera.

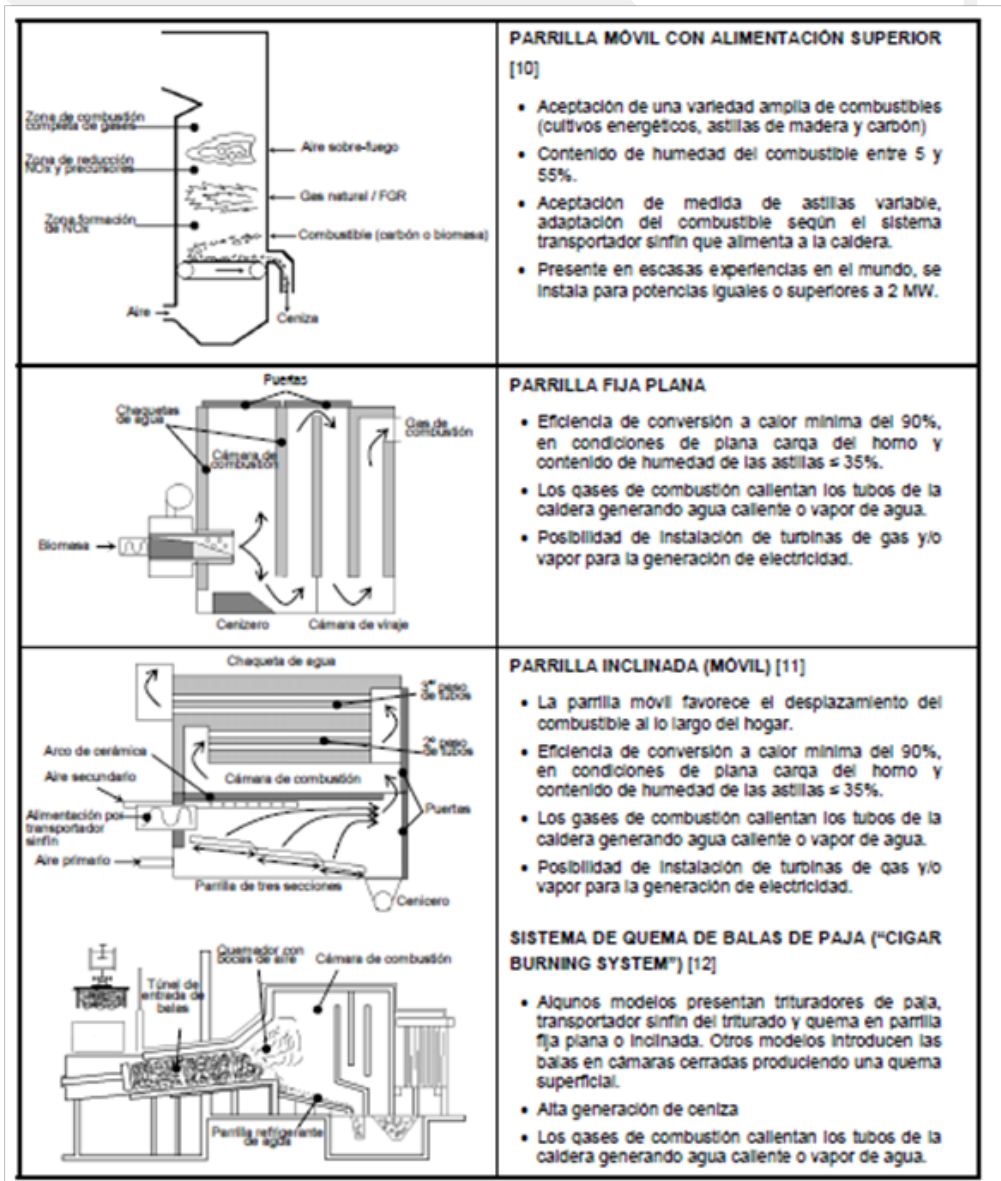


FIGURA 2. TIPOS DE HOGARES Y QUEMADORES DE PARRILLA EN LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE MEDIANA ESCALA.

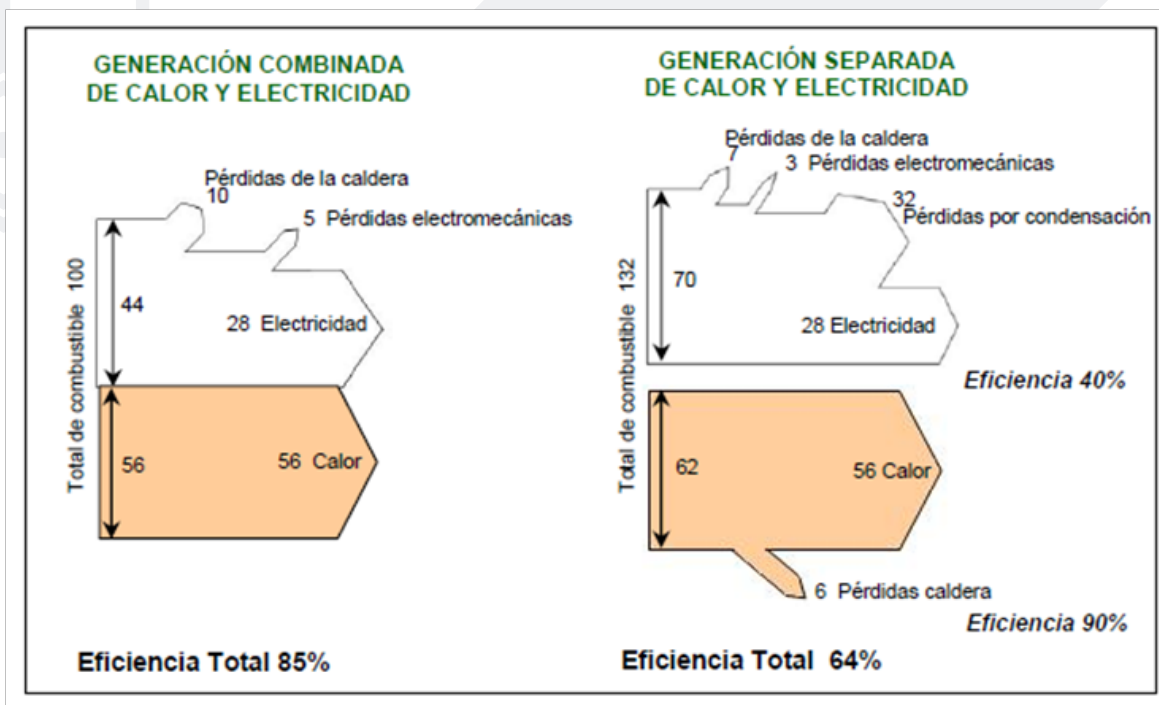
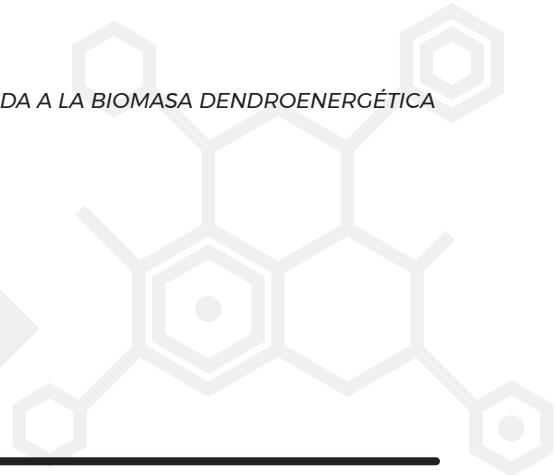


FIGURA 3. BALANCE DE ENERGÍA EN LA GENERACIÓN TÉRMICA/ELÉCTRICA A PARTIR DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA


Gran escala (> 5MW): Son plantas orientadas a la generación de energía eléctrica, que pueden suministrar energía térmica cubriendo la demanda calorífica del territorio (hoteles, restaurantes, polígonos industriales). Se caracterizan por:

- Similitud en características a los sistemas de mediana escala. Aumento de dimensiones y complejidad técnica de los componentes, necesidad de combustible de biomasa y volumen de gases y cenizas generados.
- Generación energía térmica y eléctrica combinadamente mediante turbinas de vapor (eficiencia media 85-88%), o solamente eléctrica cuando mayor es la potencia instalada (eficiencia media 25-30%)
- Combustión compatible de diversos combustibles de biomasa en un mismo horno (astillas de madera, residuos vegetales, etc.) La limitación en la operación de la caldera se haya en el contenido de humedad global del combustible o combustibles consumidos en el horno.
- Requerimiento de sistemas de limpieza de gases con elevados rendimientos de la separación de partículas. Se suelen usar sistemas combinados de filtros (multiciclón + precipitador electrostático, filtro de mangas + precipitador).

LITERATURA RECOMENDADA



- Bhattacharya S.C. (1998), State of the Art of Biomass Combustion. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. Vol. 20 (2), pp. 113-115.
- CIEMAT (2001). Tecnologías energéticas e impacto ambiental. Ed. Mc Graw-Hill/ Interamericana de España, S.A.U. Madrid.
- Ortiz, M. (1995). La briqueta: Energía del Residuo Industria. Ingeniería Química. Vol. 27 (312) pp. 147-153.
- European Commission (1998). Biomass conversion technologies, achievement and prospects for heat and power generation. European Commission Directorate-General Science, Research and Development. 1998. Bruselas.
- Marcos, F (2001). Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid.
- Remade Scotland (2003), The Recycling of Waste Wood by Thermal Conversion. [En línea] Disponible en: http://www.remade.org.uk/media/13263/biofuelsreport_march2003.pdf
- Richarson J. et al. (2002), Bioenergy from Sustainable Forestry. Guiding Principles and Practice. Forestry Sciences, Vol. 71. Kluwer Academic Pub. Dordrecht.



*El hombre es la
única criatura
que consume sin
producir.*

George Orwell

7.-ESTUDIOS DEL EFECTO DE DIFERENTES FACTORES (ESPACIAMIENTOS, ESPECIES, EDADES Y SITIOS). PRUEBAS DE LABORATORIO APLICABLE A LA BIOMASA SEGÚN NORMAS ESTANDARIZADAS

OBJETIVO

En esta unidad se propone el abordaje metodológico básico para el estudio de los efectos de las plantaciones dendroenergéticas en las propiedades tecnológicas y especialmente la transformación de la biomasa en energía mediante el proceso de gasificación. El objetivo es que el estudiante comprenda la metodología a seguir bajo un diseño experimental y utilizando los protocolos de análisis y validación de los datos.

ESTADO DE SITUACIÓN

La demanda de energía a nivel mundial crece rápidamente. Los altos precios de los combustibles fósiles combinados con el incremento de los problemas ambientales, intensificados por el cambio climático, han obligado a crear políticas a nivel mundial para apoyar fuentes alternativas de energía renovable, las cuales contribuyen a cerca del 19% del consumo de la energía total del planeta, cuya mitad es suplida por la biomasa (Kullander, 2009; Hauk et al., 2014).

