



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

TRABAJO DE DIPLOMA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Departamento de Energía

Título: Estudio comparativo de BSC
y maderas en la obtención de Eco-materiales

Autor: Leonardo González Mesa

Tutor: Msc. Ing. Idalberto Herrera Moya

Msc. Ing. Ivan Machado López

2004-2005

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



INTRODUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
I.1 FUENTES DE BIOMASA, CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS Y SUS APLICACIONES.....	19
I.1.1 La biomasa.....	20
I.1.2 Tipos de biomasa	21
I.1.3 Características energéticas de la biomasa	22
I.1.4 Instalaciones donde es posible utilizar la biomasa	24
I.1.5 Ventajas y desventajas que pueden presentar su uso	25
I.2 BRIQUETEADO, VARIABLES Y SU INFLUENCIA	26
I.2.1 Densificación	26
I.2.2 Aspectos fundamentales a tener en cuenta a la hora de densificar.....	27
I.2.3 La humedad inicial del material biomásico a tratar	28
I.2.4 Tamaño de las partículas, granulometría y presión de prensado	28
I.2.5 Ventajas de las briquetas.....	30
I.3 APROVECHAMIENTO POTENCIAL DE LOS RESIDUOS DE MADERA EN LOS ASERRÍOS	30
I.3.1 Fuentes de residuos de madera.....	31
I.3.2 Valor de los residuos madereros como combustible	33
I.3.3 Efecto del contenido de humedad y del tamaño de las partículas en los valores caloríficos.....	34
I.3.4 Reducción de tamaño y selección	35
I.4 LA FABRICACIÓN ARTESANAL DE LADRILLOS	36
I.4.1 Ladrillos rojos.....	37
I.5 ASPECTOS FUNDAMENTALES ACERCA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.....	38
I.5.1 La importancia del diseño experimental.....	38
I.5.2 Algunos conceptos generales relacionados con el diseño factorial experimental	39
CAPÍTULO II. PARTE EXPERIMENTAL. EL BSC Y LA MADERA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA.....	42
II.1 EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN ...	42
II.1.1 Estudio de las maderas utilizadas más comúnmente en la región	43
II.1.2 Potencia consumida por un horno tradicional usando leña como combustible	44
II.2. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA ..	46

II.2.1. <i>Análisis inmediato</i>	46
II.2.2 <i>Análisis elemental</i>	46
II.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA	47
II.3.1 <i>Resultados de los análisis</i>	47
II.3.2 <i>Procedencia de la biomasa para los BSC</i>	48
II.3.3 <i>Propiedades físicas del aserrín</i>	52
II.3.4 <i>Material aglutinante la arcilla</i>	52
II.4.1 <i>Variante del diseño</i>	53
II.4.2 <i>Propuesta para la obtención de los BSC</i>	54
II.4.3 <i>Procedimiento metodológico empleado</i>	55
II.4.4 <i>Fabricación de las muestras</i>	56
II.4.5 <i>Ensayos de las muestras de los BSC confeccionados</i>	60
II.4.6 <i>Evaluación de la combustión de los BSC</i>	60
II.4.7 <i>Evaluación cuantitativa de la combustión de los BSC</i>	61
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	63
III.1 LA HUMEDAD EN LAS MADERAS	63
III.1.1 <i>La humedad en los BSC</i>	64
III.1.2 <i>Análisis sobre la composición química en las Maderas y el BSC</i>	64
III.1.3 <i>Sobre el Poder Calórico</i>	65
III.1.4 <i>El BSC vs. la madera</i>	66
III.1.5 <i>Sobre la influencia de las variables estudiadas en el proceso de Fabricación</i>	67
III.1.6 <i>Energía de Fabricación</i>	69
III.2 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	70
III.3 <i>CONSIDERACIONES AMBIENTALES</i>	72
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	83

*Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento,
madre de toda certidumbre.*

Leonardo Da Vinci

Dedicatoria

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Hay instantes en la vida que tenemos la oportunidad de realizar un sueño.

*Agradezco a la vida haberme permitido aprovechar ese instante,
y quiero dedicar este sueño a mis padres, con todo el cariño que ellos se merecen,
a mi familia que tanto me ha apoyado.*

Agradecimientos

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



A todos las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

A mi tutor. M.Sc. Ing. Idalberto Herrera Moya.

A mis Amigos de las buenas y las malas... no es necesario escribir sus nombres.

Compañeros de aula.

A mis guías de año Ernesto y Ramón Martínez.

Trabajadores del taller y profesores del CEETA.

En especial a mi familia (todos), pues sin su apoyo y comprensión no hubiese sido posible mi formación como persona y la culminación satisfactoria de mis estudios

Resumen

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Resumen

En el presente trabajo se hace un estudio con el propósito de sustituir la madera por Bloques Sólidos Combustibles (BSC) en hornos ladrilleros para la producción de eco-materiales, para lo cual se realizaron una serie de evaluaciones utilizando métodos experimentales. Se muestra además un análisis del estado del arte alrededor del tema para conocer las investigaciones realizadas en Cuba y el resto del mundo.

Así mismo, se analizaron las propiedades de las maderas empleadas en el horno ladrillero calculando las variables a tener en cuenta a la hora de su sustitución por BSC, tales como, el análisis inmediato, la composición elemental, la densidad y el poder calórico.

La fabricación de los BSC en condiciones de pequeña industria, descentralizada y con la mínima energía necesaria requerida, conlleva al análisis de parámetros tales como la presión aplicada, el contenido de aglomerante, el tiempo de retención entre otros, para obtener un producto que pueda ser fabricado con prensas manuales y tecnologías apropiadas. En este trabajo se logra determinar la influencia de estos parámetros y con el empleo de herramientas estadísticas – experimentales se obtienen a un grupo de recomendaciones y conclusiones.

Abstract

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Abstract

In the presently work we make a study with the purpose of substituting the wood for Fuels Solid Blocks (SFB) in kiln for the production of echo-materials. For this purpose they were carried out a series of evaluations using experimental methods. It is also shown an analysis of the state of the art around the topic to know the investigations carried out in Cuba and the rest of the world.

Likewise, the properties of the wood we used were analyzed in the Brick Kiln, calculating the variables to keep in mind for their substitution for Fuels Solid Block (SFB) such as, the immediate analysis, the elementary composition, density, and the caloric power.

For the production of the SFB under conditions of small industry, decentralized and with the minimum required necessary energy, it is necessary the analysis of such parameters as the applied pressure, the moisture content, the time of retention, etc. In this work it is possible to determine the influence of these parameters to obtain a product that can be manufactured with presses manuals and appropriate technologies, and with the employment of statistical and experimental tools we can formulate some recommendations and conclusions.

Índice

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Introducción

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



INTRODUCCIÓN

Los hornos ladrilleros que queman biomasa usados en los países en vías de desarrollo no están diseñados de la mejor forma. Producto de esto ellos consumen una gran cantidad de energía en los procesos de calentamiento y adicionalmente contaminan la atmósfera, debido a la combustión incompleta, con las subsecuentes afectaciones del sistema respiratorio de las personas.

En muchas investigaciones e innovaciones anteriores realizadas en Cuba y en otras partes del mundo se ha demostrado la factibilidad del uso de la biomasa como portador energético, desarrollándose los llamados recursos renovables como alternativa al uso de los combustibles fósiles que no son renovables y en muchos casos sí muy contaminantes.

El uso de la biomasa como portador energético conlleva a la solución de varios problemas científico – técnicos, entre ellos la baja densidad de la biomasa, que implica la manipulación de grandes volúmenes de ésta. Otro problema es su menor poder calórico con respecto a los combustibles tradicionales **(Ericsson S. and Prior M., 1990) (16)**.

En cambio su uso posee varias ventajas importantes, entre ellas, su carácter renovable y no contaminante, además de la importante posibilidad de re-utilizar los desechos de la producción agroindustrial, entonces de lo que se trata, para su uso de forma económica, es de lograr instalaciones que logren densificar la biomasa sin implicar el empleo de grandes valores de energía de compactación y desarrollar instalaciones adecuadas para la combustión eficiente de este combustible **(Faborode M.O. and O'Callaghan J. R., 1987) (1)**

Los materiales de la construcción, como los ladrillos rojos cocidos, son producidos a veces a costo de la ecología. Grandes extensiones de bosques son taladas diariamente en varios países emergentes en busca de alternativas de combustible local **(Steverson y, E. M., Semler, T. T. and Goldsberry, J. A. col., 1985) (30)**.

El Bloque Sólido Combustible (BSC) puede ser una variante energética viable para los medianos y pequeños productores de ladrillos que podrían de este modo contribuir de forma estable al desarrollo comunitario con un importante impacto social creando además nuevas fuentes de empleo **(Batacharya, S. C., Sett, S. and Shrestha, R. M.col., 1989) (1)**.

La fabricación de los BSC es una importante contribución al uso de energías limpias no contaminantes y al reciclaje de desechos que en muchos casos no tienen un destino previsto, de

modo que se trata de una tecnología que disminuye el impacto ambiental. Asimismo, representará un aporte económico en la industria cubana, puesto que el mismo permitirá un beneficio importante por concepto de ahorro de combustible fósil y la posibilidad del manejo sostenible de fuentes de biomasa (**Domínguez, J.; González Valdez, M.; Muñoz Hernández, G., 2002**) (3).

Enmarcado en estos antecedentes, este trabajo se traza como objetivo, integrar y/o aplicar el uso de la biomasa densificada para la obtención de energía para la cocción de los ladrillos rojos.

Se trabajó en la sustitución de leña (empleada tradicionalmente), por briquetas de aserrín en el proceso de quema; evaluándose comparativamente los resultados de ambas técnicas para definir la más adecuada a las condiciones de zonas rurales seleccionadas, en este caso en un horno de ladrillos artesanales en Manicaragua. De igual modo se han analizado diferentes técnicas de moldeo y secado, en diferentes lugares del país y del exterior, para determinar tecnologías probadas que puedan ser adaptadas a las condiciones socioeconómicas de los productores seleccionados.

Hipótesis:

Es posible reemplazar la madera en los hornos para la producción de ladrillos rojos por BSC fabricados a partir del aserrín residual de la industria agroforestal.

Objetivo general:

- Evaluar comparativamente las maderas y los BSC como fuentes energéticas renovables para la producción de ladrillos rojos, empleando para ello el análisis inmediato, la experimentación y la aplicación de modelos para conocer su composición y propiedades.

Objetivos específicos:

- Determinar las propiedades más importantes desde el punto de vista energético de las maderas empleadas en los hornos ladrilleros.
- Estudiar el régimen térmico de los hornos ladrilleros cuando operan con madera.
- Investigar el proceso de fabricación del BSC de aserrín y dentro de él, la arcilla como aglomerante.
- Estudiar la influencia de las variables tales como la presión aplicada, el tiempo de prensado y el por ciento de arcilla, en las propiedades finales del BSC desde el punto de vista físico y de la combustión.

Capítulo I

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



CAPÍTULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

I.1 FUENTES DE BIOMASA, CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS Y SUS APLICACIONES

Según un análisis realizado sobre el potencial de las fuentes alternativas de energía en Cuba en el año 1991, por la Comisión Nacional de Energía, se consideran como fuentes alternativas de energía, renovables o no: la paja de arroz, el gas natural o acompañante, los residuos pecuarios, industriales y urbanos, las energías hidráulicas, solar y eólica, la turba, la asphaltita y las rocas y arenas bituminosas, las astillas de madera y los desperdicios de los bosques.

Según este informe las fuentes alternativas constituían más del 30% de la energía total consumida en el país, además se producían anualmente 2.5 millones de metros cúbicos estéreos (no compactados) de leña con un rendimiento por hectárea de unos 60 m³. **(Comisión Nacional de Energía 1991) (6)**

El reto hoy en Cuba es lograr una mayor independencia energética mediante la utilización de todas las fuentes nacionales de energía, según se expresa en el Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía del Gobierno Revolucionario. **(Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación 2004) (22)**

Algunos autores plantean que los países en desarrollo deben abastecerse de aquella energía de más fácil utilización, acorde con su desarrollo cultural y técnico como es la hidráulica, la biomasa, las energías renovables y los combustibles fósiles, dejando la energía que requiere un mayor desarrollo estructural, técnico y de conocimientos como la nuclear, para los países más desarrollados. **(Díaz Río. Junio 1999) (12)**. Este planteamiento puede ser cierto en muchos casos, pero lo más importante es que sí se debe considerar en todos los casos el uso de las energías renovables como una importante alternativa.

Es prioritario el desarrollo y utilización de las energías renovables como medio de suministrar energía comercial para variados usos, y deben apoyarse fundamentalmente en los proyectos de energía solar, biomasa, eólica y minicentrales. No cabe duda que estas fuentes de energía pueden obtener una mayor relevancia en la producción y consumo de energía local.

El actual estilo de vida adoptado en el mundo desarrollado parece estar en contradicción con una buena práctica de la conservación de la energía. Este mundo desarrollado, que representa el 20% de la población mundial, consume el 80% de la energía. Esta situación debe ser modificada si queremos llegar a un equilibrio político y económico.

I.1.1 La biomasa

La utilización de la biomasa por el hombre es tan antigua como el descubrimiento y el empleo del fuego para calentarse y preparar los alimentos. Aún hoy, la biomasa es la principal fuente de energía para usos domésticos empleada por más de 2.000 millones de personas en el Tercer Mundo.

La biomasa, sustancia orgánica renovable de origen animal o vegetal **(Sebastián F., Royo J., 2002) (28)**, ha sido la fuente energética más importante para la humanidad desde su nacimiento, en ella se ha basado la actividad de los hombres tanto doméstica como manufacturera hasta el inicio mismo de la revolución industrial.

Con el uso masivo de combustibles fósiles el aprovechamiento energético de la biomasa fue disminuyendo progresivamente y en la actualidad presenta en el mundo un reparto muy desigual como fuente de energía primaria.

No obstante, en los últimos años el panorama energético mundial ha variado notablemente. El elevado coste de los combustibles fósiles y los avances técnicos que han posibilitado la aparición de sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa cada vez más eficientes, fiables y limpios, han causado que esta fuente de energía renovable se empiece a considerar por las industrias como una alternativa, total o parcial, a los combustibles fósiles.

En los países desarrollados la biomasa es la energía renovable más extendida y que más se está potenciando, en multitud de países en vías de desarrollo es la principal fuente de energía primaria lo que provoca sin embargo, en muchos casos, problemas medioambientales como la deforestación, desertización, reducción de la biodiversidad, etc. producidos por una explotación no adecuada del recurso.

La energía de la biomasa proviene en última instancia del sol. Mediante la fotosíntesis el reino vegetal absorbe y almacena una parte de la energía solar que llega a la tierra; las células vegetales utilizan la radiación solar para formar sustancias orgánicas a partir de sustancias simples y del

CO₂ presente en el aire. El reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía. En este proceso de transformación de la materia orgánica se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos. (Sebastián F., Royo J., 2002) (28)

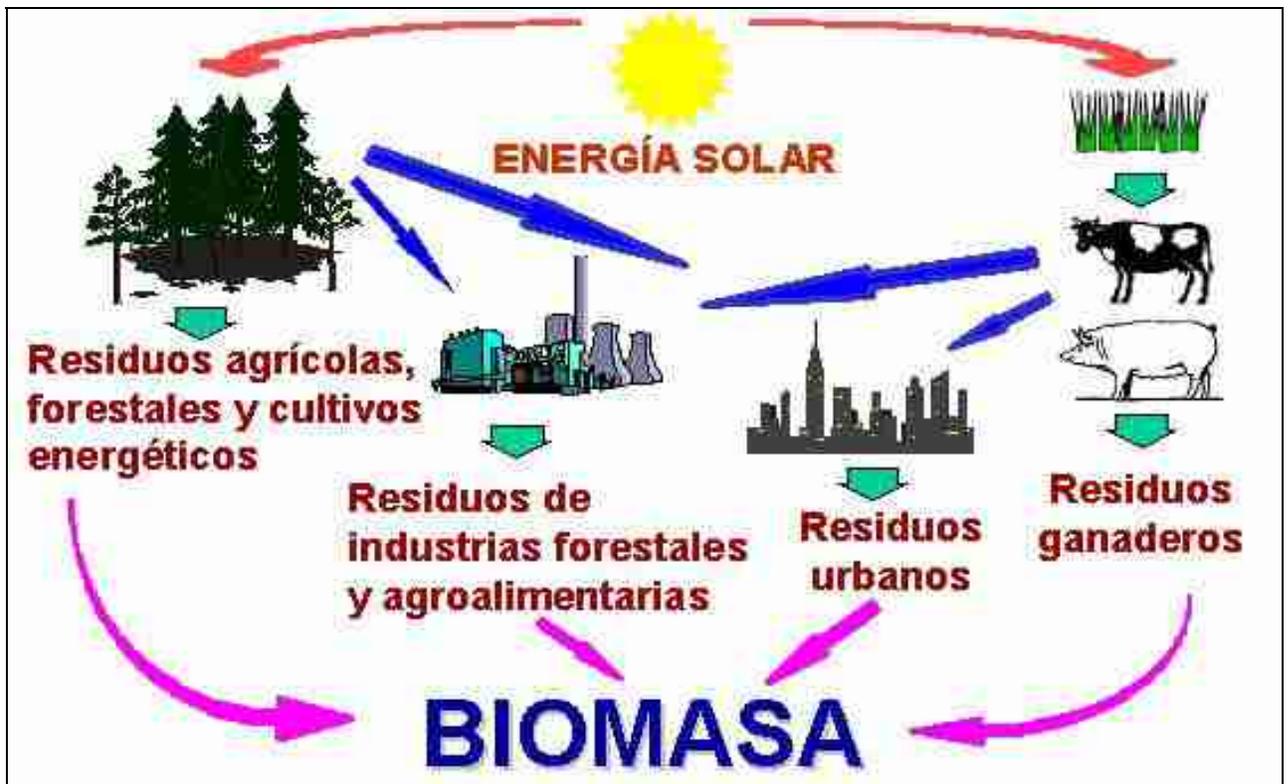


Figura 1. Fuentes de biomasa

I.1.2 Tipos de biomasa

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, una de las clasificaciones más generalmente aceptada es la siguiente. (Energía de la Biomasa. Agosto 2001) (15).

