

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Facultad de Ciencias Forestales



Evaluación del Proceso de Producción de Briquetas a partir de residuos de dos maderas de la zona de Iquitos, Loreto.

Monografía para optar el Título de

INGENIERO FORESTAL

LIZBETH VANESSA HUANCA RÍOS

Lima – Perú

2017

INDICE

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE ACRONIMOS, ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	4
RESUMEN DE TRABAJO	5
I. INTRODUCCIÓN.....	6
II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	7
2.1 BIOMASA	7
2.2 BRIQUETAS:.....	14
III. PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE DOS MADERAS DE IQUITOS:.....	23
3.1 OBJETIVO:	23
3.2 MATERIALES:	23
3.3 METODOLOGÍA:.....	27
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
IV. CONCLUSIONES	42
V. RECOMENDACIONES.....	43
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	44

LISTA DE CUADROS.

Cuadro N°1: Descripción de los componentes de la madera.....	10
Cuadro N°2: Densidad aparente de algunos biocombustibles	13
Cuadro N°3: Tamaños y Formas de las briquetas.....	15
Cuadro N°4: Resultados promedio de la caracterización físico – química de las briquetas.....	37
Cuadro N°5: Resultados de la Composición química de la Briqueta.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de Briquetas.....	14
Figura 2: Determinación de la resistencia a la compresión.	29
Figura 3: Almacenamiento de materia prima en la empresa	32
Figura 4: Horno de Secado.	33
Figura 5: Planta briqueteadora para residuos de madera	34
Figura 6: Sistema de almacenamiento de las briquetas.	36
Figura 7: Flujo de Proceso Productivo.	36

LISTA DE ACRONIMOS, ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.

PC	:	Poder Calórico.
PCS	:	Poder Calórico Superior.
PCI	:	Poder Calórico Inferior.
CH	:	Contenido de Humedad.
FAO	:	Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
UNALM	:	Universidad Nacional Agraria la Molina.
S.A.C	:	Sociedad Anónima Cerrada.
Kcal	:	Kilo calorías.
Kg.	:	Kilogramo.
cm.	:	Centímetro.
mm.	:	Milimetro.
dm.	:	Decímetro.
m.	:	Metros.
°C	:	Grados Celsius.
T	:	Temperatura.
h.	:	Hora.
Rpm.	:	Revoluciones por minuto.
tn.	:	Tonelada.
MP	:	Materia Prima
Hz	:	Hertz.
mL	:	Mililitro.
mg.	:	Miligramos.
Kgf	:	Kilogramo fuerza
MJ	:	Mega Joule.
MPa	:	Mega pascal.
KJ	:	Kilo Joule.
BM	:	Bulbo Húmedo.

RESUMEN DE TRABAJO

El presente estudio se realizó en las instalaciones de la empresa Corporación Industrial Nanay S.A.C (CORINAY), ubicada en el Distrito de Iquitos, Provincia de Maynas, Departamento de Loreto. El proyecto consistió en la evaluación del proceso de producción de las briquetas de residuos de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*), y la caracterización físico – química del producto. Durante un mes se hizo la evaluación del proceso de producción de la planta briqueteadora, se observó que el contenido de la humedad de la materia prima define las principales características de la briqueta, por lo tanto, la temperatura de secado de los residuos debe oscilar en intervalos de 70 – 80 °C para obtener briquetas de calidad.

Asimismo, se caracterizó las propiedades físico – químicas de la briqueta, las cuales fueron comparadas con resultados de otras investigaciones y con la Norma Sueca SS18721 que clasifica la calidad de las briquetas en tres grupos (I, II, y III). Nuestro producto se ha clasificado dentro del grupo I, por sus dimensiones, contenido de humedad, densidad, y poder calórico superior; mientras que por la friabilidad se clasifica en el grupo III. Respecto a la resistencia a la compresión los resultados están por debajo de los valores de proyectos de investigaciones de briquetas a partir de residuos forestales, sin embargo, hay una significativa ventaja sobre las briquetas de carbón porque supera sus valores de carga de ruptura ampliamente. La temperatura de inflamabilidad es 320 °C superior al de la madera. Por otro lado, la briqueta en estudio tiene 49.76% de Celulosa, 13.32 % de pentosanos, 24.67% de lignina, 3.72% extractivos y 1.63% de cenizas, los cuales varían relativamente con la proporción de los compuestos químicos de las materias primas.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la principal fuente de residuos forestales se obtiene de la industria de transformación primaria de la madera, y generalmente por su alto contenido de humedad son acumulados o incinerados sin lograr un mayor valor agregado. Su manipulación se dificulta por su gran volumen, en consecuencia, su disposición significa un problema para las empresas aserraderas. Esto se contrasta con el estudio realizado en Iquitos por **Baneo (2015)**, quien determina que solo el 15% de las empresas aserraderas utilizan el total de sus residuos como fuente de energía, mientras que el 80% de las empresas sus residuos lo comercializan, desechan o regalan. El mismo autor indica que las principales maderas procesadas en la región son la especie de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*), en consecuencia, son las que generan la mayor cantidad de residuos.