La biomasa es una de las fuentes energéticas más prometedoras ya que es una alternativa a las fuentes convencionales de energía tales como petróleo y el gas natural. Entre las ventajas que tiene el uso de la biomasa está principalmente que es un producto limpio y renovable, lo cual contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la dependencia de los combustibles fósiles (Luque et al. 2008). En este sentido la búsqueda de biomasa provenientes de los cultivos agrícolas o de residuos forestales ha tomado un importante desarrollo en los últimos años (Gokcol et al. 2009).

Sin embargo, para manipular esta biomasa se requiere de un gran consumo energético, lo que se traduce en un limitante para su utilización (Stelte et al. 2011). Su alto

contenido de humedad, sus formas y tamaños irregulares, y su baja densidad aparente, hacen de la biomasa un material difícil de transportar, almacenar y utilizar en su forma original (Kaliyan and Morey 2009). Estos factores hacen que el uso de la biomasa para la producción de energía sea ineficiente, por lo que es necesario mejorar su eficiencia energética por medio de procesos como la gasificación.

La gasificación es un proceso de oxidación parcial termo químico en el que la biomasa es convertida en gas en presencia de un agente gasificante (aire, vapor, oxígeno, CO_2 o una mezcla de éstos). El gas generado, comúnmente conocido como syngas (gas de síntesis), se compone principalmente de H_2 , CO , CO_2 , N_2 , pequeñas partículas de carbón, cenizas y aceites (Ruiz et al. 2013). La gasificación ha demostrado ser una opción exitosa para la gestión de residuos, la producción química y la producción de energía a partir de residuos (Kumar and Sheth 2015).

La gasificación se plantea como una tecnología viable para dar tratamiento a los residuos orgánicos procedentes del sector industrial y agrícola con el fin de generar energía renovable. Sin embargo, no todos los tipos de biomasa pueden ser utilizados en el proceso de gasificación (Plis and Wilk 2011). Por ejemplo, algunos biocombustibles como la cascarilla de la avena presenta resultados insatisfactorios durante el proceso de gasificación, produciendo syngas con un poder calórico muy bajo (Plis and Wilk 2011). Es necesario evaluar características específicas de la biomasa como el porcentaje de humedad, densidad real y aparente, poder calórico y porcentaje y tipo de cenizas (Ruiz et al. 2013).

En la actualidad existe la necesidad de investigaciones más detalladas sobre la caracterización de la biomasa que puede ser utilizada con fines energéticos. El comportamiento o rendimiento del proceso de gasificación va a depender entre varias cosas de factores como la temperatura, el agente gasificante y el contenido de

humedad y el tamaño de partícula de la biomasa (Vassilev et al. 2012). Algunos estudios señalan el tamaño de partícula como un factor determinante dentro del proceso de gasificado, al respecto Zou et al. (2012) determinaron que a nivel experimental tamaños de partícula menores a 2 mm no poseen influencia en la composición del gas producido. Pérez et al. (2012) desarrollaron un experimento con un reactor downdraft y determinaron que la biomasa se comporta de forma diferente de acuerdo con su tamaño, ellos observaron que el aumentar el tamaño de la partícula se traduce en un menor radio de consumo de la biomasa y lo tanto en una menor eficiencia del proceso, y concluyeron que tamaños de partículas en el rango de 2 a 6 mm son los óptimos.

En Costa Rica al igual que Honduras, la utilización de la biomasa en procesos de gasificación es un tema que se está empezando a desarrollar, en la actualidad solo existen muy pocos gasificadores de biomasa en la región centroamericana. En Costa se cuenta con dos gasificadores, uno se encuentra en operación utilizando biomasa proveniente de astillas de *Cupressus lusitanica* (Ciprés) y broza de café y el otro utiliza astillas de *Gmelina arborea*. Sin embargo, no existe información científica sobre las características de esta biomasa o del proceso en sí.

La biomasa proveniente de madera, presenta grandes ventajas sobre otras fuentes de energía renovable como por ejemplo mejores propiedades energéticas y una menor emisión de CO₂ en comparación con la biomasa proveniente de pastos o algunos cultivos agrícolas (Tenorio et al., 2015). Sin embargo, el aumento en la demanda de la biomasa maderable ha conducido a la explotación de los recursos forestales naturales (FAO, 2012), y en este sentido, el establecimiento de plantaciones energéticas para la producción de biomasa maderable ha aumentado a nivel mundial (Evans et al., 2010; Liu et al., 2014).

En el establecimiento de las plantaciones maderables energéticas de corta rotación en climas templados se destacan los géneros *Populus*, *Salix*, *Eucalyptus*, *Pinus* y sus respectivos híbridos (DeBell et al., 1996; Dickmann, 2006; Hinchee et al., 2009). Sin embargo, el desarrollo de cultivos de corta rotación para la producción de biomasa maderable es muy limitado en las regiones tropicales, a excepción de Brasil, que presenta los primeros cultivos de este tipo utilizados en plantaciones energéticas (Le Maire et al., 2014; Betters et al., 1991). En Costa Rica, recientemente se han establecido plantaciones energéticas de corta rotación (Navarro-Camacho et al., 2014, Tenorio et al. 2016). Dentro de las especies utilizadas *Gmelina arborea* ha ganado popularidad. No obstante hasta el día de hoy es limitada la información de la especie en cultivos energéticos de corta rotación, a pesar de que existe información sobre su potencial energético (Moya y Tenorio 2013; Tenorio et al. 2015).

Ante la limitada información científica sobre las características de la biomasa obtenida de plantaciones energéticas maderables y sobre el comportamiento de dicha biomasa durante procesos de gasificado, es necesario ilustrar el proceso de investigación para generar información científica con biomasa proveniente de plantaciones energéticas y conocer su comportamiento en diferentes edades (0.5 y 1 año de edad) en el proceso de gasificación.

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

En el cuadro 10 se muestran los aspectos principales de un abordaje metodológico para cumplir con el objetivo de aumentar la eficiencia energética de biomasa proveniente de plantaciones energéticas mediante el proceso de gasificación.

CUADRO 10. OBJETIVOS, PRODUCTOS Y ACTIVIDADES DENTRO DE UN PROCESO DE INVESTIGACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA DE PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS

Objetivo Específico	Productos	Actividades
<p>Determinar la productividad de una plantación energética utilizando clones o material genético superior bajo tres densidades de siembra</p>	<p>Plantación energética establecida con clones o material genético superior y bajo tres densidades</p> <p>Turno de rotación de la plantación energética</p>	<p>Establecer la plantación energética con clones o material genético superior y bajo tres densidades de siembra (10000, 15000 y 20000 n/ha).</p>
<p>Determinar las propiedades físicas, energéticas y de biomasa provenientes de las plantaciones energéticas</p>	<p>Tabla con las propiedades físicas, energéticas y de biomasa por cada densidad de plantación y clon utilizado</p> <p>Publicación en revista indexada</p>	<p>Realizar el muestreo semestral de la plantación energética.</p> <p>Determinar las propiedades físicas (diámetro, altura, densidad y peso específico) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo</p> <p>Determinar las propiedades energéticas (poder calórico, cenizas, volátiles y contenido de humedad) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo</p> <p>Determinar la biomasa (ton/ha de biomasa en fuste, ramas, corteza y hojas, producción energética</p> <p>GJ/ton/ha de biomasa en fuste y ramas) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo</p> <p>Preparación de artículo científico</p>

CONTINUACIÓN DEL CUADRO 10

<p>Determinar la eficiencia del proceso de gasificado y la composición del syngas producido</p>	<p>Tabla con los porcentajes de eficiencia y la composición del syngas del proceso de gasificado por densidad y muestreo</p> <p>Publicación en revista indexada</p>	<p>Realizar el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación</p> <p>Determinar los porcentajes de eficiencia durante el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación</p> <p>Determinar la composición del syngas producido durante el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación</p> <p>Preparación de artículo científico</p>
---	---	--

Objetivo específico 1: Determinar la productividad de una plantación energética utilizando clones o material genético superior bajo tres densidades de siembra.

ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA:

Se establecerá una plantación energética bajo tres densidades de siembra de 10000, 15000 y 20000 árboles por hectárea con clones o material genético superior. Se seleccionan estas densidades debido a que en estudios previos (*Tenorio et al. 2016*) se muestra que las mejores densidades de plantación se encuentran entre 10.000 y 15.000 árboles/hectárea. La plantación será establecida en un sitio representativo y muy cercano donde se encuentre instalado el gasificador. Para el establecimiento y mantenimiento de la plantación se contará con la ayuda del personal de la universidad. La plantación será dividida en 18 unidades de muestreo (3 densidades x 2 clones o procedencias x 3 repeticiones) con un área por parcela de 160 m². La selección de los clones o material genético superior se realiza siguiendo los intereses de la universidad, buscando el material que ha tenido mejor desempeño en relación a la producción de volumen y mayor densidad.

DETERMINACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD

La productividad será evaluada considerando la producción de biomasa por unidad de superficie, toneladas por hectárea. Así mismo la evaluación de este parámetro se llevará a cabo cada 6 meses en un período total de 1.5 años. En cada unidad experimental serán muestreados cinco árboles (2 clones o procedencias x 3 espaciamientos x 3 bloques x 5 árboles = 90 árboles), a los cuales se les determinará su diámetro, altura y la biomasa contenida en las diferentes partes del árbol (hojas, ramas y fuste). La determinación de estas variables se realizará siguiendo el procedimiento detallado por *Tenorio et al.* (2016). Luego estos parámetros serán proyectados para calcular la biomasa por hectárea para cada tipo de densidad de plantación y material genético.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los valores de biomasa determinados en el muestreo, serán utilizados para establecer la densidad y material genético con las mejores características para la producción de biomasa. Así mismo con esta información será posible establecer cuáles son los valores energéticos en relación a la producción de calor (MJ/ha), detallado en la metodología del objetivo específico 2, y a la producción de syngas que será detallado en la metodología del objetivo específico 3.

Objetivo específico 2: Determinar las propiedades físicas, químicas y de biomasa provenientes de las plantaciones energéticas

MUESTREO DE ÁRBOLES EN LA PLANTACIÓN Y MUESTREO EN EL ÁRBOL:

De cada unidad de muestreo será extraída una muestra de las diferentes partes del árbol (hojas, ramas y fuste). En el caso del fuste

serán extraídas seis secciones transversales de 10 cm de largo en tres diferentes alturas: dos muestras en la base del árbol, dos muestras en la altura total y dos muestras al 50% de la altura total. Todo el material de las diferentes partes será molido para realizar las diferentes determinaciones.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, PESO ESPECÍFICO Y DENSIDAD VERDE:

Para el cálculo del contenido de humedad (MC) de las hojas, ramas y fuste se utilizará la norma ASTM D-4442 (ASTM, 2007). Y para la determinación del peso específico en el fuste, se utilizará la norma ASTM D-143 (ASTM, 2014).