- **Biomasa natural:** es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Los recursos generados en las podas naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa. La utilización de estos recursos requiere de la gestión de su adquisición y transporte hasta la empresa lo que puede provocar que su uso sea inviable económicamente.

- **Biomasa residual seca:** se incluyen en este grupo los subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, en las forestales y en los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera y que, por tanto, son considerados residuos. Este es el grupo que en la actualidad presenta un mayor interés desde el punto de vista del aprovechamiento industrial. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son la cáscara de almendra, el orujillo, las podas de frutales, el aserrín, etc.
- **Biomasa residual húmeda:** son los vertidos denominados biodegradables: las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (principalmente purines).
- **Cultivos energéticos:** son cultivos realizados con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Algunos ejemplos son el cardo (*cynara cardunculus*), el girasol cuando se destina a la producción de biocarburantes, etc.
- **Biocarburantes:** aunque su origen se encuentra en la transformación tanto de la biomasa residual húmeda (por ejemplo reciclado de aceites) como de la biomasa residual seca rica en azúcares (trigo, maíz, etc.) o en los cultivos energéticos (colza, girasol, patata, etc.), por sus especiales características y usos finales, este tipo de biomasa exige una clasificación distinta de las anteriores.

I.1.3 Características energéticas de la biomasa

En muchas ocasiones, la biomasa se elimina por ser molesta para la instalación que la produce o porque entorpece las labores agrarias o ganaderas que la generan. Cuando esto ocurre, se está desperdiciando una fuente de energía importante, basta recordar que considerando que, por término medio, un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 Kcal. y que un litro de gasolina tiene aproximadamente 10.000 Kcal., por cada tres kilogramos que desperdiciamos de biomasa, se desaprovecha el equivalente a un litro de gasolina.

Habitualmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para algunos de ellos, como es el caso de la biomasa residual húmeda o de los biocarburantes, se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento. La Tabla 1 recoge el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior a distintos contenidos de humedad de algunos de los recursos de biomasa más habituales.

Tabla 1: Poder calórico de diferentes biomásas

PRODUCTO	P.C. a humedad x (KJ/Kg)					
	X	P.C.S.	x	P.C.I.	x	P.C.I.
Leñas y ramas	0	19.353	20	15.006	40	10.659
Aserrines y virutas	0	19.069	15	15.842	35	11.537
Orujillo de oliva	0	18.839	15	15.800	35	11.746
Cáscara de almendra	0	18.559	10	16.469	15	15.424
Cortezas (Coníferas)	0	19.437	20	15.257	40	11.077
Cortezas (Fronosas)	0	18.225	20	14.087	40	9.948
Poda de frutales	0	17.890	20	13.836	40	9.781
Paja de cereales	0	17.138	10	15.173	20	13.209
Vid (Sarmientos)	0	17.765	20	13.710	40	9.656
Vid (Ramilla de uva)	0	17.263	25	12.331	50	7.399
Vid (Orujo de uva)	0	18.894	25	13.543	50	8.193

Calor específico de combustión, calor de combustión, valor calórico, o potencia calórica es la cantidad de calor que se desprende, cuando ocurre la combustión completa de la unidad masa y se expresa en kJ/Kg. en el caso de los combustibles sólidos y líquidos, si en condiciones de laboratorio se determina la totalidad del calor específico de combustión hasta enfriar los productos hasta la temperatura ambiente se obtendrá el llamado calor específico de combustión superior **(Roque Díaz Pablo 1990) (26).**

Una de las formas más comunes para la obtención de energía de la biomasa es la combustión directa, la combustión de un combustible es el proceso Físico-Químico Complejo, durante el cual los componentes quemables se combinan con el oxígeno liberando una determinada cantidad de calor. Para que la combustión se produzca en todo el volumen debe existir además del oxígeno (puro o del aire) una temperatura de autoignición pues de lo contrario la llama se extingue y se detiene el proceso de combustión.

Una gran importancia en el proceso de combustión tiene también la mezcla obtenida entre el combustible y el oxidante (comburente), así como el tipo de combustible ya que cada uno de ellos está caracterizado por su forma de combustión lo que determina el tiempo en que este proceso transcurre.

Por todo lo anterior se puede concluir que para que se produzca la combustión debe existir además de combustible y oxidante, lo que se conoce como las tres **T** de la combustión que son:

temperatura, turbulencia y tiempo. En calidad de oxidante generalmente se utiliza el aire atmosférico (Steverson, E. M., Semler, T. T. and Goldsberry, J. A 1985) (30).

I.1.4 Instalaciones donde es posible utilizar la biomasa

Como se ha visto hasta ahora, multitud de recursos quedan agrupados bajo el término genérico biomasa. Esta enorme variedad unida a la capacidad de adaptación de las tecnologías de aprovechamiento energético a los diferentes recursos existentes, causan que, en la actualidad, muchas de las actividades industriales podrían satisfacer toda o parte de su demanda energética con biomasa.

No obstante, para poder utilizar esta energía renovable es necesario cumplir dos condiciones:

1.- Disponer de una fuente de biomasa cercana a precios razonables.

Las empresas que disponen en sus propias instalaciones de biomasa residual son las que, con mayor facilidad, pueden plantearse la posibilidad de un aprovechamiento energético puesto que se suele tratar de unos recursos con valor de mercado muy bajo, pudiendo suponer incluso un coste el deshacerse de ellos.

En varios países las empresas que no disponen de biomasa residual propia pueden adquirir ésta en el mercado. Aunque todavía no del todo desarrolladas, ya existen cadenas de distribución de estos recursos que permiten adquirirlos a un coste enormemente competitivo frente a los tradicionales.

2.- Tener unos consumos energéticos suficientes para que la instalación sea rentable.

Mientras que para el aprovechamiento de algunos tipos de biomasa en la generación de energía térmica cualquier tamaño de instalación suele ser rentable, en el caso de producción de energía eléctrica o mecánica son necesarios unos consumos mucho más elevados.

Aplicaciones energéticas.

Con biomasa se puede generar energía térmica (agua o aire caliente, vapor, etc.), energía eléctrica e incluso mecánica mediante el uso de biocarburantes en motores de combustión interna:

Generación de energía térmica: El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento está basado en la combustión de biomasa sólida, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido.

Generación de energía eléctrica: En función del tipo y cantidad de biomasa disponible varía la tecnología más adecuada a emplear para este fin.

- **Ciclo de vapor:** está basado en la combustión de biomasa, a partir de la cual se genera vapor que es posteriormente expandido en una turbina de vapor.
- **Turbina de gas:** utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido. Si los gases de escape de la turbina se aprovechan en un ciclo de vapor se habla de un *ciclo combinado*.
- **Motor alternativo:** utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido o biogás procedente de una digestión anaerobia.

Generación de energía mecánica: Los biocarburantes pueden ser empleados en los motores alternativos de automóviles, camiones, autobuses, etc., sustituyendo total o parcialmente a los combustibles fósiles. La utilización de biocarburantes es especialmente interesante en industrias agrarias que dispongan de una adecuada materia prima para su producción (aceites reciclados, colza, girasol, maíz, trigo, patata, etc.) y que puedan autoconsumirlos (por ejemplo en tractores), llegando a suponer importantes ahorros en la factura de los combustibles.

I.1.5 Ventajas y desventajas que pueden presentar su uso

La utilización energética de la biomasa presenta, debido a sus características, pequeños inconvenientes con relación a los combustibles fósiles:

- Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los de las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso.
- La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores.
- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costes de operación y mantenimiento (respecto a las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente.

- Los canales de distribución de la biomasa no está tan desarrollados como los de los combustibles fósiles (sólo aplicable en el caso en que los recursos no sean propios).
- Muchos de estos recursos tienen elevados contenidos de humedad, lo que hace que en determinadas aplicaciones puede ser necesario un proceso previo de secado. **(Sebastián Fernando, Javier Royo, CIRCE, Universidad de Zaragoza. 2002) (28)**

I.2 BRIQUETEADO, VARIABLES Y SU INFLUENCIA

I.2.1 Densificación

Como se conoce, la mayoría de las desventajas que tiene el uso de la biomasa como combustible se derivan de su baja densidad física y energética. Por eso es tan importante su densificación. La densificación de la biomasa se puede definir como su compresión o compactación, para disminuir los espacios vacíos entre las partículas y dentro de las partículas.

Productos compactados con menos de 30 mm de diámetro son considerados convencionalmente pellets y con diámetros mayores, briquetas. Los productos compactados no aglutinados son conocidos por bultos o pacas.

Inexplicablemente, aunque las tecnologías de densificación datan del siglo pasado, no existe en la literatura consultada fundamentación teórica precisa alrededor del tema y los procesos que intervienen en este fenómeno.

La formación de briquetas, pellets, pacas, etc. se justifica no sólo por la reducción del volumen de los combustibles, sino también por la transformación de sus propiedades.

En los últimos años se ha venido creando una conciencia cada vez mayor sobre el empleo de residuos de madera compactada en forma de briquetas, bolas o "tramos", como combustible doméstico o industrial.

Las briquetas se forman generalmente haciendo pasar el aserrín o las virutas secas a través de un troquel cilíndrico partido, usando un vástago hidráulico. La presión ejercida, de unos 1 200 Kg/cm², y el calor resultante generado aglomera las partículas de madera en forma de "leños" artificiales.

La producción de bolas o pellets supone la reducción de los residuos de madera al tamaño del aserrín, y luego se secan aproximadamente al 12 por ciento de contenido de humedad (c.h) antes de su extrusión en molinos agrícolas especialmente adaptados para formar cilindros de unos 6 a

18 mm de diámetro y de 15 a 30 mm de largo, con una densidad del orden de 950 a 1 300 Kg/m³. El secado de la materia antes de su extrusión se suele realizar en secadoras de tambores giratorios, caldeadas por un 15 a 20 por ciento de la producción de bolas de la planta.

Aunque de la densificación resulta un producto con unas características excelentes de manipulación y almacenamiento, con una concentración de energía equivalente al cuádruplo del combustible de madera, reduciendo así considerablemente los gastos de transporte y mejorando el rendimiento de las calderas, se ha llegado a la conclusión de que las grandes inversiones de capital que se requieren en la planta de tratamiento y sus costos de funcionamiento sólo resultan económicamente interesantes si la distancia desde donde procede la materia prima que hay que transportar no pasa de 250 Km. **(Combustibles sólidos de baja densidad) (4).**

I.2.2 Aspectos fundamentales a tener en cuenta a la hora de densificar

Se deben tener en cuenta fundamentalmente a la hora de abordar un proyecto para la densificación de biomasa, los siguientes aspectos:

- Que los productos (pellets, briquetas, etc.) mantengan sus propiedades como sólidos compactados hasta que cumplan su función (durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión).
- Que se comporten satisfactoriamente como combustibles, dentro de un sistema integral concebido.

Las biomásas como la paja de caña, la cáscara de arroz y el aserrín con su “elasticidad natural”, requieren para su densificación en briquetas, mayores presiones que los materiales inorgánicos, debido a la necesidad de romper las paredes celulares mediante presión y temperatura.

Idealmente, para concebir un proyecto de utilización, se analizan los requerimientos del transporte, manipulación, almacenaje y combustión, calidad del servicio energético, impactos al medio y sobre los productos, residuales y desechos, etc., y luego, a partir de las características físicas y químicas del combustible sólido de baja densidad disponible, se escoge el método de preparación y densificación óptima y la máquina capaz de lograrlo, la transportación y el almacenaje, el sistema de combustión, etc.

Según el criterio de una empresa española productora de briquetas y pellets de aserrín:

“El mayor enemigo que a las técnicas de densificación se les presenta es su aparente sencillez.” La gente le ve tal facilidad aparente que muchos, por ejemplo en España, han adquirido máquinas briquetadoras o pelletizadoras estándar, de firmas reconocidas y “sencillamente” después de múltiples intentos la mayoría ha tenido que abandonar los proyectos, o ha quebrado.

El éxito de un proyecto de producción de briquetas con fines energéticos lo fundamentan dos conceptos.

- Tenacidad y confianza en la investigación aplicada.
- La integralidad del concepto. El combustible, la briqueta, es sólo una parte: el “portador”. Lo esencial es el servicio energético que se logre integralmente.

I.2.3 La humedad inicial del material biomásico a tratar

Por una parte a causa de las grandes presiones internas que se levantan en las prensas de pistón, sólo se pudieran “briquetear” combustibles relativamente secos. El incremento de la humedad causa mayor cantidad de vapor de agua que se genera durante la compresión, el cual o rompe la briqueta por su superficie al enfriarse o puede producir una explosión que lanza la briqueta como un proyectil. En el caso de un brusco incremento de la humedad en el material de la entrada, la explosión de vapor puede incluso dañar la prensa.

Por otra parte mientras menor sea la humedad del material inicial, la fricción en el proceso aumenta y con ello se incrementa la demanda de energía. Los límites de humedad dependen del material y el tipo de “briquetadora” que se utiliza, normalmente se acepta como humedad óptima alrededor de 7 %, permitiéndose como límite inferior 5 % y como superior 15 %. En algunos casos específicos se reporta hasta 20 % de humedad.

Estas limitaciones de humedad y el control de la homogeneidad del proceso, exigirían en muchos casos el secado como paso previo o al menos el control de la humedad.

Desde luego, en nuestro caso, para el aserrín., se trataría casi siempre de secado natural, solar, por nuestras condiciones climáticas. Esto siempre añade costos de inversión y manipulación.

I.2.4 Tamaño de las partículas, granulometría y presión de prensado

En la formación de bultos o pacas, por lo general, el tamaño de la partícula tiene menor importancia y mientras más largas éstas sean se facilita el amarre o tejido. Para la formación de briquetas se acepta que sólo lo que puedas palear, lo podrás briquetear. En general, el material a

briquetear idealmente deberá contener partículas largas y cortas. La longitud misma de la partícula dependerá del material y diámetro del dado. Mientras mayor sea la máquina y el dado, mayor podrá ser la partícula, por ejemplo para dados de 125 mm de diámetro, la partícula más larga será de 15 mm. En muchos casos esta restricción obliga a introducir la molienda previa del material, obviamente la paja de caña requerirá de su molienda previa para la producción de briquetas y pellets.

La densificación que se produce durante la formación de briquetas comprende dos procesos bien definidos:

- La compactación volumétrica bajo presión del material disperso que aumenta su densidad.
- La aglomeración o aglutinación del material que permite que el mismo mantenga su compactación como producto.

Tres factores inciden y regulan este proceso:

- La composición física y química del material.
- La presión dinámica.
- La temperatura interna del proceso y externa (en el dado).