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS:

El material granulado del fuste (madera y corteza) será utilizado en la determinación de las características químicas de porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N, así mismo el análisis de los macro y micro elementos contenidos en la biomasa, se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos de la universidad. Las características energéticas de poder calórico, porcentaje de cenizas y porcentaje de volátiles también serán determinados. El poder calórico se determinará usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM, 2004), el porcentaje de cenizas se llevará a cabo siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D 1102 (ASTM, 2013c) y para el porcentaje de volátiles se seguirá la norma ASTM D1762 (ASTM, 2013d).

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las distintas propiedades detalladas anteriormente se realizarán para cada densidad y material genético, de forma que permita establecer cuál será la densidad y el material genético con las mejores condiciones de biomasa para producir calor o bien en el proceso de gasificado detallado a continuación.

Objetivo específico 3: Determinar la eficiencia del proceso de gasificado y la composición del syngas producido

MUESTREO Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL

De cada uno de los muestreos semestrales de la plantación serán cosechados en condición seca de cada densidad y material genético utilizado, aproximadamente 40 kilos de madera para ser utilizados en el proceso de gasificado.

El material cosechado en condición verde será astillado. El tamaño de la astilla debe ser de 2-3 cm ancho, 1 cm de espesor y 5-6 cm de largo. Estas astillas deben ser secadas a 12% de contenido de humedad. El astillado y el secado se realizará en los equipos existentes la universidad.

EQUIPO DE PRUEBA DE GASIFICACIÓN

SE UTILIZARÁ EL EQUIPO QUE DISPONE LA UNIVERSIDAD

PRUEBA DE GASIFICACIÓN

De cada muestreo realizado (semestral) y para cada densidad de plantación se llevarán a cabo dos corridas de producción de gas en el gasificador, con una duración de al menos 1 hora en cada prueba. En esta prueba los variables que se medirán son: (i) Cantidad de material consumido por hora, (ii) variación de temperatura en el lecho fluidizado y salida de gas, (iii) flujo de gas y (iv) gas producido. Así mismo es necesario medir los diferentes componentes del gas luego de la gasificación, emisiones de CO, CO₂, H₂, CH₄ y N₂, principalmente.

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

La información recolectada durante las pruebas y la información química de la biomasa detallada en el objetivo específico 2 permitirá determinar el índice de equivalencia de la biomasa (syngas producido/biomasa de entrada), índice de eficiencia (relacionada a tipo de biomasa). En la determinación de estos parámetros se seguirá el procedimiento detallado en Sharma y Sheth (2016) y Singh y Sekhar (2015).

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. (2014). D143-14. Standard test method for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2007). D4442-07. Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013a). D1110-84. Standard test methods for water solubility of wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013b). D1107-96. Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2004). D5865-04. Standard test method for gross calorific value of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013c). D1102-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013d). D1762-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- Betters, D.R., Wright, L.L., Couto, L., (1991). Short rotation woody crop plantations in Brazil and the United States. *Biomass Bioenergy*. 1(6), 305-316.
- DeBell, D. S., Clendenen, G. W., Harrington, C. A., Zasada, J.C., (1996). Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass Bioenergy*. 11(4), 253-269.
- Dickmann, D.L., (2006). Silviculture and biology of short rotation woody crops in temperate regions: then and now. *Biomass Bioenergy*. 30, 696-705.
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., (2010). Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 14, 1419-1427.
- FAO, State of the world's forests, (2012), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2012.

- Gokcol, C., Dursunb, B., Alboyaci, B. and Sunan, E. (2009). "Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey," *Energy Policy* 37, 424-431.
- Hauk, S., Knoke, T., Wittkopf, S., (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 29, 435-448.
- Hinchee, M., Rottmann, W., Mullinax, L., Zhang, C., Chang, S., Cunningham, M., Nehra, N., (2009). Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* 45(6), 619-629.
- Kaliyan, N. and Morey, R.V. (2009). "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass Bioenergy* 33, 337-359.
- Kullander, S., (2009). Energy from biomass. *Eur Phys J Spec Top.* 176, 115-125.
- Kumar, T; Sheth, P. (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier. A state of the art review. *Renewable and sustainable energy reviews.* 50: 583-593.
- Le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R. A., Hakamada, R., (2014). Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sens. Environ.* 152, 136-149.
- Liu, Y., Xu, Y., Zhang, F., Yun, J., Shen, Z., (2014). The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. *Chin. Sci. Bull.* 59(34), 4639-4651.
- Luque, R., Herrero-Davila, L., Campelo, J.M., Clark, J.H., Hidalgo, J.M., Luna, D., Marinasa, J.M. and Romero, A.A. (2008). "Biofuels: a technological perspective," *Energy Environ. Sci.* 1, 542-564.
- Moya, R., Tenorio, C., (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass Bioenergy.* 56, 14-21
- Navarro-Camacho, R., Esquivel-Segura, E., Briceño-Elizondo, E., Arias-Aguilar, D., (2014). Estimating aboveground biomass for *Eucalyptus saligna* Sm. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehn in the center region of Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú.* 11(27), 22-33.
- Perez JF, Melgar A, Benjumea PN. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: an experimental study. *Fuel.* 96:487-96.
- Plis P, Wilk RK. (2011). Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier. *Energy.* 36:3838-45.
- Ruiz, JA; Juárez, MC; Morales, MP; Muñoz, P; Mendivil. MA. 2013. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and sustainable energy reviews.* 18: 174-183.

- Singh, V. C. J., & Sekhar, S. J. (2015). Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock. *Applied Thermal Engineering* 97: 22-27
- Sharma, S., & Sheth, P. N. (2016). Air-steam biomass gasification: Experiments, modeling and simulation. *Energy Conversion and Management*, 110, 307-318.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Ahrenfeldt, J., Shang, L. and Henriksen, U.B. (2011a). "Pelletizing properties of torrefied spruce," *Biomass Bioenergy* 35, 4690-4698.
- Tenorio, C; Moya, R; Tomazello Filho, M; Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1): 482-498.
- Tenorio, C; Moya, R; Arias-Aguilar, E; Briceño-Elizondo, E. (2016). Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica. *Industrial Crops and Products*. 82: 63-73.
- Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, Morgan TJ. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. 94:1-33.
- Zou W, Song C, Xu S, Lu C, Tursun Y. Biomass gasification in an external circulating countercurrent moving bed gasifier. *Fuel*, Available on-line June 2012 10.1016/j.fuel.2012.06.061

SUBPRODUCTOS INDUSTRIALIZABLES A PARTIR DE LA BIOMASA FORESTAL: PELLETS Y BRIQUETAS

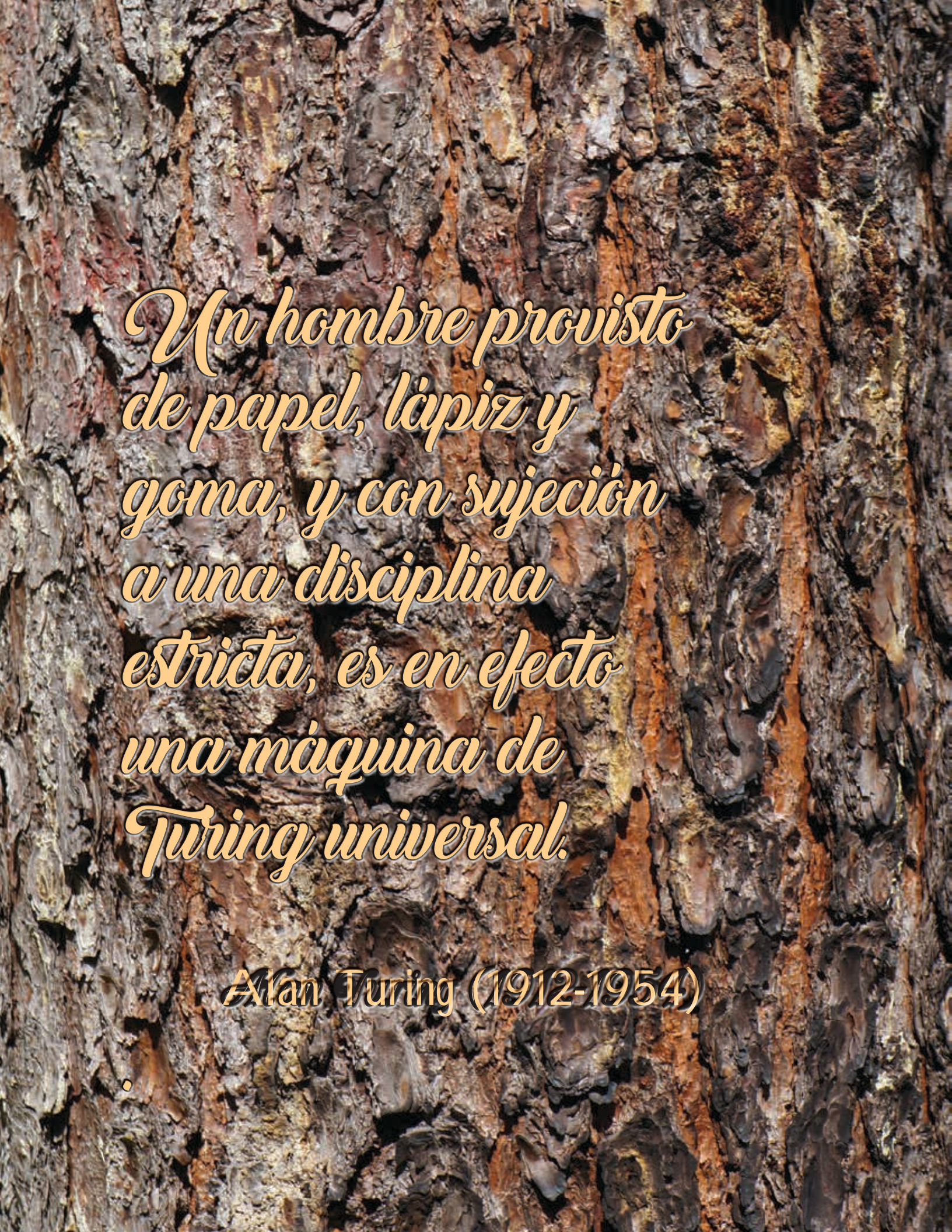
AUTOR:

DR. DAGOBERTO ARIAS AGUILAR, pH. D.
*COORDINADOR DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
DENDROENERGÍA, TECNOLÓGICO DE COSTA RICA*

RECONOCIMIENTO TÉCNICO:

CÉSAR AUGUSTO ALVARADO
FARAH MARCELA GIRÓN

DICIEMBRE 2017



*Un hombre provisto
de papel, lápiz y
goma, y con sujeción
a una disciplina
estricta, es en efecto
una máquina de
Turing universal.*

Alan Turing (1912-1954)

UNIDAD 2

INTRODUCCIÓN

La biomasa lignocelulósica como recurso material o bioenergético varía principalmente según especie, condiciones ambientales que influyen en su producción y dispersión en los espacios geográficos productivos. La estimación de la disponibilidad y aptitud de este recurso es hoy en día crucial para el desarrollo sostenible del sector agroforestal y agroindustrial y, en concreto, de la cadena de valor bosque-industria-consumidores. Debido a la dispersión de esta fuente de materia prima en el territorio y a los altos costos logísticos que ello implica, el desarrollo de sistemas de valor con base en la biomasa de origen forestal y/o agrícola pasa por el desarrollo de sistemas de gestión y valorización integral de estos recursos a nivel local, bien para aprovechamiento como materia prima para la industria o como fuente de bioenergía.

Cobra especial importancia el inventario más actualizado sobre el estado de la producción de biomasa considerando todos los residuos agroindustriales y forestales. En Costa Rica por ejemplo, el último diagnóstico nacional sobre la biomasa, se realizó en el año 2006. Según la “Encuesta sobre oferta y consumo energético nacional a partir de biomasa en Costa Rica”, realizada en el 2006, los residuos biomásicos generados en el país poseen un contenido de energía de 60,354 TJ con lo que sería posible generar casi 635 MW de electricidad durante todo el año; sin embargo, el 40.3% de estos residuos no son utilizados.

Las fuentes de biomasa con mayor potencial energético son los residuos de las cosechas de piña y de caña de azúcar (12,781 TJ y 11,002 TJ, respectivamente) con los que podrían generarse más de 440 MW. En la actualidad, los residuos de la caña son utilizados en la generación de electricidad, y los residuos de la piña siguen en espera de una solución tecnológica por su alto contenido de humedad y la falta de una solución mecanizada para recoger los residuos en el campo. Los residuos derivados de animales así como los desechos de frutas, efluentes y lodos obtenidos de las actividades agropecuarias de Costa Rica podrían utilizarse para generar 205 millones de m³ de biogás al año. La crianza de pollos y el procesamiento de frutas son las actividades con mayor potencial de aprovechamiento para la obtención de biogás. La (Figura 1) muestra el potencial de generación en MW hace 10 años, donde no se consideraba por ejemplo el aporte del sector forestal a través del aprovechamiento de los residuos de las cosechas de madera y de los aclareos.

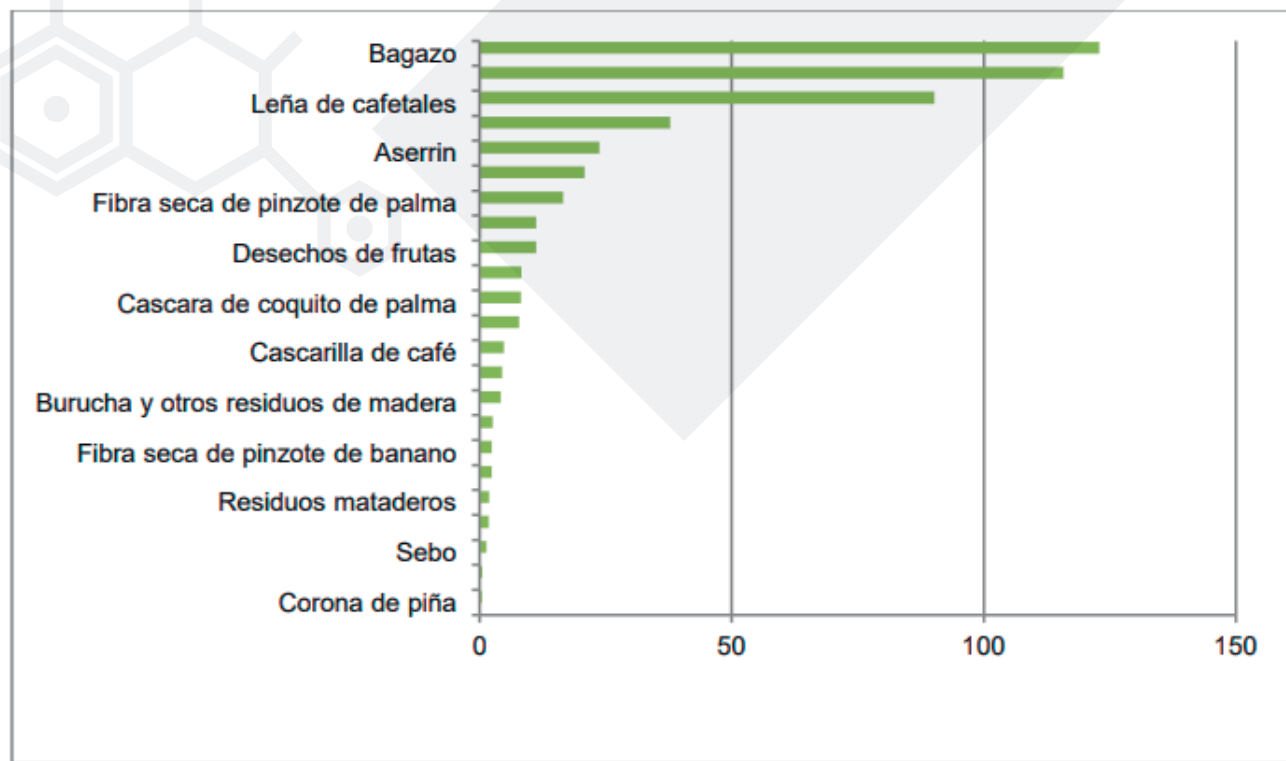


FIGURA 1. OFERTA DE PRODUCCIÓN DE RESIDUOS DE LAS ACTIVIDADES AGROPECUARIAS Y FORESTALES EN COSTA RICA LA 2006

Por otra parte, la utilización de la biomasa en Honduras presenta escenarios similares en cuanto al potencial de generación de energía (Figura 2), con estadísticas al 2008

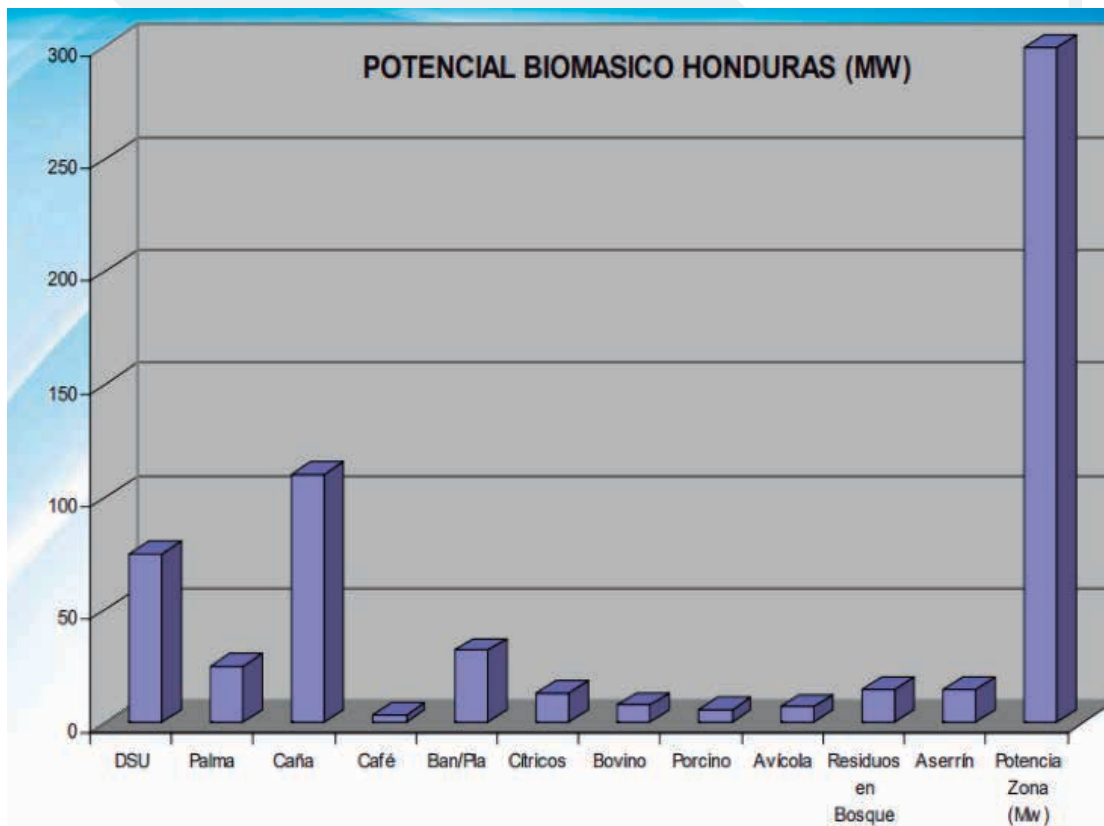


FIGURA 2. POTENCIAL BIOMÁSICO EN HONDURAS. FUENTE: SERNA/DGE -DESARROLLO ENERGÉTICO DEL SUBSECTOR BIOMÁSICO DE HONDURAS, 2009/S. AGUERO

Tomando en cuenta estos escenarios de disponibilidad de recursos biomásicos, se tienen en los países de la región, grandes posibilidades para su uso. Los proyectos de biodigestión a mayor escala ya son una realidad en Costa Rica. Con el uso de estos procesos se han logrado importantes avances tales como:

Con la implementación de los sistemas de biogás, las unidades de producción obtienen diferentes beneficios económicos y ambientales, tales como:

- Producción de energía limpia: eléctrica y térmica.
- Sustitución de hidrocarburos (diesel y búnker).
- Sustitución de energía eléctrica.
- Reducción de la facturación eléctrica e hidrocarburos.
- Producción de fertilizante sólido y foliar.
- Sustitución de fertilizante sintético y mejora de la microbiología del suelo.
- Manejo de los residuos orgánicos.
- Mejora salud ambiental del entorno.
- Mejoras en los parámetros del vertido.
- Control de olores.

El sector forestal tiene una enorme contribución también en el uso de residuos y biomasa plantada mediante las plantaciones dendroenergéticas, pero ¿qué hace falta? Los residuos forestales tienen la gran ventaja que se trata de biomasa seca o sea el contenido de humedad es muy favorable o bien se tiene que invertir menos energía para alcanzar contenidos de humedad óptimos para su transformación. Hace falta generar un nuevo vector energético basado en los biocombustibles sólidos, logrando mayor valor agregado al uso tradicional de la leña y llevando un nuevo desarrollo basado en las astillas y aún mejor en los pellets y las briquetas. Disponiendo de este biocombustible de calidad y estandarizado, se reactivarán nuevos procesos de transformación con el uso de calderas y gasificadores que alcancen mayores eficiencias.

1.- ¿PORQUÉ LA BIOMASA CONSTITUYE UN BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO?

En esta sección hablaremos de la biomasa dentro del ámbito de las energías renovables, como la materia orgánica de origen natural reciente que sirve para la generación de electricidad, calor, biocombustibles, procesos de calefacción, materias primas para la industria química, compostaje y otras aplicaciones.

Cuando nos referimos a la biomasa como un recurso, se define como “materia orgánica de origen biológico reciente” (San Miguel y Gutiérrez, 2015). Este concepto nos sirve para determinar la primera caracterización importante de la biomasa y es su origen natural u orgánico. Incluye los productos de origen animal, vegetal o microbiano. También la materia orgánica presente en las aguas residuales y la basura que producimos.