Por lo general, las biomásas residuales como compuestos ligno-celulósicos, aportan la lignina propia como aglutinante, no comportándose así el aserrín que necesita de un aglutinante para que mantengan sus propiedades como sólidos compactados durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión.

La temperatura, dependiendo de la briqueteadora, se relaciona con la presión debido a la fricción interna entre las partículas y con la pared del dado y algunas veces se usan fuentes externas de calor (se calienta el dado en su sección de entrada).

El que se use un aglutinante externo o no depende de la briqueteadora que se utilice y del material original. En máquinas de alta presión (>100 MPa), raramente se usa aglutinante externo, en medias presiones (5-100 MPa) depende del material y su compactación, en bajas presiones hasta 5 MPa siempre es necesario añadir aglutinante. Por ejemplo, cuando se calienta la madera (aserrín) sobre su rango de temperatura de plasticidad (165 °C) se pierde su elasticidad y se comprime más fácilmente.

La humedad, desempeña un importante papel en la densificación, ayuda a la transferencia del calor y mejora la plasticidad del material. Si el material está muy húmedo o muy seco las presiones necesarias se incrementan drásticamente.

Algunas veces se usan aditivos para facilitar el encendido uniforme y mejorar las características del combustible.

El uso de la biomasa como combustible no es una necesidad de los países pobres y subdesarrollados, sino de todos los países del mundo en la lucha contra la contaminación y por lograr el desarrollo sostenible. **(Combustibles sólidos de baja densidad) (4).**

I.2.5 Ventajas de las briquetas

Briquetas un combustible limpio y barato.

Restos de madera, virutas, etc. son desechos que ocupan un valioso espacio. Gracias a las briquetas compactas se rebajan los gastos de almacenaje y de transporte. Además es un combustible a almacenar muy seguro ya que el peligro de que las briquetas ardan por sí mismas durante su almacenaje es mínimo.

Un elemento a tener presente es el rendimiento en combustible quemado de las briquetas, siendo una característica muy importante que debe ser evaluada. Está definida como la razón entre la cantidad en peso de briquetas quemadas, y la máxima cantidad de material que puede ser quemado.

Elevado rendimiento en combustible quemado con valores de hasta el 98%.

“Al quemar un kilogramo de briqueta estamos ahorrando tres kilogramos de leña”.

I.3 APROVECHAMIENTO POTENCIAL DE LOS RESIDUOS DE MADERA EN LOS ASERRÍOS

La industria del aserrío tiene las posibilidades de producir con los desechos de los aserraderos y de las carpinterías (el aserrín) tableros contrachapados y de partículas, o podría brindar energía térmica mediante su combustión.

A lo largo de los años, muchos aserraderos han considerado los residuos de madera como un subproducto engorroso de la operación de aserrío, con su consiguiente eliminación para relleno de terrenos o incinerándolos en quemadores Wigwam. Sin embargo, estos dos destinos se han convertido últimamente en problemas ambientales contenciosos y, todo ello combinado con el

aumento de los costos energéticos, ha hecho que los dueños de aserraderos se hayan visto obligados a pensar seriamente en las ventajas de emplear los residuos como fuente alternativa de combustible: esto ha coincidido también con el aumento de la demanda de residuos como material para la fabricación de pastapapel y tableros, dado el aumento del costo de la madera sólida y su mayor competitividad.

Actualmente, la mayoría de las instalaciones de elaboración de la madera que se construyen en los países desarrollados incorporan quemadores de aserrín basto para ahorrar así determinados suministros costosos de combustibles fósiles.

I.3.1 Fuentes de residuos de madera

Puede afirmarse que de un árbol corriente, se obtienen menos de las dos terceras partes para su ulterior elaboración, mientras el tercio restante o se queda abandonado, se quema o lo recogen como leña los habitantes del lugar. Después de la elaboración, sólo un 28 por ciento del árbol se convierte en madera aserrada, quedándose el resto en residuos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Distribución de un árbol corriente apeado para madera de aserrío

Parte o producto del árbol	Proporción
	(%)
Dejado en el bosque:	
Copa, ramas y follaje	23,0
Tocón (excluidas las raíces)	10,0
Aserrín	5,0
Aserrío:	
Virutas, costeros y recortes	17,0
Aserrín y menudos	7,5
Pérdidas varias	4,0
Corteza	5,5
Madera aserrada	28,0
Total	100,0

Residuos forestales

No es raro que un 60 por ciento del total del árbol talado se quede en el bosque y que las especies no comerciales se dejen para corta y quema, o simplemente se talen y se dejen pudrir para facilitar el acceso a la extracción de árboles. Las prácticas de aserrar y escuadrar los rollizos en el

bosque en lugar de hacerlo en el aserradero hacen que se desperdicie del ocho al diez por ciento y de 30 a 50 por ciento, respectivamente.

Todos los residuos de la madera y su corteza, que se suelen denominar comúnmente aserrín basto debido al proceso de reducir el tamaño de los residuos en una "desmenuzadora" tienen valor como combustible, aunque se produce en una gran gama de tamaños con diverso contenido de humedad, como se indica en el Cuadro 10, y comprenden principalmente los siguientes:

- **Corteza**, que constituye de un 10 a un 22 por ciento del volumen total de la troza según tamaño y especie, y cuya eliminación puede suponer un grave problema a no ser que pueda utilizarse como combustible o eliminarse antes de la preparación de la troza.
- **Residuos secundarios**, como costeros, desperdicios de canteado, recortes, incluso de chapas, recortes de aserrío y de tableros de partículas, que cuando se reduce su tamaño se convierten en un combustible ideal, especialmente cuando están secos. También tienen valor de reventa como material para pasta y tableros de partículas.
- **Las almas**, procedentes de trozas para el desenrollado de chapas, y que se venden por lo general a los aserraderos como madera aserrada o como partículas o astillas para pulpa.
- **Aserrín**, que es el producto de todas las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, especialmente del aserrío, y que por lo general no se considera como material primario para la fabricación de pasta debido a su diminuto tamaño, aunque resulta aceptable para la fabricación de tableros de partículas.
- **Virutas de cepillado**, que proceden del dimensionamiento y alisado de la madera aserrada, de la madera contrachapada y de los tableros de partículas con cepillos durante la fase de acabado. Se consideran ideales para la producción de tableros de partículas y son excelentes para el caldeo de hornos y secadoras.
- **Lijaduras**, que se producen durante el lijado abrasivo de la madera aserrada, de los tableros contrachapados y de partículas durante la fase de acabado. Debido a su tamaño y a su bajísimo contenido de humedad se prestan muy bien al caldeo directo.
- **Residuos de tableros de partículas**, que son del orden de un cinco por ciento y que tienen escasa importancia en comparación con los que se producen en otras industrias mecánicas a

base de madera, pues en buena parte se reciclan dentro del proceso productivo. En realidad, los residuos procedentes del aserrío y de la fabricación de tableros contrachapados constituyen gran parte del material que sirve para los tableros de partículas.

I.3.2 Valor de los residuos madereros como combustible

Valor calorífico

Cuando se evalúan las propiedades de un material combustible en función de su utilización como tal, el valor calorífico, expresado en este documento como valor calorífico superior, es uno de los factores más importantes, que indica la cantidad de energía térmica que puede obtenerse quemando una unidad de masa del material.

El valor calorífico de la madera depende muchísimo de las especies y de la parte del árbol que se aproveche; varía entre 17 y 23 MJ/Kg. de madera en seco (MS); generalmente las coníferas tienen valores calóricos superiores a las maderas duras o frondosas, con un valor medio de 21 MJ/Kg. (MS) para maderas resinosas y 19,8 MJ/Kg. MS para otras maderas que se emplean. En efecto, hay escasísima variación en los valores caloríficos de las propias sustancias de la madera, siendo de 19 MJ/Kg. MS, por ser en efecto ésa la variación en el contenido de resina, con un valor calorífico de 40 MJ/Kg. MS, que corresponde a las diferencias en valores entre especies. Ese es el motivo por el que la corteza, con un alto contenido de goma y resina, suele tener un valor superior al de la madera.

Sin embargo, aunque el valor de combustible puede ser bastante sustancial en la madera seca, el valor calorífico depende de varios factores, a saber, el contenido de humedad, el tamaño de las partículas, el tipo y eficiencia del equipo de combustión que se emplee y el grado de funcionamiento y mantenimiento. Por eso, para formarse una idea cabal de los valores caloríficos de varias resinas de madera hay que tener en cuenta el contenido térmico unitario de los residuos según su contenido de humedad, junto con la eficiencia del proceso de transformación energética, que, según se indica en el Cuadro 9, ofrece un análisis comparativo que habrá de hacerse con otros combustibles alternativos (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Efecto del contenido de humedad en el valor calorífico neto de la madera comparado con el de otros combustibles

Combustible	Quemado valor calorífico bruto (MJ/Kg.)	Eficiencia de un quemador corriente (%)	Aprovechable valor calorífico neto (MJ/Kg.)
Madera al 0% de c.h.	19,8	80	15,8
" 10% de c.h.	17,8	78	13,9
" 20% de c.h.	15,9	76	12,1
" 30% de c.h.	14,5	74	10,7
" 40% de c.h.	12,0	72	8,6
" 50% de c.h.	10,0	67	6,7
Antracita	31,4	83	26,1
Lignito	26,7	80	21,4
Petróleo pesado	42,6	82,5	35,1
Petróleo ligero	43,5	82,5	35,9
Butano	49,3	79,0	38,9
Propano	50,0	78,7	39,4

I.3.3 Efecto del contenido de humedad y del tamaño de las partículas en los valores caloríficos

La madera cuando se extrae en el bosque tiene por lo general un contenido de humedad de un 50 a un 55 por ciento, aunque ese grado varía según la especie, edad y parte del árbol del que procede el material, según se trate de ramas, tronco, etc. Respecto a esta media se dan ulteriores fluctuaciones en las que influye la estación en la que se corta la madera y la forma en que se transporta al aserradero y se almacena allí.

Los almacenamientos en primavera y verano podrían causar una pérdida de humedad del 10 al 25 por ciento.

El contenido de humedad de los residuos industriales depende muchísimo de la fase del proceso en que se extraiga y si ha habido algún secado del producto antes de esa fase. Por ejemplo, las lijaduras de tableros contrachapados o tableros de partículas se sacan de la fábrica después de los secadores y de las prensas en caliente, cuando su contenido de humedad podría bajar hasta un 10 por ciento o menos, conforme se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Serie de características de residuos madereros corrientes

Residuos	Tamaño (mm)	Contenido de humedad (%)	Contenido de cenizas y suciedad (%)
Lijaduras	<1	2-10	0,1-0,5
Virutas	1-12	10-20	0,1-1,0
Aserrín	1-10	25-40	0,5-2,0
Corteza (desmenuzada)	1-100	25-75	1,0-2,0
Limpiezas de apiladeros de trozas	hasta 100	40-60	5,0-50
Residuos forestales de agujas a tacones		30-60	3,0-20

I.3.4 Reducción de tamaño y selección

Mientras el aserrín, las virutas y las lijaduras pueden quemarse directamente sin necesidad de ulterior tratamiento, hay otras formas de residuos madereros que tienen que reducirse de tamaño para facilitar su manipulación, almacenamiento y su paso regulado a la cámara de combustión. Si se consigue un tamaño uniforme de partículas, se mejorará la eficiencia de la combustión debido al ritmo uniforme y controlado de entrada de combustible y a la posibilidad de regular el paso del aire. Además, en el caso de combustibles con gran contenido de humedad, el proceso de reducción expone una mayor parte de la superficie de la partícula a los gases de caldeo, liberando así la humedad más rápidamente, con lo que se refuerza su valor calorífico.

La reducción del tamaño puede realizarse en varias etapas con una desmenuzadora o una trituradora, procediéndose al cribado antes y entre estas operaciones.

Secado del combustible

Como ya se ha indicado, la eficiencia de la combustión, el control de los parámetros de trabajo y la capacidad del operador para responder rápidamente a los cambios del régimen de trabajo en hornos o calderas resultan muy difíciles de controlar cuando el contenido de humedad en el combustible es elevado y fluctuante. Estas situaciones pueden mejorar si se seca el combustible, lo que también repercutirá en un incremento de la capacidad de trabajo y dará lugar a un mejor control de la emisión.

La humedad de los residuos puede reducirse mediante prensado mecánico, secado al aire o el empleo de secadores de aire caliente, o combinando los tres procedimientos. La práctica comúnmente seguida es que las prensas mecánicas se empleen en las cortezas y residuos de

madera con niveles de humedad superiores al 70 por ciento para reducirlo al 55 ó 60 por ciento de c.h., lo que permitiría entonces que el residuo se mezclara con los materiales que entran en la secadora para producir así un elemento combustible. Ahora bien, en el caso de que se disponga fácilmente de suficientes suministros de residuos de madera para cubrir las necesidades energéticas de la planta, y la eliminación de las cortezas no suponga un grave problema para el aserradero, entonces no estaría justificado económicamente que las cortezas se sometan a prensado y secado dada su necesidad de mantenimiento, la demanda de energía y las instalaciones de gran intensidad de capital que harían falta para ello.

El secado al aire de los residuos de la extracción de madera de los bosques, suponiendo que predominen unas condiciones climáticas adecuadas, puede producir una pérdida de humedad de un 10 a un 15 por ciento, que puede incluso bajar aún más al 25 por ciento si los residuos se dejan en espacios sin árboles expuestos a la acción del viento y del sol. El secado al aire de los residuos industriales, siempre que lo permitan el tiempo y el espacio, es preferible que se haga en zonas cubiertas y bien ventiladas, especialmente para los residuos de menor tamaño como el aserrín, que es más propenso a absorber el agua de lluvia y necesita más tiempo para secarse al aire que los residuos de madera mixtos. **(Aprovechamiento Potencial de los Residuos de madera para la Producción de Energía)(9).**

I.4 LA FABRICACIÓN ARTESANAL DE LADRILLOS

La parte más compleja del proceso artesanal de elaboración de ladrillos, desde el punto de vista de su impacto sobre el medio ambiente, se centra en su cocción y principalmente, en la combustión del horno. Este consiste en hacer arder leña contenida en las troneras. Dada la mala ventilación de éstas, se produce un fuego carente de oxígeno, lo que provoca abundante emisión de humos y olores de leña mal combustionada. De acuerdo al tamaño del horno, se procede a cerrar las troneras, de manera que se produzca un tiraje de calor hacia las capas superiores. Es aquí donde se producen emisiones de vapores de agua del ladrillo y olores de emisiones del carbón. **(Comisión Nacional de Medio Ambiente 2001) (7)**

En la actualidad se estudia en algunas zonas de nuestro país la producción artesanal de ladrillos, empleando residuos de la industria forestal como el aserrín. En tal sentido se estudia la producción de bloques sólidos combustibles, que en algunos casos han sido usados para quemar ladrillos en forma experimental, sin llegar todavía a obtener los resultados necesarios para su

generalización. Uno de los lugares donde más se ha avanzado en el empleo de los bloques sólidos combustibles es en la cooperativa "Joaquín Bernal" en Manicaragua, Villa Clara, donde los fabricantes de ladrillos artesanales pretenden reemplazar el uso de leña en el horno por briquetas de aserrín, y adoptar medidas tendentes a mejorar las condiciones de higiene y seguridad en esta actividad. El proveedor de aserrín en este caso será la Unidad Básica de Producción Aserrío "Víctor Martínez" de Manicaragua. La fabricación de ladrillo es una actividad productiva que, además de dar sustento a muchas familias en el país, genera un insumo básico para la construcción.

I.4.1 Ladrillos rojos

En función del régimen térmico del horno donde se realice la quema de los ladrillos, éstos variarán sus propiedades. El régimen térmico además de la operación del horno dependerá del combustible que se emplee, pero en cualquier situación deberá garantizarse que el producto final cumpla con las Normas Técnicas para la Calidad.

Los requisitos obligatorios que imponen las normas son alternativamente evaluar la resistencia a la compresión o la densidad. Si sólo se evalúa la densidad del ladrillo, ésta debe tener un valor mínimo de 1.5 gr./cm³ en la clase I, y 1.6 gr./cm³ en la clase II. Si sólo se evalúa la resistencia a la compresión, ésta debe tener un valor mínimo de 60 N/cm² en la clase I y 60 N/cm² en la clase II. La clase III, exige ya como requisito una resistencia mínima a la compresión de 95 N/cm² y simultáneamente una densidad mínima de 1.6 gr./cm³, lo cual en caso de ladrillos artesanales es muy difícil de conseguir. Si bien parece más fácil evaluar la densidad que la resistencia a la compresión, las normas especifican las metodologías a seguir para determinarla, lo que incluye tener balanzas de 0.5 gr. de precisión y muflas (hornos), así como accesorios. Ello nos obliga a recurrir a laboratorios. "En el Perú el costo de cada ensayo varía de 27 a 45 dólares, pues se requiere de tres a cinco ladrillos como lote mínimo para determinar valores promedios. Evaluaciones aproximadas de la densidad efectuadas por ITDG, indican que en los últimos ensayos, la metodología de quema tradicional mixta (carbón en la carga y leña en el encendido), produciría ladrillos de clase III; mientras que la tecnología que viene adaptando ITDG (carbón en la carga y briquetas de carbón en el encendido), produciría ladrillos de clases I y clases II. Los resultados de laboratorio confirmaron que la calidad de los ladrillos obtenidos con la segunda

alternativa de encendido para la quema es superior, según se aprecia en la siguiente tabla, sin embargo es conveniente confirmar estos resultados preliminares con evaluaciones posteriores.

Tabla 5. Ensayos de rotura a la compresión

Muestras	Carga promedio de rotura a la compresión
Encendido con briquetas (04 muestras)	122 Kg/cm ²
Encendido con leña 1 (02 muestras)	59 Kg/cm ²
Encendido con leña 2 (03 muestras)	93 Kg/cm ²
Encendido con leña 3 (03 muestras)	82 Kg/cm ²

I.5 ASPECTOS FUNDAMENTALES ACERCA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de un experimento es el procedimiento de selección del número de vías y condiciones suficientes y esenciales para dar solución a un problema planteado con la precisión requerida, brindando un error en la determinación de los efectos de interés mucho menor que otro método.

Es frecuente que los científicos necesiten enfrentarse a numerosos problemas relacionados con la realización de experimentos más o menos costosos y complejos con el objetivo de obtener información sobre el sistema en estudio. Muchos son los ejemplos que pueden citarse al respecto: condiciones de realización de un experimento, la influencia de factores sobre las propiedades físico-químicas de un producto, y otras. En la mayoría de estos problemas, se investiga cómo influyen diferentes condiciones de obtención sobre una propiedad o característica del sistema investigado.

I.5.1 La importancia del diseño experimental

La importancia de un diseño de experimento radica en que disminuye, de forma considerable, la inversión de tiempo, recursos materiales y humanos, estudia la variación simultánea de las variables determinantes del proceso, utiliza un aparato matemático que formaliza muchas acciones del experimento (planificación, preparación y realización) y brinda estrategias claras luego de tomar decisiones sustentadas a partir de cada serie de experimentos.

Para realizar un diseño de experimento es necesario conocer el objeto de investigación, para lo cual se establece un método cibernético que consta de los parámetros de optimización y de los factores.

Un parámetro de optimización debe ser:

- Efectivo desde el punto de vista investigativo;

- De naturaleza universal;
- Cuantitativo y expresado mediante un valor único;
- Efectivo estadísticamente;
- Con un significado simple y fácil de calcular;
- Existente para todos los estados distinguibles.

I.5.2 Algunos conceptos generales relacionados con el diseño factorial experimental

Factor: Las variables independientes que influyen o pueden influir sobre el proceso investigativo determinado son conocidas con el nombre de factores.

En un proceso de obtención de las briquetas los factores pueden ser: la presión, el tiempo al que permanezca comprimida la briqueta a la $P_{máx.}$, la cantidad de aglutinante, etc. Las variables son designadas con la letra **X**, o sea: x_1, x_2, \dots, x_n , correspondientes a los factores 1, 2, ... n respectivamente.

Función respuesta: Cuando se realiza un experimento, los resultados se expresan a través de una o más variables dependientes, por ejemplo en la obtención de las briquetas, las variables son: la resistencia obtenida para su manipulación, el valor calórico, la densidad, el tiempo de secado y sus propiedades para la combustión entre otros. Estas propiedades que generalmente constituyen el blanco u objeto de estudio, son conocidas como función respuesta y se representan con la letra **Y**. La función respuesta es función de los factores y puede expresarse como:

Tabla 6. Matriz factorial

$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
 $N = 2^3$
 Niveles (X_1, X_2, X_3)
 Con 3 réplicas

	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	1	-1	1
3	1	1	-1
4	1	-1	-1
5	-1	1	1
6	-1	-1	1
7	-1	1	-1
8	-1	-1	-1

Nivel del factor: Es el valor que puede tomar un factor; y el conjunto de factores que condicionan una vía.

Superficie de nivel: La forma geométrica de la función respuesta como función de los factores, es conocida como superficie de nivel.

Espacio factorial: Se denomina así al espacio comprendido por los ejes del sistema de coordenadas en que se representan los valores de los factores.

Reproducibilidad de los experimentos: Es necesario que los experimentos sean reproducibles. De no ser así, o de tener el experimento baja reproducibilidad no se llegará a conclusiones muy útiles en cuanto a la optimización del proceso experimental.

Con el objetivo de verificar la reproducibilidad de los experimentos se realizan varias series de determinaciones paralelas en la región del espacio factorial que se investiga y sus dispersiones pueden ser comparadas.

Modelo matemático: Un modelo matemático es una ecuación o sistema de ecuaciones que relaciona la función respuesta con los factores que influyen sobre éste. En ocasiones, el modelo matemático es denominado descripción matemática.

Con la ayuda de los métodos matemáticos de diseño óptimo de experimentos, es posible obtener un modelo matemático de cualquier proceso físico-químico, sin tener ningún dato sobre el mecanismo del proceso.

El modelo matemático, descripción matemática o modelo estadístico experimental, no es más que una ecuación de regresión que se obtiene a partir de datos experimentales. **(Metodología de la Investigación 2003) (20).**

Capítulo II

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



CAPÍTULO II. PARTE EXPERIMENTAL. EL BSC Y LA MADERA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA.

Generalidades

La fabricación de ladrillos de forma artesanal es una gran consumidora de leña y en algunos casos de combustibles fósiles, sin alcanzar los niveles de producción de los grandes productores industriales, pueden debido a su baja eficiencia contribuir de forma importante a la degradación del medio ambiente si no se toman las medidas adecuadas para evitar una deforestación incontrolada.

Encontrar variantes para mejorar la eficiencia de los hornos artesanales ya sea buscando combustibles alternativos y/o mejorando las condiciones de la combustión y con ello disminuir el consumo específico de combustible por ladrillo, puede ser una vía para disminuir el costo económico y sobre todo de daño al medio.

El Bloque Sólido Combustible (BSC) consiste en biomasa densificada, aserrín en este caso, empleando además baja energía de compactación y un material aglomerante, para evitar así el uso de complejos y costosos equipos que han sido desarrollados para la fabricación de pellets y briquetas en varias entidades alrededor del mundo. (Ver anexo 1.)

La determinación de los parámetros del BSC, su uso como alternativa y su comparación con la leña es el principal objetivo de este capítulo.

II.1 EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de la investigación se emplean fundamentalmente dos tipos de materias primas, la biomasa y el aglutinante.

En primer término dentro de la biomasa se estudiaron las diferentes maderas: guásima, guanina, guabán, ateje y marabú, que actualmente se emplean para la quema de los ladrillos en la zona de Manicaragua, municipio de la región central de Villa Clara (Ver anexo 9), también se trabaja con el aserrín procedente del Aserrío "Víctor Martínez" de la misma zona.

Los análisis se realizan en el laboratorio químico del CEETA para determinar las características físico-químicas de estos materiales.

II.1.1 Estudio de las maderas utilizadas más comúnmente en la región

La carga para una quema de ladrillos en un horno tradicional de la región, tomado como piloto, se realiza sin estar predeterminada sus características y dependen de la leña que sea autorizada a cortar en cada ocasión o se obtenga por variadas vías. El marabú no requiere de autorizaciones expresas pues constituye un arbusto indeseable en los campos y cortarlo resulta beneficioso para la agricultura y la ganadería, sin embargo a pesar de sus buenas características como leña combustibles es incomoda su obtención y los leñadores no la prefieren.

No obstante los horneros con su experiencia personal logran preparar una carga más ó menos que les permita quemar satisfactoriamente el horno y obtener en el tiempo estimado por ellos una carga de ladrillos con calidad adecuada.

En la Tabla 7 se exponen los valores de humedad obtenidos en el laboratorio para leña cortada y lista para usarse como combustible en el horno. El alto contenido de humedad que presenta se debe a que las maderas que son utilizadas como combustible en el horno ladrillero, son cortadas de 4 a 5 días máximo antes de ser utilizadas.

Tabla 7. Humedad en las maderas

Muestras	Peso húmeda (g)	Peso seca (g)	Humedad %
Guásima	122.8	68.22	44.45
Guanina	112.2	69.9	37.70
Guabán	125.3	63.9	49.00
Ateje	52.2	21.9	58.05
Marabú	109.8	70.56	35.74

En la Tabla 8 se presenta una carga típica preparada para ser introducida al horno.

Tabla 8 Maderas utilizadas en la quema.

Maderas que se quemaron			
Tipo	%	lb.	Kg.
Guásima	15	990	450
Guanina	25	1650	750
Marabú	60	3960	1800
Total	100	6600	3000

Estos valores pueden variar, sin embargo de acuerdo a los horneros entrevistados y muestras obtenidas en varias cargas monitoreadas se trata de mantener esta proporción, pues el encendido, mantenimiento y enfriamiento del horno, requieren en cada ocasión de un nivel de llama más ó menos violento.

En la Tabla 10 se resume el poder calórico aportado en promedio por la carga de leña usada en este caso y también la energía total aportada en este caso

Tabla 9. Tiempo vs. carga del horno de ladrillos artesanal tradicional.

Hora	Carga	
minutos	lb.	Kg.
AM	0.0	0.0
6:00:00	600.0	272.7
7:00:00	600.0	272.7
8:00:00	600.0	272.7
9:00:00	600.0	272.7
10:00:00	600.0	272.7
11:00:00	600.0	272.7
Sub. Total	3600.0	1636.36
11:45	600	272.73
12:45	600	272.73
1:45	600	272.73
2:45	600	272.73
3:45	600	272.73
Sub. Total	3000	1363.64
Total	6600.0	3000.00

Nota: 9.5 horas totales de quema, sin modificaciones de ningún tipo.

Tabla 10 Poder calórico promedio y total aportado por la leña.

Tipo	%	Kg.	PCS (KJ/Kg.)	Aporte KJ
Guásima	15	450	18.53	8631
Guanina	25	750	16.84	14085
Marabú	60	1800	18.68	33858
Total	100	3000	18.02	56750

II.1.2 Potencia consumida por un horno tradicional usando leña como combustible

La potencia consumida por un horno, por supuesto, depende de muchos factores que en los hornos industriales son muchas veces controlados por equipos de laboratorio y control automático. Se puede controlar en esos casos sin mucho margen de error la humedad ó contenido de agua inicial de los ladrillos, la temperatura del horno en cada momento y con ello la duración

total de la quema, sin embargo los ladrilleros tradicionales y en base a la práctica de años de quehacer, logran de acuerdo al sonido del ladrillo seco determinar si tienen la humedad óptima para pasar al horno. Por supuesto el secado de estos ladrillos al aire depende de la humedad relativa de los días corrientes por lo que ellos estiman esto, la duración e intensidad de la quema también es estimada en base a la experiencia pero ya ha sido determinado de forma empírica el tiempo y la cantidad de leña a consumir para un horno como el que se describe en la Tabla 9.

En la Tabla 11 se muestra la variación de la temperatura con el tiempo y la carga en un horno tradicional, igualmente esto se grafica en el Gráfico 1

Tabla 11. Variación de la temperatura de los gases de salida vs. tiempo vs. carga acumulada del horno

⁰ C	Kg.	H. min.	⁰ C
T1	C	t	Gases de salida
24	272.5	0.0	24.0
30	545.2	1.0	24.6
64	818.0	2.0	231.4
120	1090.0	3.0	351
363	1363.0	4.0	488.3
800	1636.0	5.0	462.5
825	1908.0	6	585.9
883	2181.0	7.00	750.4
941	2454.0	8.00	801.3
891	2727.0	9.00	871.9
956	2999.0	10.00	860.8

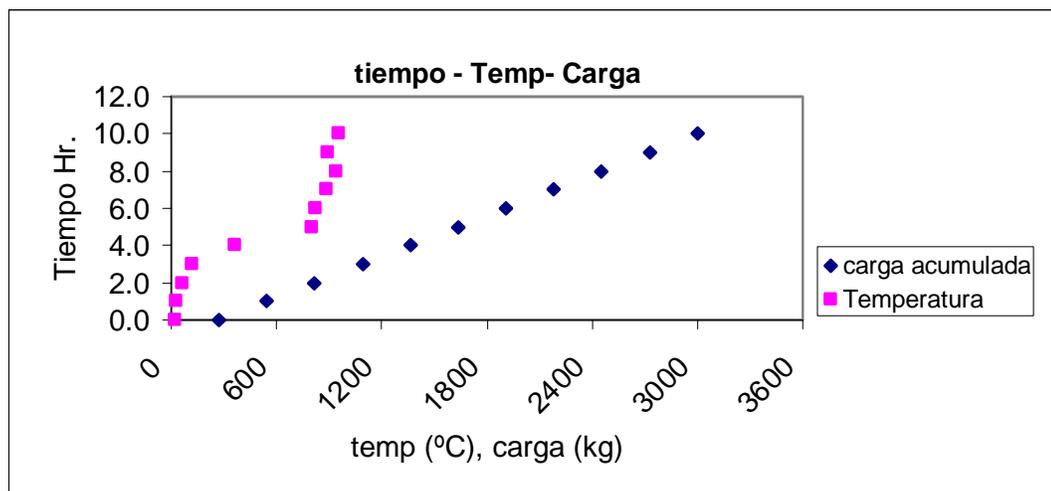


Gráfico 1.

II.2. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA

II.2.1. Análisis inmediato

El análisis inmediato caracteriza a las muestras en términos de sus contenidos de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas. En este trabajo, se llevó a cabo el análisis inmediato de maderas como la Guásima, Guanina, Guabán, Ateje, Marabú y Aserrín de Pino, así como de los BSC obtenidos, siguiendo las normas ASTM que se detallan a continuación.

Procedimiento según Normas ASTM

Humedad (ASTM D-3175-73)

Se calienta la muestra en estufa a 120°C hasta llegar a peso constante. Los resultados obtenidos se informan sobre la muestra original.

Volátiles (ASTM D-3175-77)

La muestra contenida en un crisol tapado, para simular atmósfera inerte, se calienta durante siete minutos a $850 \pm 10^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos se informan en base seca.

Cenizas (ASTM D-3174-73)

Se coloca la muestra en una mufla a temperatura ambiente y se calienta hasta llegar a una temperatura de 900°C en 4 horas, procurando una atmósfera oxidante durante toda la experiencia. El calentamiento se realiza gradualmente con el objeto de evitar pérdidas de muestra debido a una rápida expulsión de volátiles. Los resultados obtenidos se informan en base seca.

Carbono fijo

El mismo se obtiene por diferencia según:

$$\text{Carbono Fijo (\%)} = 100 - \text{Humedad (\%)} - \text{Volátiles (\%)} - \text{Cenizas (\%)} \quad (\text{II.1.})$$

Estos resultados se informan en base seca.

II.2.2 Análisis elemental

Se estimó el análisis elemental de las muestras de madera, a fin de determinar el contenido porcentual de los elementos carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno de las mismas. Los resultados del análisis elemental se informan libres de humedad y cenizas. La estimación se realizó mediante las correlaciones reportadas por (Villegas Aguilar, P. J., 2000.) (35), obtenidas para diferentes residuos biomásicos, las cuales se detallan a continuación:

$$\%C = \frac{168.71 - \%V}{1.8174} \quad (\text{II.2})$$

$$\%O = -0.9298 \%C + 88.893 \quad (\text{II.3})$$

$$\%H = -0.1035 \%C + 10.596 \quad (\text{II.4})$$

$$\%N = \frac{\%V + 0.093 (\%C) - 6.993 (\%H) - 0.479 (\%O)}{23.378} \quad (\text{II.5})$$

Poder calorífico

$$\text{PCS (kJ/kg)} = 341.53\% C + 1325.25\% H + 68.83 - 15.33\% A - 120.06 (\%O + \%N) \quad (\text{II.6})$$

II.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA

Se tomaron muestras de las maderas que actualmente se utilizan como combustible en el horno ubicado en Manicaragua para someterlas a los análisis químicos antes referidos, con el objetivo de su comparación con los BSC.