Además de la biomasa natural, existe la biomasa residual producto de las actividades humanas, como la agricultura, la ganadería y la industria, entre otras. También pueden ser usados los excedentes de cosechas y hasta se pueden desarrollar cultivos energéticos, de plantas sembradas con el fin específico de producir energía.

Algunos ejemplos de biomasa para la generación de energía de amplio uso en la actualidad son las especies de árboles de rápido crecimiento, cereales, aceites vegetales y residuos agrícolas, como en el caso de la broza del café, cascarilla de arroz, residuos de piña y banano, podas de cítricos, coquito de la palma y la caña de azúcar.

Los combustibles fósiles y las materias derivadas de estos, como los plásticos y otros productos sintéticos, no pueden ser incluidos dentro de la caracterización de la biomasa, principalmente porque carecen de un carácter renovable.

Al hablar de la biomasa en el contexto energético, ésta se incluye dentro de las fuentes de energía de carácter renovable, ya que su contenido energético proviene a final de cuentas de

la energía solar que es fijada por las plantas en el proceso fotosintético y acumulada en las moléculas orgánicas que conforman la biomasa.

Esta biomasa la podemos transformar en biocombustibles por diferentes procesos, para una gran variedad de aplicaciones. Los combustibles que se producen se dividen en sólidos, líquidos y gaseosos, según su estado físico (Figura 3).

Los biocombustibles pueden ser usados como biocarburantes para vehículos de transporte, en la generación de electricidad mediante variados procesos, para la calefacción mediante su combustión y hasta para la industria química.

<p>FUENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biomasa natural • Biomasa residual <ul style="list-style-type: none"> • Agrícola • Forestal • Ganadera • Industrial • Urbana • Excedentes de cosechas • Cultivos energéticos 	<p>BIOCOMBUSTIBLES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sólidos • Líquidos (Biocarburantes) • Gaseosos
<p>PROCESOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mecánicos • Termoquímicos • Biotecnológicos • Extractivos 	<p>APLICACIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combustión • Motores (de explosión y combustión interna) • Materias primas industria química <p>SECTORES DE USO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calefacción doméstica • Calor para usos industriales • Electricidad • Transporte • Industrias químicas

FIGURA 3. CAMPOS QUE ABARCA EL ÁREA DE BIOMASA. LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS ESTÁN FORMADOS POR CINCO ELEMENTOS, CADA UNO DE ELLOS TOMADO DE LOS CINCO CAMPOS QUE ABARCA EL ÁREA DE LA BIOMASA. CADA CAMPO ES UN CONJUNTO HETEROGÉNEO DE ELEMENTOS.

ORIGEN SOLAR DE LA ENERGÍA PRESENTE EN LA BIOMASA

La biomasa la podemos incluir dentro de las energías renovables dentro de un tipo de energía solar de aprovechamiento directo. El origen energético de la biomasa proviene de la fotosíntesis, que sirve para transformar la energía solar a energía química, que luego es acumulada en las moléculas orgánicas que componen la biomasa.

El proceso fotosintético es muy complejo y ocurre en los cloroplastos, que son unos orgánulos localizados en el interior de las células de las hojas y partes verdes de los vegetales. En este proceso los vegetales captan el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico y, utilizando el agua (H_2O) y la energía solar, lo transforman en compuestos orgánicos, según la siguiente ecuación general:



Este proceso, que además es altamente eficiente en la captación y almacenamiento de energía, tiene la ventaja adicional de que fija el carbono del ambiente y libera oxígeno.

Después, en el proceso de producción de energía, a la biomasa se le suma oxígeno en determinados procesos de combustión, con lo que se obtiene por resultado la liberación del dióxido de carbono y de la energía fijada. El CO_2 tomado de la atmósfera y retenido en las partes vegetales es nuevamente liberado al ambiente.

LAS PLANTAS COMO ACUMULADORES Y CAPTADORES DE ENERGÍA SOLAR

- Producen los semiconductores (moléculas de clorofila) que pueden actuar como captadores de los fotones solares.
- Producen sus propios paneles solares captadores de la radiación solar (hojas) y disponen de sistemas de orientación de éstos.
- Utilizan el agua como fuentes de electrones para reponer los electrones cedidos por la clorofila para reducir el CO_2 .
- Utilizan la transpiración para disipar el exceso de calor producido por el componente térmico de la radiación solar.
- Transforman la energía solar en energía química, que puede ser utilizada para fines energéticos o como materia prima.
- Producen su propio acumulador de energía (biomasa) que puede llegar a durar decenas o centenares de años.

PRINCIPALES VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE

VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS

A nivel general, la gestión de los recursos biomásicos agroforestales y su aprovechamiento energético juega un triple y positivo papel:

- i. Se trata de un combustible no fósil, neutro desde el punto de vista del ciclo natural del carbono, por lo que las emisiones de CO_2 que se producen, al proceder de un carbono fijado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto contribuye de forma activa a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero
- ii. Su valorización y uso como energía térmica y/o eléctrica reduce las emisiones globales de CO_2 siempre que sustituya a otros combustibles fósiles (IPCC, 1996).
- iii. Su gestión y aprovechamiento sostenible así como el aprovechamiento energético está íntimamente ligado al territorio forestal, por lo que contribuye de forma directa al desarrollo socioeconómico de un sector clave para la economía sostenible en el medio rural. La creación de tejido empresarial en municipios y zonas rurales puede dinamizar la economía rural.
- iv. Genera un mayor valor a productos actualmente desechados (restos de podas, descopes, aprovechamiento final, mantenimiento de rondas cortafuegos, tratamientos silvícolas fitosanitarios), rentabilizando tareas y trabajos necesarios para el cuidado del bosque y cultivos agrícolas leñosos.
- v. Mejora las condiciones de los bosques y cultivos agrícolas leñosos en cuanto a la prevención frente a incendios forestales.
- vi. Ayuda a la reforestación de zonas sin cobertura, aumentando así la cantidad de CO_2 absorbida.
- vii. Parte de las tierras agrícolas abandonadas se pueden rehabilitar como cultivos dendroenergéticos como complemento a la biomasa derivada de los trabajos forestales.
- viii. La biomasa tiene un contenido en azufre prácticamente nulo. Por este motivo, las emisiones de dióxido de azufre (SO_2), que junto con los óxidos de nitrógeno (NO_x) son las causantes del denominado efecto de la lluvia ácida, son despreciables en los procesos de transformación de biomasa agroforestal en energía térmica y/o eléctrica.
- ix. El aumento de generación de energía térmica y/o eléctrica a partir de residuos agroforestales contribuye a elevar la producción de energías renovables, lo que conlleva una menor dependencia de la importación de combustibles fósiles. Este aspecto es muy importante para países altamente dependientes de los hidrocarburos.

INCONVENIENTES MEDIOAMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICOS

- i. Dispersión del recurso en el espacio, lo que incide de forma decisiva en los costos logísticos y en la planificación del aprovisionamiento.
- ii. Es necesaria una mayor cantidad de biomasa que de combustible fósil para conseguir la misma cantidad de energía, lo que hace necesario también mayor espacio para su almacenamiento.
- iii. Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los rendimientos de las calderas que utilizan combustibles fósiles. Además, sus sistemas de alimentación de combustible y de eliminación de partículas de los gases de escape son más complejos.

ASPECTOS CLAVES PARA FAVORECER UN VECTOR ENERGÉTICO BASADO EN LA BIOMASA FORESTAL

A continuación se identifican los siguientes aspectos clave que necesitan de soluciones prácticas para poder favorecer en el futuro el desarrollo sostenible de la cadena de valor de la bioenergía de base agroforestal en la región centroamericana:

- i. A nivel de planificación, los ministerios responsables deberían definir planes zonales, con el fin de identificar zonas prioritarias de desarrollo de sistemas de valor bosque-energía. En estas zonas, las administraciones forestales deben favorecer el desarrollo de proyectos de ordenación forestal orientados a biomasa, sobre todo en zonas donde la propiedad forestal sea importante y futura base de aprovisionamiento a las posibles plantas de generación energética.
- ii. A nivel operativo, hay que disponer de estudios sobre el sistema de aprovechamiento regular basado en un mínimo de toneladas de biomasa por año y garantizando núcleos de producción en una zona con un radio de no más de 20-25 Km. por un período mínimo de 20 años. Sólo con estas premisas resueltas, inversores privados pueden afrontar el reto de lanzar el proyecto de planta energética. Esto se debe anclar en planes de aprovechamiento biomásico derivados de proyectos de ordenación forestal de los bosques y plantaciones.
- iii. Asimismo, el propietario privado debe ser favorecido por la Administración Forestal del Estado para extraer de manera sostenible la biomasa forestal residual de sus bosques. Para crear un mercado estable de biomasa forestal residual sería conveniente establecer un incentivo o compensación a la producción de biomasa con plantaciones dendroenergéticas que estimule el aprovechamiento por parte de los propietarios forestales para ponerlo en el mercado a unos precios competitivos. Este incentivo a la producción estaría basado en criterios de sostenibilidad para evitar impactos negativos sobre el ambiente.
- iv. Para poder garantizar la eficacia, eficiencia y competitividad de los trabajos forestales para la extracción de los productos biomásicos, las empresas forestales de la zona deben aplicar o desarrollar métodos avanzados de trabajo forestal según tipo de masa o estrato forestal (aclareos, podas y cortas finales) y de aprovechamiento (integral, árbol completo o mixto por descope) mediante sistemas de mecanización y astillado apropiados.

- v. Los operadores logísticos de la zona – que pueden coincidir con las empresas de trabajos forestales o no -, deben desarrollar sistemas avanzados de logística entre el bosque y la planta de procesamiento y transformación. Centrales de clasificación cualitativa y dimensional de la astilla, sistemas mecánicos de carga y descarga en camión o sistemas denominados “multilift” de astillas deben contribuir a optimizar el precio de la astilla en planta, que no debe exceder el costo de equilibrio financiero al porcentaje de humedad requerido o poder calorífico establecido.
- vi. Las plantas de generación eléctrica con biomasa necesitan de instalaciones básicas en zonas industriales, así como un punto de evacuación de la energía eléctrica producida. La energía térmica producida deber ser también aprovechada, lo que no siempre resulta sencillo en zonas rurales. Las posibilidades de valorización a escala local pasan por infraestructuras instaladas para empresas colindantes o, incluso, a una línea paralela de producción de biocombustibles sólidos (pellets o briquetas).
- vii. El uso de biocombustibles de base forestal (astillas, pellets, briquetas) debe ser favorecido en las zonas forestales, no sólo por su eficiencia energética y sostenibilidad, sino también por el efecto para potenciar su uso y consumo. Para ello se debe potenciar el desarrollo de mezclas óptimas para pellets según el tipo de biomasa forestal. También se debe potenciar la demanda en base a instalación de calderas a nivel de empresas agroindustriales, hospitales e instituciones que tengan calderas, fundamentalmente en las zonas donde se instale la planta.
- viii. A mediano y largo plazo, la biomasa extraída del bosque debería ser complementada con astilla proveniente de cultivos dendroenergéticos. Ello conllevaría un efecto doble: por una parte la posibilidad de ampliar la producción de la planta y por la otra la puesta en valor de tierras agrícolas abandonadas y el consiguiente desarrollo integral del sistema agro-forestal en zonas rurales.