II.3.1 Resultados de los análisis

En las tablas 12 y 13 se muestran el análisis inmediato, elemental y el poder calorífico aportado en este caso por la leña y en la tabla 11 el desarrollo típico de una quema con leña.

Tabla 12. (1) Peso total de la muestra seca. (2) Pérdida de peso, análisis de los volátiles. (3) Peso de la ceniza. (4) Peso total de la muestra en condiciones de equilibrio, humedad del medio.

	Guásima		Guanina		Guabán	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
Humedad (1)	0.0633	6.15	0.0725	6.96	0.0660	6.597
Carbono Fijo (2)	0.1916	18.61	0.1637	0.157	0.2086	20.85
Volátiles (3)	0.7545	73.29	0.7942	0.763	0.7063	70.59
Cenizas (4)	0.0201	1.95	0.0111	0.011	0.0196	1.959
Peso Total (5)	1.0295	100	1.0415	100	1.0005	100

Tabla 12. (Continuación)

	Ateje		Marabú		Biomasa aserrín de Pino	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
Humedad	0.0609	5.65	0.0481	4.682	0.0767	7.53
Carbono Fijo	0.2346	21.77	0.1668	16.24	0.1216	11.94
Volátiles	0.7471	69.34	0.7994	77.81	0.8154	80.07
Cenizas	0.0348	3.23	0.0131	1.28	0.0047	0.46
Peso Total	1.0774	100	1.0274	100	1.0184	100

Tablas 13. Análisis inmediato, elemental y poder calórico de las maderas.

Muestras	%W	%Vv	%A	%Cf	%C	%O	%H	%N	PCS (MJ/Kg.)
		(lh)	(lh)	(lh)	(lhc)	(lhc)	(lhc)	(lhc)	
Guabán	6.15	78.09	2.08	19.83	50.43	43.02	5.5	1.05	19.26
Guanina	6.96	81.96	1.15	16.89	48.22	44.96	5.71	1.1	18.56
Guásima	6.6	75.58	2.1	22.32	51.87	41.75	5.36	1.02	19.72
Marabú	5.65	73.5	3.42	23.08	53.06	40.7	5.24	0.99	20.08
Ateje	4.68	81.63	1.34	17.03	48.41	44.8	5.69	1.1	18.61

Los análisis se hicieron inmediatamente después que las maderas tomaran la humedad de equilibrio, después de secarse en una estufa a 120⁰C

II.3.2 Procedencia de la biomasa para los BSC

En este trabajo la biomasa a utilizar para la fabricación de los BSC es el aserrín; una condición importante para su utilización es que sea una fuente de abasto económica por lo tanto es importante determinar los volúmenes que pueden estar disponibles así como que se encuentren relativamente cerca de los lugares de producción de los BSC para minimizar todos los costos.

El aserrín se obtuvo en el Aserrío "Víctor Martínez" ubicado en Manicaragua y fue generado en el aserradero y en la carpintería del mismo. En las tablas que se presentan a continuación se ofrecen los datos obtenidos en una visita efectuada a la referida unidad comprometida con el suministro del aserrín para la producción de los BSC y con ellos los ladrillos producidos en cooperativas de la región.

Tabla 14. Capacidad productiva del aserrío

Capacidad Productiva del aserrío		Real	Potencial
Días laborables al año	m ³ /día	6	10
281	m ³ /año	1686	2810

Tabla 15. Maderas procesadas en el año 2004

N°	Madera	Clasificación	Cantidad procesada		Aserrín
			m ³	%	m ³
1	Pino	Conífera	1303	80.97%	234.54
2	Cedro	Preciosa	130.99	8.14%	23.58
3	Caoba				
4	Teca				
5	Cocote de toro	Dura	77	4.78%	13.86
6	Cuajaní				
7	Eucalipto	Semidura	63.56	3.95%	11.44
8	Algarrobo				
9	Zapatón				
10	Jagüey	Blanda	34.78	2.16%	6.26
11	Piñí				
Total			1609.33	100.00%	289.68

Nota: % de Aserrín por m³ de madera (17-20%) (23)

Tabla 16. Consumo de energía por m³ de madera procesado en el 2004

Días	Mes	Año	Madera procesada (m ³)	Energía Consumida (Kw.-h)	Índice de consumo mensual (Kw.-h/m ³)
Trabajados	01	04	49	818	16.63
Trabajados	02	04	108	684	6.31
Trabajados	03	04	50	524	10.54
Trabajados	04	04	159	644	4.05
Trabajados	05	04	29	352	11.97
Trabajados	06	04	18	535	29.72
Trabajados	07	04	56	419	7.48
Trabajados	08	04	53	396	7.47
Trabajados	09	04	60	328	5.47
Trabajados	10	04	50	536	10.72
Trabajados	11	04	62	744	12.00
Trabajados	12	04	77	778	10.16
Anual			771	6758	8.76
Trabajados	01	05	62	839	13.53
Trabajados	02	05	77	1320	17.23

Tabla 17 Consumo de energía por m³ de madera procesado Enero y Febrero del 2005.

Día	Mes	Año	Madera procesada (m ³)	Energía Consumida (Kw.-h)	Índice de consumo mensual (Kw.-h/m ³)
5	01	05	1.6	60	37.50
6	01	05	9	20	2.22
8	01	05	4.4	40	9.09
13	01	05	5.4	24	4.44
15	01	05	5.3	20	3.77
17	01	05	1.5	4	2.67
19	01	05	4.7	40	8.51
20	01	05	3.2	28	8.75
21	01	05	4	40	10.00
22	01	05	2.6	36	13.85
25	01	05	3	32	10.67
26	01	05	2	32	16.00
27	01	05	1.7	52	30.59
28	01	05	6.5	60	9.23
29	01	05	2.3	36	15.65
Subtotal			57.2	524	9.16
Días sin produc.			0	315	-
Total enero			57.2	839	14.67

Tabla 18 Para el mes de Febrero.

Día	Mes	Año	Madera procesada (m ³)	Energía Consumida (Kw.-h)	Índice de consumo mensual (Kw.-h/m ³)
1	02	05	2.1	24	11.43
8	02	05	5.8	80	13.79
9	02	05	5	80	16.00
10	02	05	4.5	120	26.67
11	02	05	5.4	80	14.81
12	02	05	6.2	80	12.90
13	02	05	4.4	64	14.55
15	02	05	4.7	40	8.51
16	02	05	9.4	80	8.51
17	02	05	7.5	80	10.67
18	02	05	7.9	80	10.13
21	02	05	9.8	120	12.24
23	02	05	7.5	40	5.33
Subtotal			80.2	968	12.07
Días sin produc. madera			0	352	-

Con el fin de conocer la energía consumida en el proceso de serrado de la madera, se realizó el siguiente análisis, tomando como base los datos el consumo de energía/madera serrada de los días del mes de enero y febrero del 2005 en que se serró madera. Puede concluirse que no existe una correlación proporcionada entre el consumo de energía y el volumen de madera serrado, dado por un elevado consumo de energía no asociado directamente al proceso y a que dicho consumo resulta muy variable; sin embargo si se seleccionan de la muestra de datos aquellos en que se verifica una correlación aceptable, puede establecerse una relación consumo de energía/madera serrada con una buena aproximación y conocer el gasto neto de energía para serrar 1 m³ de madera, así como la energía consumida y no relacionada directamente al proceso, según puede observarse en el Gráfico 2.

- La selección de datos tomada para el estudio de la correspondencia consumo de energía/madera serrada en el Gráfico 2 muestra una buena correlación con un nivel de confianza del 94%, lo que permite aceptar como válida la relación:
- $Y = 9.13X + 1.8125$
- Donde: Y- Consumo total de energía en Kw.-h; X- Volumen de madera serrada en m³
- El término independiente 1.8125 es el valor del consumo de energía no asociado directamente al serrado de la madera.
- El consumo de energía neto para serrar un m³ de madera en este aserrío tiene un valor de 9.13 Kw.-h, es decir el índice de consumo es de 9.13 Kw.-h/m³

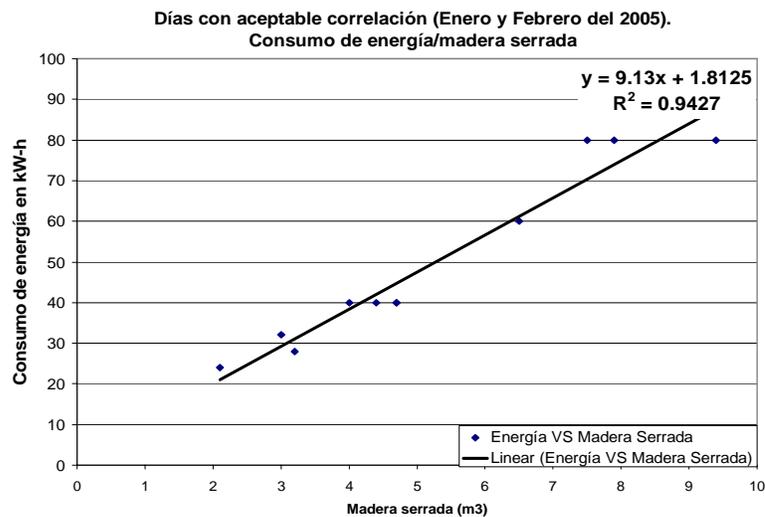


Gráfico 2. Consumo de energía por madera serrada

II.3.3 Propiedades físicas del aserrín

En la Tabla que se presenta a continuación se brinda la caracterización granulométrica del aserrín empleado en la preparación de los BSC. Como puede apreciarse, la mayor fracción de partículas está por debajo de 2.5 mm, donde se encuentra más del 85% del material analizado. Con este tamaño de partículas y (20 o 10 %) de arcilla obtenemos una resistencia dada en el BSC, para aumentar dicha resistencia se tiene que aumentar el por ciento de arcilla en la mezcla.

Tabla 19. Caracterización granulométrica del aserrín

Intervalo de diámetro de partícula (mm)	Por ciento
$d \geq 20.4$	0.68
$20.4 \geq d \geq 11.1$	1.02
$11.1 \geq d \geq 7.93$	0.68
$7.93 \geq d \geq 5.66$	3.06
$5.66 \geq d \geq 4.00$	0.68
$4.00 \geq d \geq 2.50$	8.50
$2.50 \geq d \geq 0.84$	60.54
$0.84 \geq d$	24.84

Tabla 20. Análisis elemental e inmediato del aserrín procedente de la fuente

Muestras	%W	%Vv (lh)	%A (lh)	%Cf (lh)	%C (lhc)	%O (lhc)	%H (lhc)	%N (lhc)	PCS (KJ/Kg.)
Aserrín de pino	7.53	86.59	0.5	12.91	45.58	47.29	5.97	1.16	17.72

II.3.4 Material aglutinante la arcilla

En la investigación se utilizó como aglutinante la misma arcilla que usan para la fabricación de los ladrillos con una humedad de un (2.3-2.5 % en peso) cuando se extrajo de la cantera. Esta cantera está a pocos metros del horno de ladrillos por lo que es ideal para su uso.

II.4 EMPLEO DE EXPERIMENTOS CONTROLADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL BSC

La elaboración de un BSC, depende de una serie de factores que deben ser controlados a fin de lograr los resultados deseados: los BSC a obtener deben cumplir varias exigencias:

Ser resistentes a la manipulación, a la compresión y principalmente tienen que ser buenos combustibles. El primer problema a resolver se trata de la combinación efectiva de los factores de los cuales depende la respuesta del experimento que se intenta controlar. Estando correlacionadas

directamente en todas las características de calidad referidas anteriormente, es posible montar en un solo experimento varias corridas experimentales para la determinación de la mejor combinación de los niveles de factores presentes. Estos factores son: por ciento de arcilla, presión de prensado y tiempo de retención.

II.4.1 Variante del diseño

Diseño factorial Fraccionado.

En total se tienen tres factores, un diseño factorial completo implicaría 3 corridas experimentales con 8 experimentos. Tal número de corridas resulta adecuado siempre y cuando se realicen **tres réplicas** (24 experimentos) para la consideración de los estimados centrales.

La matriz formada se representa en la Tabla 21. Cada uno de los niveles de los factores está representado por los números -1, y 1; correspondiendo con los niveles bajo, y alto, respectivamente.

Tabla 21. Matriz del diseño experimento (orden de ejecución). Variables de entrada X_1 , X_2 y X_3

	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	1	-1	1
3	1	1	-1
4	1	-1	-1
5	-1	1	1
6	-1	-1	1
7	-1	1	-1
8	-1	-1	-1

La matriz contiene un orden aleatorio de ejecución eliminando de esta forma la posibilidad de introducir errores debido a factores incontrolados. La ortogonalidad del diseño garantiza la posibilidad de analizar los efectos de los factores de forma independiente, por reducción y/o eliminación del efecto de las interacciones. Los niveles correspondientes a las variables de entrada para la fabricación de los BSC tienen los siguientes valores: Tabla. 22

Tabla 22. Variables de entrada.

		Contenido de Arcilla en mezcla (%)	Fuerza de prensado (Kg)	Tiempo de retención (Seg.)
Alto	1	20	2000	30
Bajo	-1	10	1500	15

II.4.2 Propuesta para la obtención de los BSC

La idea tecnológica estuvo basada en conformar y obtener, un BSC estable que se asemeje a los valores calóricos de las maderas utilizadas en el horno para la quema de los ladrillos rojos. Se hicieron pruebas y ensayos para obtener el BSC con mayor densidad y menor humedad, aplicándole una energía de compactación mínima.

Variantes de mezcla.

1. Arcilla más Agua durante 24 horas luego se le añade la biomasa y se mezcla hasta que quede bien homogéneo.
2. Arcilla más biomasa mezclada y luego se le añade agua hasta saturar la mezcla.
3. A la biomasa se le agrega agua hasta humedecerla y posteriormente añadir la arcilla pulverizada.

Se utilizó la variante 1 para la elaboración de la mezcla:

Las mezclas se hicieron en un recipiente metálico. Se mezcló la biomasa (aserrín) con el aglutinante (la arcilla) en estado húmedo (disuelta en agua) hasta lograr una homogenización, posteriormente se adicionó el agua hasta saturar la mezcla. Este método, según estudios realizados, es el más adecuado para lograr la homogenización así como un mezclado más eficaz. Al cabo de 24 horas se fabricaron los BSC con un tiempo de prensado de 2 minutos. Durante el tiempo que permaneció la mezcla en el recipiente se le revolvió tres veces. Se obtuvieron briquetas con un peso promedio de 1950 g acabadas de sacar del molde. A modo de conclusión podemos decir que producto de la saturación de la mezcla, la biomasa absorbió el agua necesaria, debilitando así su estructura, para facilitar de esta forma la entrada de mayor cantidad de mezcla en el molde. Haciendo énfasis en lo anteriormente dicho, podemos afirmar que con una misma cantidad de biomasa logramos fabricar menos bloques con la variante 1 que con la variante 2. Al realizar el prensado, escurrió agua llevando con ella algo del material arcilloso, que podría influir

en la resistencia de la briqueta. Podemos afirmar sin lugar a dudas que es inevitable que esto ocurra, aunque se podría contrarrestar si se le agregara a la mezcla un poco más de arcilla.

La relación tiempo de reposo-humedad en la mezcla es determinante; si la humedad es muy alta, entonces en la compactación se pierde gradualmente material arcilloso. En el caso contrario la mezcla resulta difícil de mover para lograr una buena homogenización y el peso real de la mezcla en el molde sería menor.

Características del dispositivo para compactar las briquetas.

Molde metálico con dimensiones fijas. Ver anexo 3.

- Diámetro 15 cm.
- Altura 16.5 cm.

II.4.3 Procedimiento metodológico empleado

Confección de los BSC.

Se trabajó con un 10% y un 20% de arcilla con respecto al peso total de la briqueta, analizándose distintas variables para obtener un bloque adecuado con las características deseadas según el diseño de experimento realizado. En todos los casos se utilizó la misma biomasa (aserrín de pino) con igual granulometría; igual aglutinante (arcilla) y el mismo molde para las briquetas, variando el por ciento de arcilla, la presión de compactación y el tiempo de retención en el molde, como se muestra en la Tabla 23. Las briquetas fueron fabricadas en una prensa hidráulica: Máquina Universal de Ensayos ZD-40 utilizando el dispositivo descrito anteriormente (Anexo 4), agregándose una cantidad de mezcla igual a 2.5kg aproximadamente. Como se muestra en los anexos 4,5 y 6.

A continuación se explica la metodología seguida para realizar el BSC en el laboratorio de Resistencia de los Materiales en la facultad de Ingeniería Mecánica.

En el laboratorio:

1. Primero se pesan las proporciones de cada materia prima a utilizar en la mezcla, se pesa el aserrín y de este peso se toma el correspondiente % de arcilla (10% y 20% en cada caso)
2. Se diluye la arcilla en agua y se deja podrir por espacio de 1 día. La proporción de agua arcilla es de 1: 1.5.

3. Una vez diluida la arcilla se le va agregando poco a poco a la biomasa y se le va añadiendo agua en caso que sea necesario para que la mezcla quede bien homogeneizada.
4. Después que la mezcla esté lista se deja por espacio de un día para que el aserrín se sature de humedad.
5. Al siguiente día se comienzan a fabricar los BSC.
6. Una vez acabado el prensado, se extraen las muestras y se ponen a secar, se consideran secas cuando pesándolas día a día alcanzan un peso constante, o la diferencia entre en una medida y la otra es menor de un 3 %.

El Anexo 11 muestra gráficamente la metodología empleada para la elaboración de los BSC.

II.4.4 Fabricación de las muestras

Mezcla 20 % de arcilla con respecto al peso total. Ver anexo 7

Datos iniciales:

Peso del Aserrín----- 12kg
 Peso del Agua----- 25.25kg
 Peso de la Arcilla-----3kg

Tabla 23.

TIPO BSC	Nº	Carga (Kg.)	Recorrido (mm.)	Tiempo de retención de la carga (seg.)	Tiempo total de trabajo (min.)	Agua + arcilla escurrida (g.)
1	1	1500	80	30	1.30	338
	2	1500	80	30	1.30	338
	3	1500	80	30	1.30	338
2	4	1500	80	15	1.28	179
	5	1500	80	15	1.28	179
	6	1500	80	15	1.28	179
3	7	2000	85	30	1.30	411
	8	2000	85	30	1.30	411
	9	2000	85	30	1.30	411
4	10	2000	85	15	1.28	252
	11	2000	84	15	1.28	252
	12	2000	85	15	1.28	252

Peso de la carga 2.50 Kg.

Peso de la briqueta acabada de sacar del molde 2kg. 2 de junio a las 12:30 PM

Total de agua + arcilla escurrida 67

Mezcla 10 % de arcilla con respecto el peso inicial. Ver anexo 8

Datos:

Peso del Aserrín----- 15 Kg.

Peso del Agua----- 36.4 Kg.

Peso de la Arcilla-----1.5 Kg.

Tabla 24.

TIPO BSC	Nº	Carga (Kg.)	Recorrido (mm.)	Tiempo de retención de la carga (seg.)	Tiempo total de trabajo (min.)	Agua + arcilla escurrida (g.)
5	1	1500	95	30	1.54	370
	2	1500	95	30	1.40	372
	3	1500	96	30	1.30	370
6	4	1500	95	15	1.30	317
	5	1500	95	15	1.40	317
	6	1500	95	15	1.20	317
7	7	2000	97	30	1.30	400
	8	2000	97	30	1.20	405
	9	2000	100	30	1.20	405
8	10	2000	100	15	1.20	300
	11	2000	100	15	1.20	300
	12	2000	105	15	1.20	300

Peso de la carga 2.45 Kg.

Peso de la briqueta al sacarla del molde 1.90 Kg. 3 de junio a las 12:30 PM

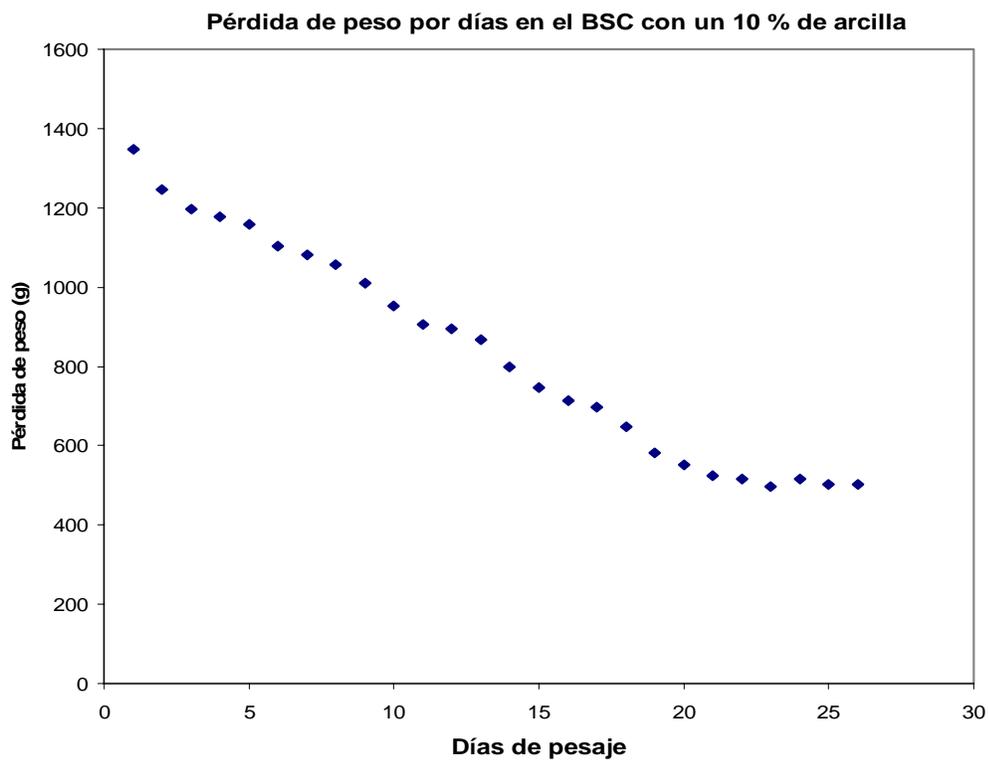
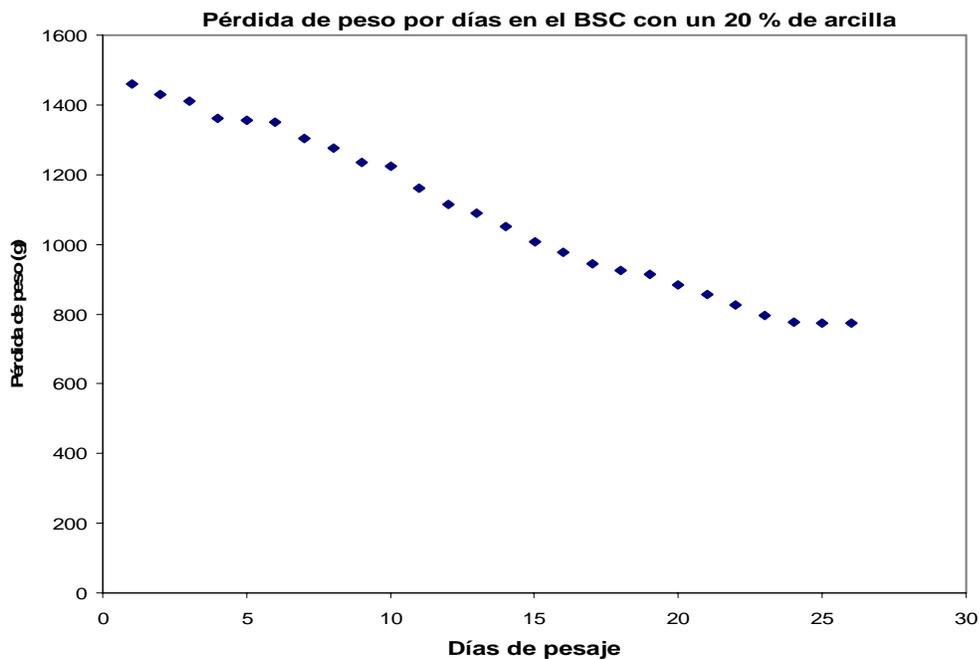
Total de agua + arcilla escurrida 5574g.

Tabla 25. Secado natural de las briquetas

Día del pesaje	20% de arcilla	10% de arcilla
12:00 PM	Peso de la briqueta (gr.)	Peso de la briqueta (gr.)
3/6/05	1460	1347
4/6/05	1430	1247
5/6/05	1410	1197
6/6/05	1360	1177
7/6/05	1355	1157
8/6/05	1349	1104
9/6/05	1303	1081
10/6/05	1275	1057
11/6/05	1234	1009
12/6/05	1225	952
13/6/2005	1160	907
14/6/2005	1113	894
15/6/2005	1089	867
16/6/2005	1050	800
17/6/2005	1006	747
18/6/2005	976	713
19/6/2005	945	696
20/6/2005	925	648
21/6/2005	914	583
22/6/2005	884	553
23/6/2005	856	525
24/6/2005	826	515
25/6/2005	795	498
26/6/2005	778	515
27/6/2005	774	501
28/6/2005	774	501

Nota: Todos los pesajes fueron tomados a las 12:00m

Gráficos 3 y 4 Disminución del peso por pérdida de humedad.



II.4.5 Ensayos de las muestras de los BSC confeccionados

Luego de la fabricación y secado de los BSC se le realizaron los ensayos de combustión para saber si se asemejan a los resultados obtenidos en las maderas, con el objetivo de lograr el aprovechamiento de las mejores características en los mismos.

Se tomaron 6 muestras de los BSC con mejores características físico-mecánicas y diferentes por ciento de arcilla, presión y tiempo de prensado. Para su posterior análisis.

Tabla 26. Análisis inmediato, elemental y poder calórico de los BSC

Variantes	C. arcilla en Mezcla %	%W	%Vv	%A	%Cf	%C	%O	%H	%N	PCS (MJ/Kg.)
			(lh)	(lh)	(lh)	(lhc)	(lhc)	(lhc)	(lhc)	
BSC T 1	20	9.39	85.2	14.58	0.22	46.59	46.81	5.92	1.15	17.84
BSC T 2	20	9.35	80.95	16.68	2.37	48.87	44.52	5.67	1.09	18.53
BSC T 3	20	9.18	80.27	16.33	3.4	49.29	44.21	5.63	1.08	18.68
BSC T 4	10	18.56	91.16	8.3	0.54	43.16	49.78	6.25	1.23	16.84
BSC T 5	10	18.7	89.6	10.3	0.1	44.15	49.11	6.18	1.21	17.13
BSC T 6	10	17	90.71	9.21	0.08	43.38	49.52	6.22	1.22	16.9

W: humedad,

Vv: volátiles;

Cf: Carbono fijo;

A: Cenizas;

lh: libre de humedad;

lhc: libre de humedad y cenizas;

Nota: Los resultados fueron obtenidos de forma experimental en el laboratorio químico del CEETA y se informan en base seca.

II.4.6 Evaluación de la combustión de los BSC

Rendimiento de la combustión.

El mismo se hizo tomando 8 muestras con diferentes características (Tabla 18) de aproximadamente un gramo y se colocaron en la Mufla a 500⁰C por espacio de 2 minutos con el objetivo de incinerarla, obteniendo por diferencia de peso el rendimiento de la combustión en los BSC.

$$R_c = \frac{m_f * 100}{m_i} \quad (II.7)$$

Tabla 27. Diseño experimento.

	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Réplica I	Arcilla %	Presión (Kg.)	Tiempo de perm. (Seg.)	Densidad Kg./m ³	PCS Mj./Kg.	Rendimiento de la comb. %
1	20	2000	30	962.1	18.48	96.03
2	20	1500	30	881.55	18.47	95.3
3	20	2000	15	1048.17	18.26	94.49
4	20	1500	15	963.17	18.68	95.7
5	10	2000	30	320.5	16.56	94.21
6	10	1500	30	320.69	17.81	96.93
7	10	2000	15	366.19	16.85	95.12
8	10	1500	15	341.51	17.24	95.26

II.4.7 Evaluación cuantitativa de la combustión de los BSC

En la Tabla 21, se reportan los valores medios de los diferentes análisis, llevados a cabo según se describió anteriormente. El estudio se realizó de manera comparativa a modo de corroborar con las mediciones prácticas lo inferido de las observaciones previas, así se reportan las composiciones de gases durante la combustión de la madera habitualmente empleada en esta instalación.

Resultados

- El BSC resultante tiene una proporción aproximada de aglutinante de un 10, 20%
- El por ciento de humedad en el BSC varía de 9 a un 18%.
- Los residuos de la combustión de los BSC representan entre un 8% y 16 % del peso inicial.

Capítulo III

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Introducción

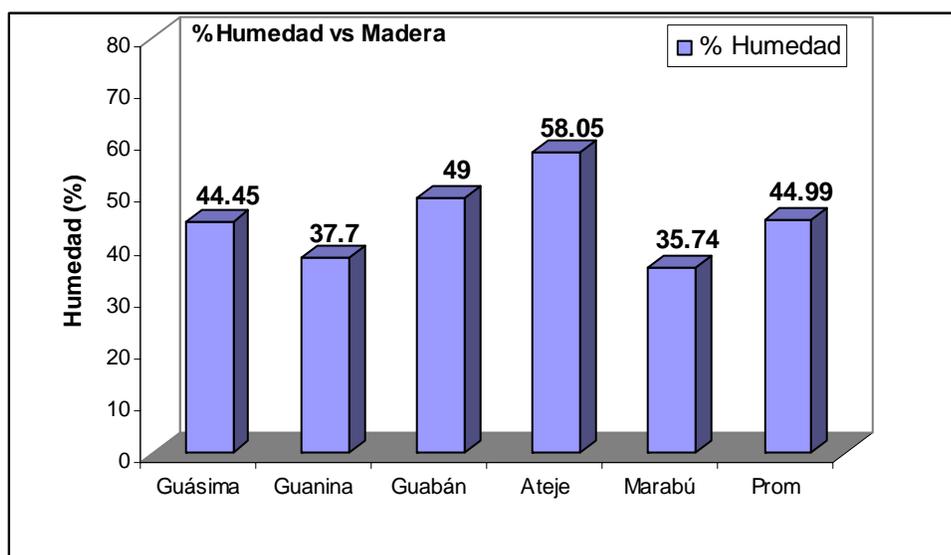
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del estudio de algunas propiedades de los BSC importantes en la determinación de la calidad de los mismos. Con este fin se realiza un análisis comparativo entre los BSC y la madera, tomando en cuenta para dicha comparación los resultados en cuanto a: el por ciento de ceniza, la humedad, y el poder calórico, entre otros.

III.1 LA HUMEDAD EN LAS MADERAS

Las maderas que generalmente se emplean por su abundancia y fácil acceso, citadas en el Capítulo 2 tabla 7, generalmente se acarrean en un período de 4 a 5 días antes de la quema en el horno, por lo que sus contenidos de humedad son bastante altos. Esto puede considerarse un aspecto negativo en los combustibles, pues una buena parte del calor desprendido durante la combustión se empleará en evaporar esa humedad sin que pueda recuperarse.

A continuación en el Gráfico 5 se muestra la humedad que presentan las maderas en el momento de su combustión.

Gráfico 5

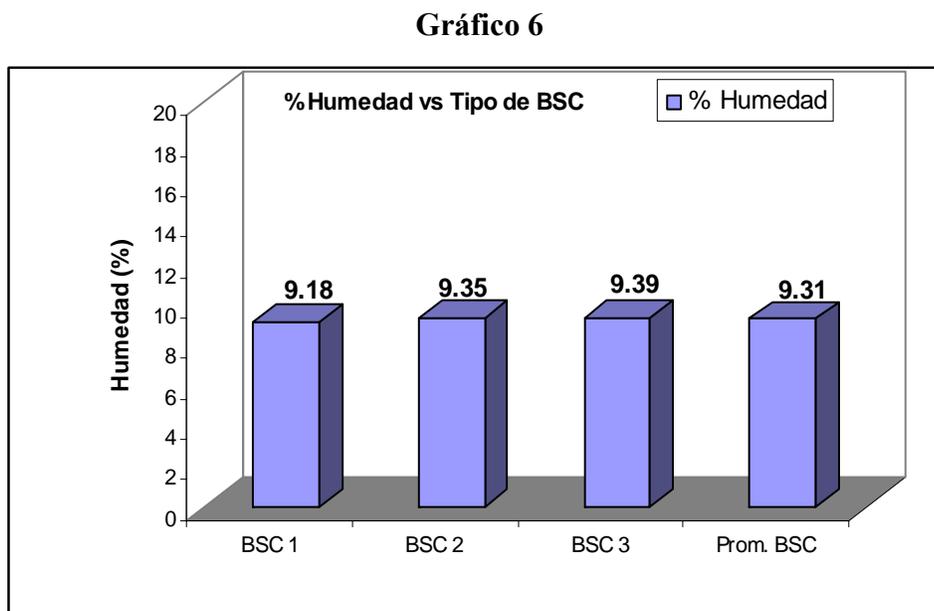


En este caso el alto contenido de humedad implica que se gasten 470 MJ en el proceso de auto secado o extracción de la humedad interna antes de la combustión.