2.-TRANSFORMACIÓN FÍSICA DE LA BIOMASA COMO COMBUSTIBLE

EL ASTILLADO

El astillado de la biomasa se basa en la trituración de la materia para la obtención de fragmentos (entre 2 y 10 cm de longitud). El producto final, la astilla, es la que se utiliza en la totalidad de procesos de transformación energética de biomasa de media y gran envergadura. Se caracteriza por tener una forma plana o cilíndrica, predominando la longitud (3 - 10 cm) y la amplitud (2 - 6 cm) sobre el grosor (<2 cm). La densidad aparente es baja (250 - 350 kg/m³) en relación a otros combustibles como el carbón y los pellets de madera.

La trituración de la biomasa, a diferencia de otros procesos de transformación física, se puede efectuar tanto en el lugar de origen o precedencia de la biomasa (trituración in-situ), como fuera del entorno de origen o en la propia planta de conversión energética (trituración ex-situ).

Las astilladoras se pueden clasificar según el tipo del equipo, mecanismo de astillado, modo de alimentación del material a triturar y salida de la astilla (Cuadro 1). En la (Figura 4) se ilustra el funcionamiento de las astilladoras en el campo.

CUADRO 1. CLASIFICACIÓN DE LAS ASTILLADORAS

Tipo de clasificación	Tipo de astilladoras		
Instalación	Fijas	Montadas	Remolcadas
	Autopropulsadas o autónomas	Móviles	Acopladas
Mecanismo de astillado	Tambor	Disco	Cuchillas
Alimentación/entrada del material	Manual		Mecánica
Salida de la astilla	Por gravedad		Por ventilación



FIGURA 4. ASTILLADORAS EN UN NÚCLEO DE PRODUCCIÓN FORESTAL

EL PELETIZADO

El peletizado se basa en la compresión de la materia vegetal (astillas, aserrín, etc.) mediante la acción de unos rodillos (de 1 a 5 rodillos) contra una matriz de agujeros de entre 0.5 a 2.5 cm de diámetro (Figura 5). Si el material de entrada presenta dimensiones mayores a astillas, se requiere de un proceso de astillado previo al prensado con los rodillos. Una vez formado el pellet, es necesario un proceso de tamizado para la homogeneización del tamaño del producto final.

El pellet es un pequeño cilindro de tamaño variable (20 - 70 cm de longitud; 1.5 cm de amplitud), con una humedad inferior al 12%. La densidad del pellet es relativamente elevada en comparación a las astillas (1000 - 1300 kg/m³). Los factores que influyen en esta densidad son los siguientes:

- El tipo de materia prima prensada. A mayor densidad del material original, mayor es la densidad del pellet.
- La presión ejercida por la prensa, variable según la maquinaria utilizada.

El poder calorífico de los pellets es superior al de la leña, astillas y briquetas. Dependiendo de la densidad y humedad de la biomasa inicial, el producto contendrá un poder calorífico de entre 21-22 MJ/kg.



FIGURA 5. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PELETIZADORA

EL BRIQUETADO

El briquetado consiste en la compresión de la materia vegetal (aserrín, restos de madera, cáscara de arroz, desechos de frutas, hierba, hojas, residuos de cocina, agricultura, residuos forestales, entre otros) superior a 200 MPa hasta producir un aumento de la temperatura del material hasta 100-150 °C. (Figura 6) A temperaturas elevadas la lignina se plastifica permitiendo la formación de unidades compactas.

Una briqueteadora consiste en una tolva de alimentación, un sistema dosificador simple o múltiple de velocidad variable, una cámara de compactación o densificadora, un canal refrigerante y un sistema de corte. La prensa es el componente clave en la producción de briquetas. Se disponen de cuatro tipos de briqueteadoras, utilizadas en función de su aplicación industrial y del tipo de material a comprimir: (a) Prensa de impacto; (b) Prensa de extrusión; (c) Prensa de briqueteado hidráulica o neumática; y (d) Prensa de doble rodillo. La Figura 3 ilustra una briqueteadora de fabricación china.

La característica común de las briquetas es su elevada densidad (1000 - 1300 kg/m³). La forma es normalmente cilíndrica con diámetros comprendidos entre 3 y 20 cm, y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otra forma usual de briqueta es el prisma cuadrado o el prisma hexagonal vacío. También se pueden obtener formas de ladrillo.

La humedad final de la briqueta depende de las características físico-químicas del material que se requiere prensar y de la forma final del producto (8 al 10% de humedad en la salida de la prensa).

Se pueden utilizar para proporcionar calor en las estufas, así como para cocinar. Además de su uso doméstico, se pueden producir entre un grupo de personas en cooperativa, y ser una fuente de ingresos para la comunidad, ya que se venden muy bien.

Propiedades:

- Poseen un alto poder calorífico.
- Muy poca humedad, lo cual favorece el encendido.
- Limpio crea muy poca ceniza.
- Fáciles de almacenar.
- Bajísimo coste de producción.



FIGURA 6. BRIQUETEADORA DE FABRICACIÓN CHINA

EL EMPACADO


El empacado se utiliza en la cosecha de algunos cultivos herbáceos (en su mayoría de cereales) con el objetivo de obtener paquetes comprimidos de materia. Los usos finales de estos paquetes, llamados pacas, son la alimentación ganadera (paja para forraje) o la producción de energía. Las pacas adquieren formas y volúmenes variables en función de la máquina utilizada. Los tipos de empacadoras comúnmente más utilizadas son las siguientes:

- Empacadora convencional. Produce paquetes prismáticos de peso inferior a 40 kg. Se distinguen empacadoras de alta presión, media presión y baja presión.
- Rotoempacadoras. Producen pacas cilíndricas de gran tamaño.
- Empacadoras rectangulares. Producen pacas prismáticas de peso superior a 100 kg.

Las pacas producidas en la cosecha suelen ser agrupadas en el campo para facilitar su secado, recogida y carga al remolque de un camión (Figura 7).



FIGURA 7. MAQUINARIA ENSILADORA DE PASTO PARA ILUSTRAR EL CONCEPTO DE LAS PACAS BIOENERGÉTICAS, PROCESO SIMILAR SE REALIZA CON LOS RESIDUOS DE LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZÚCAR.

A close-up photograph of tree bark, showing a rough, textured surface with various shades of brown, tan, and grey. The bark has a vertical, fissured appearance with small, irregular scales and crevices.

*A los hombres
les encanta
maravillarse.*

*Esto es la semilla de
la ciencia.*

Emerson (1803-1882)

3.- PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS Y BRIQUETAS

La heterogeneidad en la naturaleza y formas de la biomasa primaria hace que sea necesaria la adecuación y estandarización del formato y de las características físicas de la biomasa a las requeridas según la tecnología de conversión de energía posteriormente empleada.

Las tecnologías de preparación física de la biomasa se basan en procesos de densificación/compactación (astillado y la molienda) con el objetivo de homogeneizar las propiedades físicas del material, incrementar la densidad calorífica y estandarizar el formato de la biomasa. Se busca de este modo obtener productos con una mayor densidad (en kg/m^3) y densidad energética (en kcal/m^3), en valores superiores a los residuos originales.

A continuación se detalla el proceso de transformación de la biomasa hasta llegar a pellets y briquetas (Figura 8)

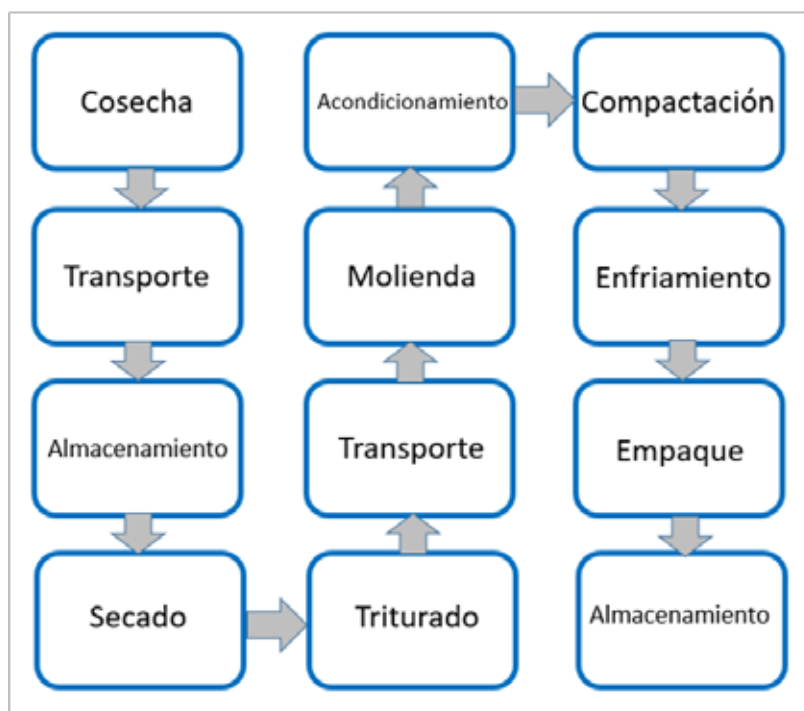


FIGURA 8. ETAPAS A LAS QUE SE COMETE LA MATERIA PRIMA PARA SU TRANSFORMACIÓN EN PELLETS Y BRIQUETAS.