III.1.1 La humedad en los BSC

Los BSC tecnológicamente deben emplearse una vez que se ha alcanzado la humedad de equilibrio, que generalmente se encuentra en valores de entre 8 y 10%, aunque esto requiere de largos períodos para su secado expuestos a temperatura ambiente y a la sombra. Este período en función de las condiciones atmosféricas puede llegar de unos 24 a 26 días según puede verse en los gráficos 3 y 4 del Capítulo II.

En el Gráfico 6 puede verse la humedad para tres BSC fabricados en diferentes condiciones. (Según Tabla 26).



En este caso el alto contenido de humedad implica que se gasten 86 MJ en el proceso de secado antes de la combustión.

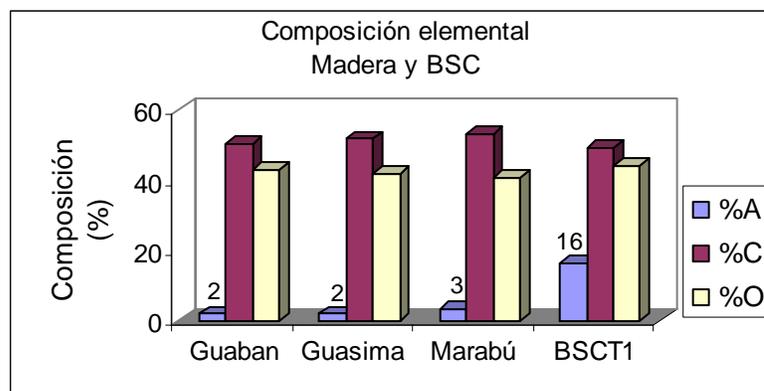
Nótese que en este caso la energía gastada por concepto de humedad en el combustible es inferior en un 82% con respecto a la madera empleada, por lo que la cantidad de combustible a emplear será menor.

III.1.2 Análisis sobre la composición química en las Maderas y el BSC

En cuanto al contenido de carbono y oxígeno como puede verse en el Gráfico 7, existe una gran similitud, no siendo así en el caso de la ceniza donde el BSC presenta un 16% frente a un 2.5% como promedio en las maderas. Este componente se considera un lastre en los combustibles por

lo que representa una desventaja frente a la madera y está dado por el empleo de la arcilla como aglutinante en la producción del BSC.

Gráfico 7

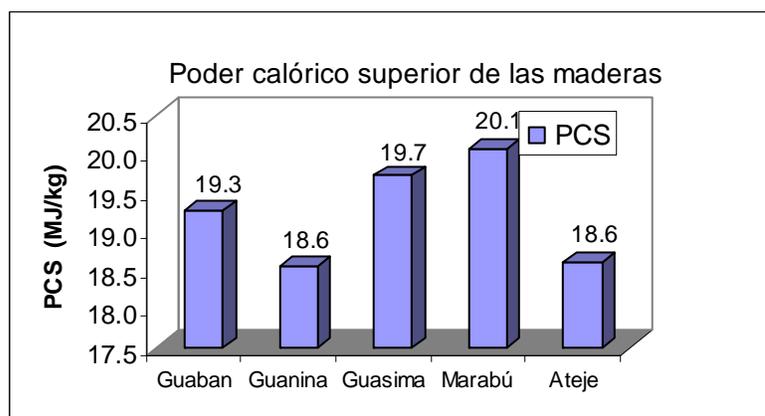


III.1.3 Sobre el Poder Calórico

Las Maderas.

En el Gráfico 8 se muestra el poder calórico superior de las maderas más abundantes en la región donde se desarrolla el estudio, calculado a partir de la composición elemental según la ecuación de Mendeleiev. Debe señalarse sin embargo, que las maderas que se emplean generalmente son la guásima, el guabán y el marabú, en las proporciones que de manera aproximada se dan en la Tabla 10 del Capítulo 2, y en el Gráfico 9, aclarando que estas proporciones se realizan al buen criterio del hornero en cada ocasión.

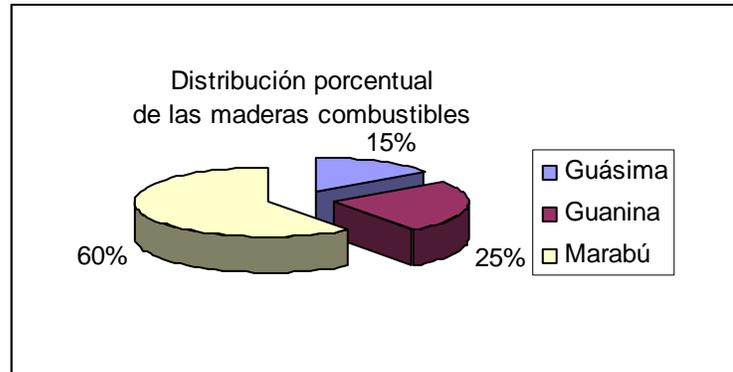
Gráfico 8



Atendiendo a la cantidad de madera o leña quemada en el horno, 3500 Kg., para una quema de 3700 ladrillos, puede ser calculado el empleo de una energía equivalente a 56700 MJ, lo que

implica un valor promedio de 15 MJ por ladrillos. Más adelante se calculará la cantidad de briquetas necesarias para reemplazar los volúmenes de madera antes mencionados.

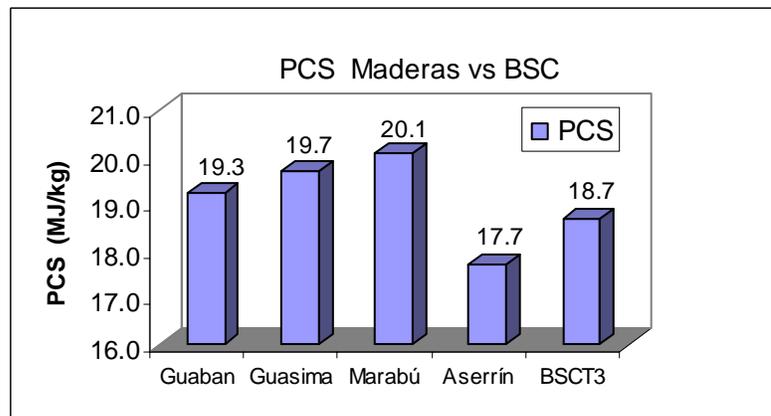
Gráfico 9



III.1.4 El BSC vs. la madera

En el gráfico 10 pueden verse a título de comparación los valores calóricos de las maderas empleadas y el aserrín tomado como materia prima fundamental para la obtención del BSC y del propio bloque sólido. Puede notarse que el aserrín se densifica en el proceso y como resultado el PCS del BSC es superior a este en 1 MJ, a pesar del incremento en el contenido de cenizas antes mencionado.

Gráfico 10



Para el caso en que se usan las briquetas como combustible partiendo de su poder calórico se necesitará un número de 3011 briquetas (calculado teniendo en cuenta el PSI), lo que implica que se necesitan 1255 Kg. de aserrín.

En la tabla 28 se muestran los detalles del consumo de energía necesario para la quema del horno artesanal que hemos considerado en este trabajo como modelo y que es típico en la región. Sobre la base del PCS mostrado en el gráfico 11 se pueden estimar las cantidades de BSC a utilizar en este caso y/o en hornos análogos o de mayor eficiencia donde se conozca previamente el consumo específico de energía para la producción de los ladrillos.

Tabla 28.

Parámetro	Cantidad	Unid medida
Cantidad de ladrillos por hornada.	3700	Unidades
Masa de ladrillos secos listos para pasar a la quema.	12580	Kg.
Energía Bruta consumida.	56981	MJ
Masa de ladrillos quemados.	14800	Kg.
Energía específica.	3.85	MJ/Kg.
Energía específica.	15.400	MJ/Unid

III.1.5 Sobre la influencia de las variables estudiadas en el proceso de fabricación

En correspondencia con el diseño de experimento realizado, se estudió la influencia de las variables presión, contenido de arcilla y tiempo de retención, sobre las variables respuestas: densidad, poder calórico, rendimiento de la combustión y energía de fabricación por briqueta.

Para determinar la influencia de estos parámetros y su interrelación estadística se utilizó el programa de computación Star Graphic. Los resultados se muestran en los anexos 12, 13 y 14, en este epígrafe se comentan y analizan los resultados alcanzados.

- Influencia de la variable dependiente poder calórico superior sobre el contenido de arcilla, presión y tiempo de prensado de los BSC.

El poder calórico superior calculado según las ecuaciones presentadas oscila de forma general entre los valores 16.85 y 18.86 correspondiendo los valores menores al menor valor de arcilla empleado y la menor presión, lo que se corresponde con una menor densidad alcanzada.

R-requerida = 85.2159 %

De acuerdo a la ecuación de regresión

$$PCS = 16.6192 + 0.14775 * \text{Cont. Arcilla} - 0.000918333 * \text{Presión} + 0.0215 * \text{Tiempo de prensado}$$

Según esta ecuación el poder calórico superior está relacionado directamente con el aumento del por ciento de arcilla, la presión y el tiempo de prensado en los rangos estimados.

- Influencia de la variable dependiente densidad sobre el contenido de arcilla, presión y tiempo de prensado de los BSC fabricados.

Los valores de densidad obtenidos oscilan en los valores 1049.17– 320.5 (Kg./m³). Como puede observarse existe un rango bastante amplio de variación en correspondencia con los valores de presión aplicados, los por cientos de arcilla y el tiempo de retención.

R-requerida = 99.2731%

La ecuación de regresión obtenida es la siguiente:

Densidad = -312.731 + 61.1985*Cont. Arcilla + 0.0658133*Presión -3.37756*Tiempo de prensado.

De estas ecuaciones podemos determinar que en este caso el factor de mayor influencia sobre la densidad es el por ciento de arcilla, siendo las bajas presiones aplicadas, de menor significación aunque influyen, al igual que el tiempo de retención, de forma positiva en el aumento de la densidad.

- Influencia de las variable dependiente rendimiento sobre el contenido de arcilla, presión y tiempo de prensado de los BSC fabricados.

El rendimiento de la combustión ha sido obtenido en este caso como se describe en el capítulo anterior y su significado consiste en poder evaluar la facilidad con que ocurre la combustión en las condiciones específicas creadas, de modo que se logre determinar qué briqueta o qué condiciones de fabricación y obtención facilitan o no la combustión de unas con respecto a otras.

Los valores de rendimiento de la combustión en este caso resultan relativamente altos y oscilan en los valores de 94.23% – 96.93%. La ecuación de regresión obtenida es la siguiente:

R-requerida = 96.7226%

Rendimiento = 97.5225 – 0.02775*Cont. Arcilla – 0.001715*Presión + 0.0791667*Tiempo de prensado.

Es de señalar que en cuanto a la eficiencia de la combustión el factor que mayor influencia ejerce es el % de arcilla, también influye negativamente la presión aunque no tanto en estos bajos valores aplicados. Estos resultados se corresponden con la literatura consultada, donde se señala una relativa disminución de la combustionabilidad de los materiales altamente densificados. Esto

puede deberse a la menor posibilidad de obtener oxígeno para mantener la combustión y por tanto esta debe avanzar con mayor dificultad; igual influencia resulta el tiempo de prensado aplicado aunque de forma mucho menos significativa.

III.1.6 Energía de Fabricación

La energía de fabricación o consumo de energía necesaria para la fabricación de la briqueta es un parámetro que determina el gasto de trabajo aplicado a la biomasa para lograr su compactación. Este depende de las condiciones físicas iniciales del material que a su vez condicionan la potencia requerida a emplear para lograr la densificación.

En este caso se han aplicado las ecuaciones que se presentan para su cálculo:

Donde:

$$W = \int F ds \quad (III.8)$$

$$F = p * A \quad (III.9)$$

$$P = k * t \quad (III.10)$$

Entonces:

$$W = \int k * t * A * ds \quad (III.11)$$

$$W = \frac{K * A}{v} \int ds$$

$$W = \frac{K * A * S^2}{2v}$$

Tabla 29. Los parámetros involucrados se identifican en la tabla siguiente.

Parámetro	Trabajo	Área	Recorrido	Velocidad	Coeficiente
Símbolo	W	A	S	v	K
Unidad de medida	Joule	M ²	Metro	m/seg.	Pa/seg.

K es una constata que relaciona el incremento de presión en el tiempo durante el prensado.

Usando las ecuaciones presentadas y los valores tabulados en el capítulo 2 se obtienen los siguientes resultados Tabla 30.

Tabla 30

Tipos de muestras	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
% arcilla	20	20	20	20	10	10	10	10
Presión Kg.	1500	1500	2000	2000	1500	1500	2000	2000
Tiempo de retención seg.	30	15	30	15	30	15	30	15
W (j)	626,670			707,452	883,702			979

La energía de prensado o el trabajo necesario para densificar las briquetas es menor cuando mayor es el % de arcilla en los valores estudiados. Es de señalar que la velocidad de compresión en este caso es constante aunque pudiera variar en un límite reducido al usar la tecnología del prensado manual. El tiempo de retención durante el cual la briqueta se mantiene sometida a la presión límite al parecer no tiene mayor influencia sobre la cantidad de trabajo aplicada, en consecuencia el mayor consumo de energía de densificación ocurre en este caso para la mayor presión y menor cantidad de aglutinante aplicado.

III.2 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Con los datos de la quema expuestos en la Tabla 10 y los PCS de las maderas y los BSC se pueden obtener los siguientes resultados.

Las cantidad de materiales para una mezcla será de 2.79m³ de aserrín, 315 Kg. de arcilla y 1.6 m³ de agua. Como se muestra en el Gráfico 11

Producción de Aserrín de pino en un año 234.54 m³ Tabla 15

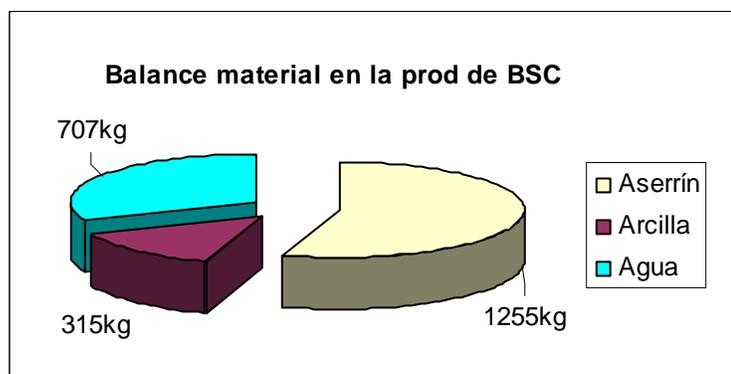
Densidad del aserrín de pino.

$$\rho = 450 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Aserrín generado igual a 105543 Kg.

Como se necesita 1255 Kg. de aserrín para una quema, con la producción del aserrío "Víctor Martínez" se pueden hacer 84 quemas en el año, por lo que es más que suficiente esta cantidad para suministrar dicha materia prima al horno de Manicaragua, pues su producción anual es de 24 quemas como promedio. De la misma forma con este volumen de materia prima generado en el aserradero se pueden producir 310800 ladrillos al año.

Gráfico 11



El bajo costo de obtención de los BSC está determinado en este caso por el hecho de que solo es necesario el acarreo del aserrín desde el aserrío muy cercano al área de fabricación de los BSC con un mínimo gasto de combustible, aunque está previsto el acarreo periódico con el uso de bicicletas. Si comparamos los costos del uso de la madera o leña vemos que es más viable el BSC. En la tabla 2 que se presenta se puede ver una comparación detallada. Además la creación de nuevos empleos repercute favorablemente en el balance económico – social.

Tabla 31: Comparación de los costos entre la leña y el BSC

	Pesos (CUP)		US Dollars (USD)	
	Leña	BSC	Leña	BSC
Mano de obra	\$ 144.00	\$ 660.00	\$ -	\$ -
Materias primas	\$ 600.00	\$ -	\$ -	\$ -
Transportación	\$ 45.00	\$ 9.00	\$ 165.00	\$ 33.00
Total costos directos	\$ 789.00	\$ 669.00	\$ 165.00	\$ 33.00
Indirecto (15% Direct)	\$ 118.35	\$ 100.35	\$ 24.75	\$ 4.95
Total Costos	\$ 907.35	\$ 769.35	\$ 189.75	\$ 37.95
Cost. por tonelada	\$ 90.74	\$ 76.94	\$ 18.98	\$ 3.80

III.3 CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Este producto representa una interesante y atractiva alternativa de combustible renovable, con un bajo impacto ambiental y niveles de eficiencia aceptables en comparación con los combustibles tradicionales. Su uso permite además reciclar productivamente y a pequeña escala residuos, que de otra forma, sería bien difícil disponer de ellos de forma económica.

Dentro de las principales ventajas desde el punto de vista ambiental pueden citarse que el trabajo empleado en la fabricación del BSC es muy bajo por lo que las prensas manuales con un costo de 300 USD producidas en Planta Mecánica, Santa Clara, son una solución factible y de mínimo impacto ambiental.

Por otra parte desde el punto de vista de las condiciones higiénico sanitarias se ha podido comprobar que la quema del BSC es mucho más limpia, el humo visible y los malos olores de los ácidos piroleñosos es mucho menor, dado en lo fundamental por el grado de secado del aserrín generalmente empleado y el propio BSC.

No puede dejar de mencionarse en este punto, que al emplear el BSC se evitaría la tala de bosques con fines energéticos que se emplean hoy para la quema de ladrillos.

Cabe señalar además, la producción de BSC como una posible fuente de empleos para la comunidad, con el consecuente impacto social que podría generar.

Conclusiones

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Conclusiones

1. Este estudio ha mostrado que el BSC es una tecnología aprovechable que puede llevarse a cabo en condiciones locales y con recursos mínimos, representando una alternativa a los combustibles tradicionales.
2. Con el estudio de las variables de fabricación se ha logrado determinar la correlación entre la presión, la densidad, el contenido de aglomerante y la energía consumida en el proceso pudiendo determinarse la posibilidad de fabricación adecuada de estos BSC en estas condiciones.
3. Los productores de ladrillos artesanales hoy en día por las condiciones específicas tienen pérdidas importantes en la eficiencia de los hornos por el uso de la leña húmeda, el uso de los BSC puede reportar en este caso mejoras en la eficiencia energética por disminuir de forma importante el consumo de energía necesaria para lograr el auto secado del combustible.
4. La energía necesaria para la fabricación de los BSC es mínima comparada con la posibilidad que tienen los mismos de aportar durante su combustión.
5. El poder calórico aportado por el BSC es comparable con el de la leña, resulta superior al del aserrín no compactado y aunque el contenido de cenizas es superior esto puede ser una ventaja para el uso de las cenizas activadas en la producción de otros ecomateriales.

Recomendaciones

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Recomendaciones

1. Se debe dejar la mezcla preparada antes de hacer los bloques de un día para otro, con el propósito de aumentar la homogeneidad de la mezcla.
2. Se debe hacer extensivo el estudio a un número mayor de variables para tener un mayor criterio de evaluación de los BSC.
3. Es necesario al trabajar con las prensas hidráulicas del laboratorio activar el graficador para obtener directamente las curvas de densificación del material.
4. Es necesario obtener un número mayor de replicas para determinar con mayor fidelidad el rendimiento de la combustión de BSC obtenidos en diferentes condiciones

Bibliografía

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Bibliografía

1. Batacharya, S. C., Sett, S. and Shrestha, R. M. State of the Art of Biomass Densification. Edited by Taylor and Francis. Division of Energy Technology. Energy Sources. New York, 11, 3, pp.161-186, **1989**.
2. Biomass Users Network (BUN-CA), **2002**.
3. Castellón Salas Luís Ernesto “Tecnología para la obtención de Biomasa densificada en condiciones de pequeña industria”, UCLV, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, **2003**.
4. Combustibles sólidos de baja densidad, La densificación de la biomasa: briquetas, pellets, pacas. (segunda parte).
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>
5. Combustibles sólidos <http://zip.rinconv.com/>
6. Comisión Nacional de Energía: Resultados preliminares del análisis de las fuentes alternativas de energía en Cuba, **1991**.
7. Comisión Nacional de Medio Ambiente, Chile, CONAMA-RM - Actualidad APL Ladrilleros.htm **2001**.
8. CONAE. “Energía de la Biomasa”. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, México **1999**. <http://www.conae.gob.mx>
9. Conservación de la Energía en las Industria Forestales. “Aprovechamiento Potencial de los Residuos de madera para la Producción de Energías”, (Capítulo 6).
http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/t0269s/T0269S10.htm
10. Cukierman A. L., Della Rocca P. A., Bonelli P. R.; Cassanello M. C. On the Study of Thermochemical Biomass Conversion. Trends in Chemical Engineering, 3, 129-144, **1996**.
11. Días do Santos Paulo “Tecnología para la obtención de Bloques Sólidos Combustibles (BSC) en condiciones locales”, Santa Clara, 2002, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, Tesis de Maestría.
12. Díaz Río. Junio **1999**.
13. Domínguez Domínguez, J.; González Valdez, M.; Muñoz Hernández, G. Una estrategia para optimizar el proceso de densificación mecánica de residuos agrícolas y agroindustriales. Agrociencia, 36, 5, pp. 593-604, septiembre-octubre, **2002**.

14. Domínguez, D. J., González, V., Muños, H. G. “Una Estrategia para Optimizar el Proceso de Densificación Mecánica de residuos Agrícolas y Agroindustriales”, Centro de Investigación en Matemáticas, México.
15. Energía de la Biomasa. Agosto **2001**.
16. Erickson, S. and Prior, M. The briquetting of agricultural wastes for fuel. Food and Agricultural Organization of the United Nations, p. 131, **1990**.
17. Faborode, M. O. and O’Callaghan, J. R. Optimizing the Compression briquetting of Fibrous Agricultural Materials. Journal of Agricultural Engineering Research. London Academic Press. pp: 245-262, **1987**.
18. Gestión e Impacto Ambiental LA BIOMASA 2005. <http://www.estrucplan.com.ar>
19. H. G. WINKELMANN Director del Departamento Central de Silvicultura de Solothurn, Suiza “La madera como combustible”
http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/x5375S/x5375s05.htm.
20. Hernández Sampieri Roberto “Metodología de la Investigación” Tomo 1, Editorial Félix Varela, La Habana **2003**.
21. Manuales sobre energía renovable: Biomasa
22. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, **2004**
<http://www.fao.org>.
23. Pequeños gasificadores de madera y carbón vegetal
<http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s03.htm>.
24. Robles-Gil Sandra. Información Climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa. La Paz, México. Agosto **2001**.
<http://www.wmo.ch/web/wcp/clips2001/html/Reporte%20Biomasa.pdf>
25. Rodríguez Hurtado Saylin “Densificación de biomasa agrícolas para la obtención del Bloque Sólido Combustible”, UCLV, facultad de Construcciones, **2000**.
26. Roque Díaz Pablo “Combustión” Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, **1990**.
27. Santamaría Flores José , “Las Energías Renovables son el futuro”, **2004**
28. Sebastián F., Royo J., “La Biomasa como Fuente de Energía Renovable”, CIRCE, Universidad de Zaragoza, **2002**, <http://www.cps.unizar.es>

Bibliografía

29. Sitkey, G. Mechanics of Agricultural Materials. Budapest, Elsevier Science Publishers. pp. 420-438, **1986**.
30. Steverson, E. M., Semler, T. T. and Goldsberry, J. A. An Evaluation of Densification Technologies. EG&G Idaho, Inc. Prepared by U.S. Department of Energy Washington, D.C. p. 136, **1985**.
31. Tanquero Díaz Nelson, “Curso de Generadores de Vapor” Puerto Ordaz, Venezuela, **2002**.
32. Torres Calero Luís Raúl “Investigación de las propiedades del (BSC) para la producción de Materiales de Construcción”.
33. Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R.:
34. Villegas Aguilar, P. J.; “Aprovechamiento de residuos fibrosos de la industria azucarera mediante procesos de conversión térmica” Tesis Doctoral, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, **2000**.

Anexos

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Anexos



Anexo 1. Prensa Briqueteadora



Anexo 2. Prensa utilizada para elaborar los BSC. Máquina Universal de Ensayos ZD-40



Anexo 3. Prensa con el dispositivo listo para fabricar las briquetas



Anexo 4. Dispositivo cargado



Anexo 5. Acercamiento de la parte móvil en vacío



Anexo 6. Prensado de la mezcla



Anexo 7. Briquetas después de prensadas con un 20% de arcilla.



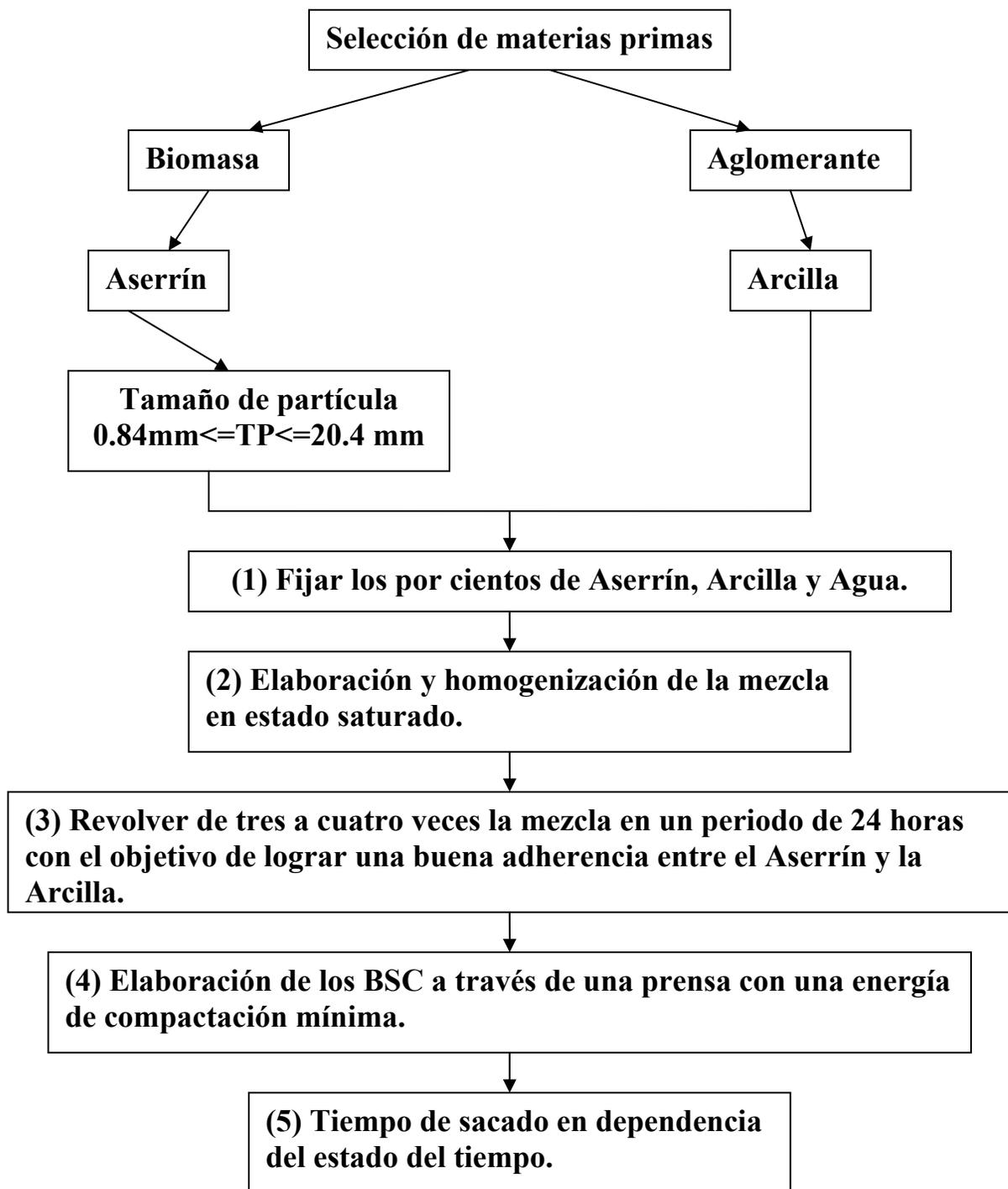
Anexo 8. Briquetas después de prensadas con un 10% de arcilla



Anexo 9. Nombre común de las maderas utilizadas como combustible en el horno ladrillero, de izquierda a derecha: Guanina, Aroma, Ateje, Guabán y Guásima.



Anexo 10. Horno ladrillero.



Anexo 11. Metodología para la elaboración de la tecnología

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: PCS

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	16.6192	0.606918	27.3829	0.0
Cont. arcilla	0.14775	0.0147199	10.0374	0.0
Presion	-0.000918333	0.000294399	-3.11935	0.0
tiempo prensado	0.0215	0.00981329	2.19091	0.0

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	14.9871	3	4.99569	38.43	0.0
Residual	2.60012	20	0.130006		
Total (Corr.)	17.5872	23			

R-squared = 85.2159 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 82.9982 percent

Standard Error of Est. = 0.360563

Mean absolute error = 0.259167

Durbin-Watson statistic = 1.47091

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between PCS and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$PCS = 16.6192 + 0.14775 * \text{Cont. arcilla} - 0.000918333 * \text{Presion} + 0.0215 * \text{tiempo prensado}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 85.2159% of the variability in PCS. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 82.9982%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.360563. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.259167 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0.0405, belonging to tiempo prensado. Since the P-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Anexo 12. Valoración estadística de la influencia de la variable dependiente poder calórico superior sobre el contenido de arcilla, presión y tiempo de prensado de los BSC fabricados

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Densidad

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-V
CONSTANT	-312.731	48.5146	-6.44611	0.
Cont. arcilla	61.1985	1.17665	52.0107	0.
Presion	0.0658133	0.0235331	2.79663	0.
tiempo prensado	-3.37756	0.784435	-4.30572	0.

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-V
Model	2.26905E6	3	756351.0	910.49	0.
Residual	16614.1	20	830.707		
Total (Corr.)	2.28567E6	23			

R-squared = 99.2731 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 99.1641 percent
 Standard Error of Est. = 28.822
 Mean absolute error = 22.0342
 Durbin-Watson statistic = 1.73364

The StatAdvisor

 The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Densidad and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Densidad} = -312.731 + 61.1985 \cdot \text{Cont. arcilla} + 0.0658133 \cdot \text{Presion} - 3.37756 \cdot \text{tiempo prensado}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99.2731% of the variability in Densidad. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99.1641%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 28.822. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 22.0342 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0.0111, belonging to Presion. Since the P-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Anexo 13. Valoración estadística de la influencia de la variable dependiente densidad sobre el contenido de arcilla, presión y tiempo de prensado de los BSC fabricados.

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Rendimiento

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Va
CONSTANT	97.5225	1.32416	73.6487	0.0
Cont. arcilla	-0.02775	0.0310876	-0.89264	0.5
Presion	-0.001715	0.000621752	-2.75834	0.2
tiempo prensado	0.0791667	0.0207251	3.81985	0.1

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Va
Model	3.30127	3	1.10042	9.96	0.2
Residual	0.11045	1	0.11045		
Total (Corr.)	3.41172	4			

R-squared = 96.7626 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 87.0505 percent
 Standard Error of Est. = 0.33234
 Mean absolute error = 0.141
 Durbin-Watson statistic = 3.25

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Rendimiento and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Rendimiento} = 97.5225 - 0.02775 \cdot \text{Cont. arcilla} - 0.001715 \cdot \text{Presion} + 0.0791667 \cdot \text{tiempo prensado}$$

Since the P-value in the ANOVA table is greater or equal to 0.10, there is not a statistically significant relationship between the variables at the 90% or higher confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96.7626% of the variability in Rendimiento. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 87.0505%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.33234. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.141 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0.5361, belonging to Cont. arcilla. Since the P-value is greater or equal to 0.10, that term is not statistically significant at the 90% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Cont. arcilla from the model.

Anexo 14. Valoración estadística de la influencia de las variables dependientes rendimiento sobre el contenido de arcilla, presión y tiempo de prensado de los BSC fabricado