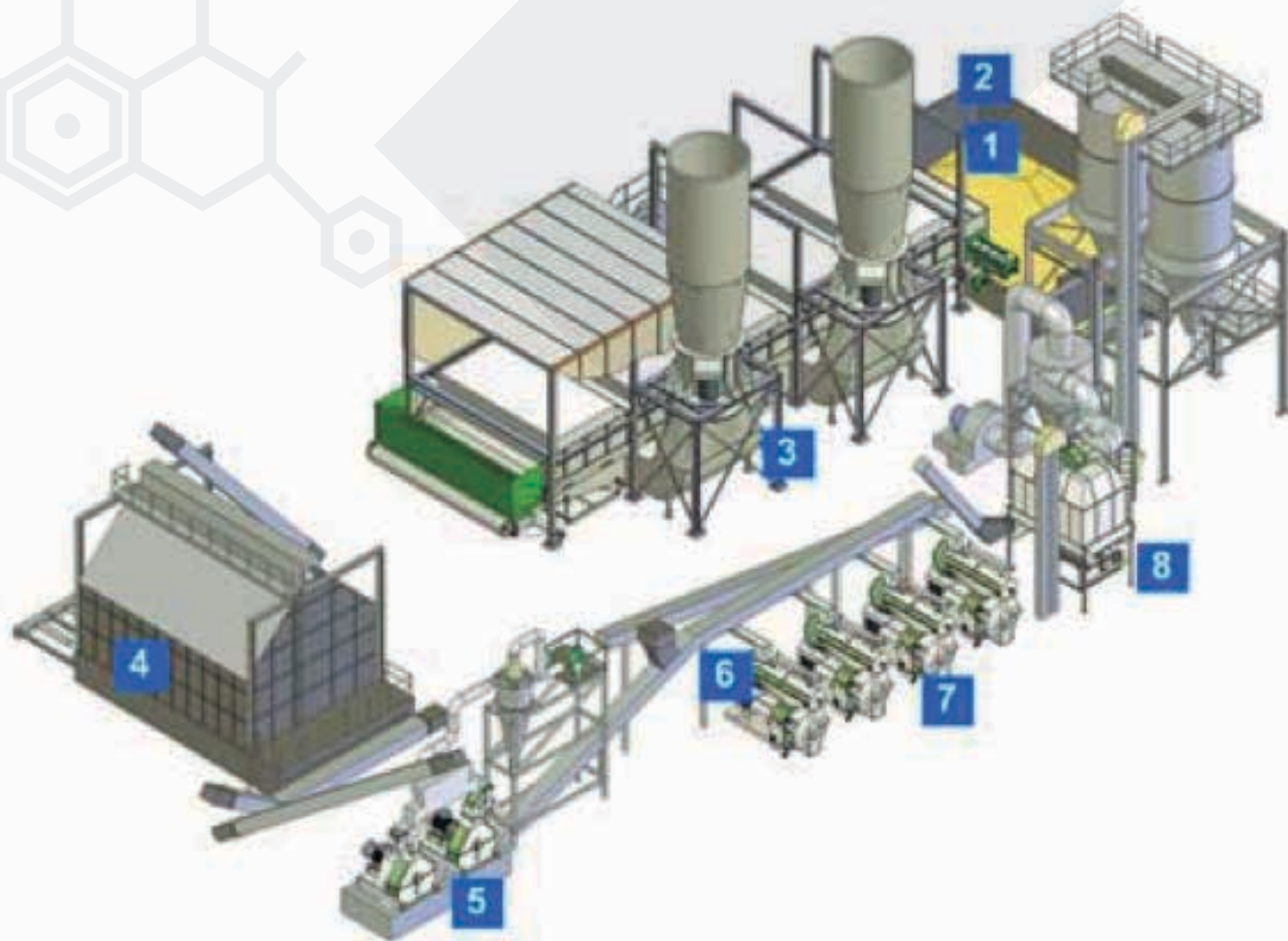


FIGURA 9. VISTA GENERAL DE UNA PLANTA PELETIZADORA

- 1. RECEPCIÓN DE MATERIA PRIMA**
- 2. PRETRATAMIENTO MATERIA PRIMA: DESCORTEZADO, ASTILLADO, CRIBA.**
- 3. SECADO TÉRMICO**
- 4. ALMACENAMIENTO INTERMEDIO**
- 5. MOLIENDA**
- 6. GRANULACIÓN**
- 7. ENFRIAMIENTO Y TAMIZADO DEL PELLET**
- 8. ALMACENAMIENTO Y EXPEDICIÓN DEL PELLET**

EL PRETRATAMIENTO

La materia prima que va a ser compactada requiere de un pretratamiento antes de ser introducida a la prensa o a una extrusora. Dependiendo de las condiciones iniciales, puede ser necesario una trituración o pre secado para disminuir el tamaño de las partículas. Para mejorar el desempeño energético del equipo de compactación se puede instalar un sistema de pre tratado de la materia prima. Una planta peletizadora o briqueteadora necesita por lo tanto estar equipada con trituradores, molinos y secadores.

EL TRITURADO

La biomasa que va a ser transformada en pellets o briquetas debe tener el tamaño de partícula que sea totalmente compatible con el equipo de compactación, para esto se recurre al triturado. Este equipo debe estar optimizado según la cantidad de masa a ser triturada y al tamaño de partícula requerido por el equipo de compactación.

Dependiendo de las condiciones en que se encuentra la biomasa, pueden ser necesario otras operaciones antes del triturado. Lo ideal es que la materia prima tenga el contenido de humedad óptimo, caso contrario se deberá recurrir al secado con estufas o utilizando el sol.

Como resultado del proceso de trituración siempre queda un porcentaje de pequeñas partículas de algunos centímetros de dimensión. A partir de su cantidad, el operador debe decidir si será necesario un manejo posterior para disminuir su tamaño en función del proceso requerido para la briqueta o el pellet.

Dependiendo de las características físico químicas del material inicial, puede ser que el resultado del proceso de triturado sea un material seco y quebradizo o un material levemente pastoso. En este último caso es recomendable que la biomasa húmeda sea triturada a temperatura ambiente y someter el material de inmediato al proceso siguiente, especialmente para evitar la degradación por microorganismos y la alteración de sus características físico químicas.

SECADO

El contenido de humedad es una variable muy importante en el proceso de compactación. Por un lado el agua facilita que se gelatinicen los almidones, se fragmenten las proteínas y se solubilicen las fibras durante la densificación. Por otro lado un exceso de humedad puede afectar la alimentación del material en la maquinaria. Estudios demuestran que el contenido de humedad ideal para la mayoría de las biomásas está entre el 5 y 10% que permite un producto más denso, estable y durable. En todo caso, para el tipo de material, la especie y la mezcla se debe calibrar la humedad óptima.

Un secado normal y sencillo se utiliza para materiales como la cascarilla del café y la cascarilla del arroz. Cuando las materias primas son biomásas húmedas como el bagazo de la caña, es necesario utilizar los gases de combustión o cualquier otra fuente de calor para bajar el contenido de humedad. Es claro que bajar el contenido de humedad de las biomásas húmedas como los residuos de la broza del café o los residuos de la piña, requieren inversión de energía para su pre-tratamiento.

LOS SECADORES PARA BIOMASA PUEDEN SER DE DOS TIPOS: DIRECTOS O INDIRECTOS

SECADO DIRECTO O POR CONVECCIÓN

Los secaderos directos transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, normalmente aire caliente. La mezcla de gas y vapor obtenida se puede someter a un lavado y filtrado en el caso de que el producto contenga partículas sólidas perjudiciales en suspensión para el ser humano y el ambiente. Además, es a menudo ventajoso combinar la molienda con el secado directo en una sola unidad. Esto hace ahorrar espacio y reduce el tamaño de las partículas alimentadas al secador, con lo que se optimizan la transferencia de calor y la evaporación.

SECADERO INDIRECTO O POR CONDUCCIÓN

Los secaderos indirectos transfieren calor al producto mediante el contacto con una superficie calentada por aire, vapor o un líquido térmico. Pueden utilizarse camisas (intercambiadores) para aportar el calor. El fluido, después de evaporar el agua del producto, pasa por un condensador para separar las sustancias evaporadas y se vuelve a calentar para utilizarse de nuevo. Se realiza así un circuito cerrado. Las únicas emisiones a la atmósfera son la de los gases procedentes de los focos de emisión de calor que se emplean en el intercambiador. Es un proceso de mayor eficacia ambiental indicado para productos con sustancias volátiles de alta toxicidad.

SECADEROS POR RADIACIÓN

Se aporta energía al material a través de ondas electromagnéticas: infrarrojos o microondas. No está muy extendido su uso a nivel industrial para biomasa, pero sí para aplicaciones donde tiene gran importancia la calidad del producto. Entre sus ventajas están que el secado es más rápido, el calentamiento es más uniforme, es más eficiente energéticamente y existe un mejor control del proceso.

Normalmente en el secado de la biomasa a ser briquetada o peletizada se utilizan los secadores tipo "flash" que son rotativos y recomendables para capacidades inferiores a 3.0 - 4.0 toneladas por hora. En (Figura 10), se presenta el detalle de un secador rotativo tipo "flash".



FIGURA 10. SECADOR ROTATORIO EN LA PLANTA PELETIZADORA.

MOLIENDA

Es importante triturar y moler la biomasa antes de introducirla en la peletizadora. Es necesario llegar a una granulometría adecuada, inferior al diámetro del pellets que se desea fabricar, para obtener unos pellets con buenas características físicas. Es recomendable la utilización de una trituradora móvil a fin de reducir *in situ* el tamaño de las partículas, facilitando de esta manera el transporte, almacenamiento y secado natural.

COMPACTACIÓN

Es donde se realiza el proceso de densificación de la biomasa en la planta. Se hace pasar la biomasa a través de una matriz agujereada (Figura 11) con la ayuda de rodillos giratorios que ejercen una presión constante sobre la matriz. La materia prima atraviesa la matriz al mismo tiempo que se comprime, obteniéndose a la salida un diámetro característico a la matriz empleada. A la salida de la matriz, un dispositivo compuesto de cuchillas, corta los cilindros, aún blandos, a la medida de la longitud deseada.

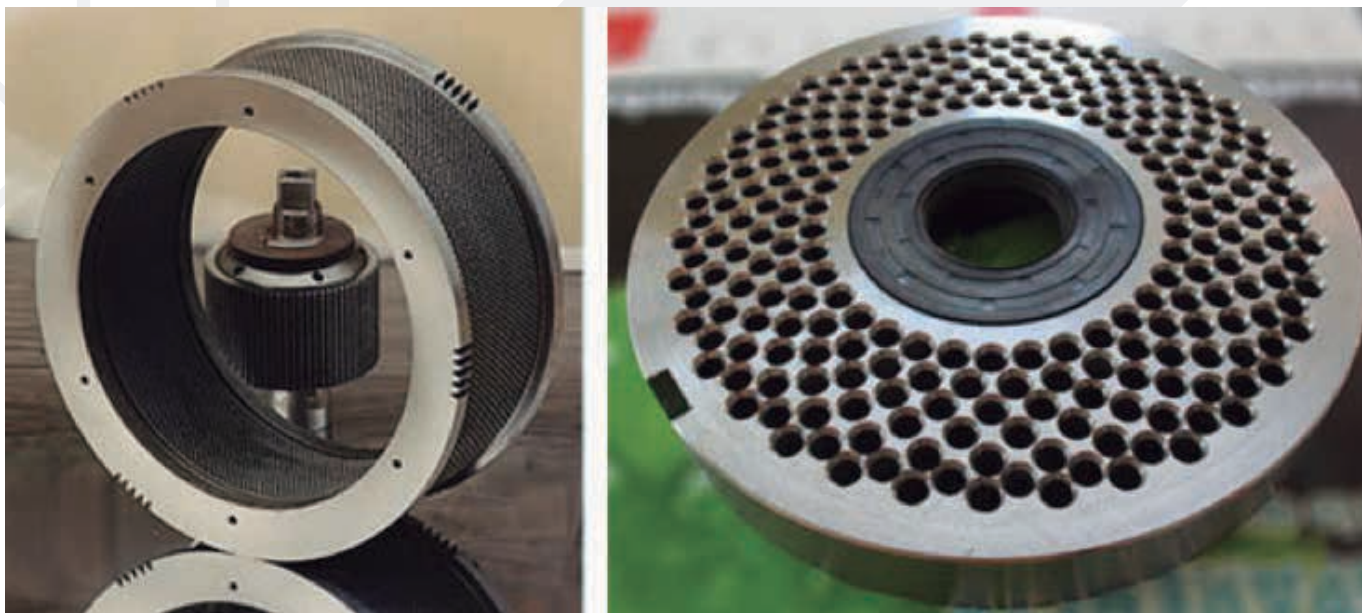


FIGURA 11. MATRIZ AGUJERADA POR DONDE ATRAVIESA LA MATERIA PRIMA PARA CONFORMAR EL PELLET

ENFRIAMIENTO

Por enfriamiento de la lignina, ésta se endurece y los pellets adoptan la forma cilíndrica típica endurecida. El equipo enfriador se basa en una cámara vertical con ventiladores donde los pellets caen por la aplicación de un flujo transversal de aire suave para evitar que se produzcan fisuras. En esta etapa se consigue aumentar la dureza y resistencia del pellet, lo que permite evitar problemas en la manipulación de las etapas posteriores.

4.-LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN

Una forma de valorizar la biomasa lignocelulósica es mediante el proceso termoquímico, denominado carbonización. Consiste en el calentamiento de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, en el cual la materia es transformada en un sólido rico en carbono (carbón vegetal o biocarbón) y en materia volátil (gases y líquidos), como agua (H_2O) metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), entre otros.

Las etapas que se presentan en la carbonización pirolítica se pueden dividir en cuatro. En el (Cuadro 2) se describe cada etapa, y se presentan los rangos de temperatura a las que se dan.

CUADRO 2. ETAPAS DEL PROCESO PIROLÍTICO PARA PRODUCCIÓN DE CARBÓN

Etapa	Descripción
I (T<100°C)	Corresponde a la etapa de secado. La biomasa se calienta a bajas temperaturas y se libera la humedad superficial, así como moléculas de agua débilmente unidas
II [T (100°C a 300°C)]	La segunda etapa o etapa intermedia. En esta etapa ocurre la deshidratación exotérmica de la biomasa con la liberación de agua y de gases de bajo peso molecular destilación De aceites esenciales (Hernández, 2011).
III [T (200°C a 600°C)]	Se presenta la descomposición de moléculas largas de biomasa en carbón, gases condensables (GC) y gases no condensables (GNC).
IV [T (300°C a 900 °C)]	Se da el craqueo de volátiles a carbón y a gases no condensables (Basu, 2010)

El carbón vegetal es un sólido, poroso, frágil, de color negro, el cual tiene una amplia variedad de usos. Para su producción existen una variedad de técnicas empleadas para la producción de carbón, las cuales se basan en el principio de aislar la madera del exterior para evitar su contacto con el oxígeno, y evitar que se incendie. Dentro de los principales métodos utilizados para la producción de carbón se tienen: fosas de tierra, hornos de ladrillo, hornos de tierra, hornos metálicos transportables, así como los métodos mejorados (Cuadro 3).

Método	Descripción	Rendimientos	Ventajas	Desventajas
Fosas de tierra	Consiste en una excavación de terreno, en la cual se coloca la biomasa y se cubre con tierra y vegetación (BUN-CA, 2002)	Rendimientos muy bajos además de carbón de mala calidad (Pacheco & Es de bajo costo (FAO, 1983), Carmona, 2005)	Es de bajo costo y es más eficiente que las fosas de tierra (FAO, 1983)	Se genera un carbón irregular, con mayor contenido de volátiles y contenido de cenizas, y con mayor probabilidad de formación de trozos de carbón mal carbonizados (Pacheco & Carmona, 2005). El carbón se contamina con tierra. Se da la pérdida de calor por radiación (Adam, 2009). Y según el mismo autor, se pueden presentar incendios impredecibles.
Parvas u hornos de tierra	Consiste en apilar la madera sobre el suelo, y cubrirla con tierra (FAO, 1983).	Rendimientos de 16% a 25%, siendo el más bajo el más frecuente (FAO, 1983).	Es de bajo costo y es más eficiente que las fosas de tierra (FAO, 1983)	Presenta rendimientos inciertos, y existe una alta probabilidad que se dé la contaminación del carbón con piedras y tierra (Pacheco & Carmona, 2005)
Hornos de ladrillo	Consiste en un horno, al cual se le controla la entrada del aire, y durante la fase del enfriamiento, se sella el horno rápida y herméticamente para impedir el ingreso del aire, y es de construcción sencilla (FAO, 1983).	Rendimientos sorprendentemente buenos de carbón vegetal (27%), de calidad apta para todos sus usos industriales y domésticos (FAO, 1983)	Son más eficientes que las fosas u hornos de tierra. Requieren poca mano de obra.	No se adaptan a la recuperación o quema reciclada de ningún subproducto, alquitrán o gases, con lo que aumenta la contaminación del aire y reduce levemente la posible eficiencia termal (FAO, 1983).

CUADRO 3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN COMUNES, ASÍ COMO UN MÉTODO MEJORADO

Método	Descripción	Rendimientos	Ventajas	Desventajas
Hornos metálicos transportables	Cualquier dispositivo cilíndrico, que contenga entradas y salidas de aire, y que sus partes se pueden separar para que sea transportable (Pacheco & Carmona, 2005).	26 % (FAO, 1983).	Al igual que el método de hornos de ladrillo este método es más eficiente que los métodos tradicionales. Con su uso se acorta la distancia de transporte de la madera (Pacheco & Carmona, 2005). Según la FAO (1983), es fácil de transportar, se obtienen mejores rendimientos con respecto a la masa, ya que se puede controlar mejor la entrada de aire y realizar el proceso en menor tiempo, y el carbón no se contamina con tierra. De acuerdo al mismo autor se pueden carbonizar diversos tipos de materiales, su operación es sencilla, y el proceso requiere menos supervisión que con los métodos anteriores. Es de bajo costo y su construcción es menos compleja que la de los hornos de ladrillo (Pacheco & Carmona, 2005). Puede ser desarmados con facilidad y frecuencia y transportados al lugar donde se encuentra la biomasa (Pacheco & Carmona, 2005).	La materia prima debe ser empaquetada con cuidado para lograr una eficiencia máxima, y los tamaños del material se deben reducir (FAO, 1983).
Sistema mejorado de producción de carbón (SMP)	Unidades piloto de bajo costo, desarrolladas en la India y África, para generar un proceso de carbonización más sostenible y amigable con el ambiente (Adam, 2009).	(30 a 40) %	De acuerdo a Adam, J. (2009), los gases volátiles son aprovechados en el secado de la materia prima. El mismo autor menciona que se reducen las emisiones atmosféricas en cerca de 75 %, ya que presenta una fase en la que se quemán los gases volátiles, los cuales son aprovechados para acelerar el proceso de carbonización El ciclo de carbonización es de aproximadamente de 12 horas (Adam, 2009).	Se debe mejorar la vida útil del sistema (Adam, 2009). No es transportable.

Sobre la evaluación del carbón y sus propiedades, en el cuadro 4 se resumen los principales parámetros para su evaluación.

USO DEL CARBÓN COMO MEJORADOR DE SUELOS E IMPORTANCIA

El carbón manufacturado a través de la pirólisis de la biomasa se denomina biocarbón. El biocarbón genera muchos beneficios ambientales y agronómicos al aplicarlo en el suelo. Se ha demostrado que el uso del carbón vegetal como enmienda en el suelo, no altera las concentraciones de los parámetros físicoquímicos, tanto del suelo, como de las plantas, y por el contrario mejora su calidad y el crecimiento de las plantas. Además se ha observado la reducción de la emisión del suelo de gases de efecto invernadero, también puede incrementar el rendimiento de los cultivos, especialmente por sus mecanismos como la retención de la humedad y la retención de nutrientes en el suelo, mejoras en la estructura del suelo, e incremento de la actividad microbiana, particularmente cuando se aplica en suelos pobres o degradados. En la Figura 12 se muestra un prototipo de carbonizador de bajo costo construido con un estañón de metal. Los residuos se depositan en el interior del estañón (dron) y se cierra, se hace un encendido en la parte externa para elevar la temperatura y cuando se alcanzan los 250 °C se inicia la transformación de la biomasa y se volatilizan los compuestos de la madera, después de 3 horas se completa el proceso y queda un carbón limpio.

CUADRO 4. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL CARBÓN DE ACUERDO A VARIOS AUTORES

Parámetro	Antal & Gronli (2003).	FAO (1983).	Norma EN 1860-2 (Pacheco & Carmona, 2005)	(Byrne & Nagle, 1997)
Densidad del carbón ($\frac{g}{cm^3}$)	-	-	-	0,07-0,6
Contenido de humedad (%)	-	5-15	8	-
Contenido de volátiles (%)	20-30 (Uso doméstico) 10-15 o menos (Metalurgia)	≤ 30	30	-
Contenido de cenizas (%)	0,5-5	0,5-5	8	-
Poder calórico ($\frac{MJ}{kg}$)	28 - 33	28 - 33	-	-
Carbono fijo (%)	-	50-95	50-95	-

Nota: El símbolo – indica que no se registró un valor para dicho parámetro.



FIGURA 12. CARBONIZADOR DE BAJO COSTO CONSTRUIDO EN EL TEC, CARTAGO.

BIBLIOGRAFÍA

- BHATTACHARYA, S. C. (2002) Biomass energy and densification: a global review with emphasis on developing countries. In: WORLD CONFERENCE ON PELLETS, 2002, Stockholm, Sweden. Anais... Stockholm: Swedish Bioenergy Association. p. 1-17.
- BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESHTHA, R. M. (1989). State of art for biomass densification. Energy Sources, Bristol, v. 11, n. 3, p. 161-182.
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pellets y briquetas. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 20(1), p. 77-88.
- DERMIBAS, K.; SAHIN-DERMIBAS, A. (2009). Compacting biomass for energy densification. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, Philadelphia, v. 31, p. 1063-1068.
- Deiana, A., Petkovic, L., Silva, H., Aguilar, E., Sardella, M., & Venturini, R. (2002). Residuos y subproductos para la obtención de briquetas de Carbón Activado. Proceedings of the VI Curso-Taller Iberoamericano de Adsorbentes y Catalizadores para la Protección Ambiental, Redes Temáticas VC y VC-CYTED, 9.
- Escobar, J. (2013). Biomasa lignocelulósica en Brasil Perspectivas de uso para pellets y briquetas en el sector industrial. The Bioenergy International, (18), p. 38-39.
- GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. (2009) Energia de briquetes produzidos com rejeitos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 657-661.
- GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. (1996). Biomass briquetting: technology and practices. Bangkok: FAO. 43 p. (Field document, n. 46). Regional Wood Energy Development Programme in Asia GCP/RAS/154/ NET.
- Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. Iteckne, 9(1), p. 21-30.
- Valderrama, A., Curo, H., Quispe, C., Llantoy, V., & Gallo, J. (2007). Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales. Revista de Investigación CEDIT, 2.