En este contexto, surge la iniciativa de la empresa Corporación Industrial Nanay S.A.C - (CORINAY) de potenciar el valor energético de los residuos de la industria forestal a través de su uso como materia prima para la producción de briquetas de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*). Con ello, dar una alternativa de solución a los problemas de demanda de energía de los calderos de la industria forestal y a las dificultades de disposición de los desperdicios forestales. Esta empresa fue la pionera en el país en establecer una tecnología de aprovechamiento de los residuos forestales, sin embargo, para lograr briquetas con características superiores a la leña y a otros combustibles significó un continuo proceso experimental.

Por lo expuesto, en el presente proyecto de “*Evaluación del Proceso de Producción de Briquetas a partir de residuos de dos maderas de la zona de Iquitos, Loreto*” tiene como objetivo analizar el proceso de producción de las briquetas y realizar la caracterización físico – química del producto. Con ello, establecer condiciones para lograr estudios posteriores, parámetros y guías para alcanzar la optimización de la producción controlando las variables que influyen en la compactación de los residuos.

II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

1.1 BIOMASA

1.1.1 Concepto de Biomasa.

Castro, et al., (2007), argumenta que el concepto de biomasa comprende todos los productos de origen vegetal y animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial, excluyendo los combustibles fósiles, porque a pesar de que deriven de materiales biológicos, con el tiempo han sufrido transformaciones que han alterado su naturaleza.

En un contexto energético **Ballesteros (2008)**, define la biomasa como una fuente de energía que comprende la utilización de toda una gama de productos derivados (biocombustibles) de diversas naturalezas (sólido, líquido, gaseoso), y que pueden tener aplicación en todos los campos de utilización de los combustibles fósiles.

Según **Ramos, (2008)**, la formación de la biomasa vegetal se lleva a cabo por el proceso de fotosíntesis, en la cual las plantas captan y utilizan la energía de la luz para transformar la materia inorgánica de su medio externo en materia orgánica con elevado contenido energético.

Para **Flores (2004)** los árboles durante su crecimiento se encuentran en un ciclo cerrado de producción en la oxidación y captación de CO₂, siempre y cuando provenga de un manejo sostenible, produciendo un efecto neutro (es decir, no contribuye al efecto invernadero) sobre el balance de CO₂, a diferencia de lo que ocurre con las fuentes de energía fósil.

Según la **FAO (2004)**, la biomasa se clasifica en:

- **Biocombustibles leñosos**, son clasificados en: Sólidos (aserrín, viruta, carbón, pellets, briquetas, etc.), líquidos (licor negro, metanol, etc.), y gaseoso (productos derivados de la gasificación). Estos pueden obtenerse de bosques, plantaciones, subproductos de la industria maderera y productos usados (madera de construcción recuperada, papel usado, etc.).

- **Los agro-combustibles** son derivados de la biomasa agrícola y sus subproductos. Proviene de las explotaciones agrícolas, granjas marinas y granjas de agua dulce.
- **Los subproductos de biomasa generada por la población urbana** pueden provenir de la recolección de la basura o de tratamientos de aguas servidas de origen municipal o de aldeas.

1.1.2 Residuos forestales como combustible.

La calidad de un combustible viene dada por la cantidad de energía que contiene y puede liberar cuando se somete a un proceso de conversión energética, es decir, su poder calorífico.

Castell (2005), define el poder calorífico (PC) de un combustible sólido como la cantidad de energía que se produce en la combustión completa de una unidad de masa o volumen. El PC se clasifica en superior (PCS) e inferior (PCI). El poder calorífico superior tiene en cuenta el calor que proviene de la condensación del vapor de agua presente en los productos de la combustión, mientras que, el poder calorífico inferior, no tiene en cuenta dicho calor.

A. Influencia de la composición química:

La composición química del combustible está determinada por su composición elemental, los principales son: Carbono, Hidrogeno, Azufre, Nitrógeno y cenizas.

Neenan (1984), menciona que la madera contiene aproximadamente 50% de carbono, 42% de oxígeno, 6.4% de hidrogeno, 1% de cenizas, 0.4% de nitrógeno, 0.05% de azufre y 0.25% de otros. Además, señala que la composición química de la corteza es parecida a la madera, excepto en que contiene 4% menos de oxígeno y 4% más de ceniza. Estos datos pueden variar según la especie.

Para **Piorno and Oviedo (1993)**, los poderes caloríficos de la biomasa aumentan con el contenido de carbono e hidrogeno, y disminuye a medida que aumenta el oxígeno.

Castell (2005), señala que las cenizas están constituidas por compuestos inorgánicos, entre los más importantes: Ca, K, y Mg. Su porcentaje indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. Las cenizas reducen el poder calorífico del

combustible y el rendimiento térmico de un horno por interferir en la transferencia de calor.

Según **Bueno (1987)**, la combinación del carbono, hidrogeno y oxigeno forman los principales constituyentes de la madera como la celulosa (40 a 61%), hemicelulosa (15 a 30%), lignina (17 a 35%), y otros compuestos (resinas, terpenos, aceites ceniza, etc.) de menor porcentaje pero que influyen en el poder calorífico.

En el cuadro N°1 se presenta una breve descripción de los componentes de la madera.

Cuadro N°1: Descripción de los componentes de la madera.

Componente	Característica
Celulosa	Carbohidrato formado por largas cadenas lineales de β – D –Glucosa.
	formula (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n
	Su masa molecular varía entre 300.000 y 500.00 g/mol
	Poder calórico aproximadamente es 4100 kcal/kg.
Hemicelulosa:	Es un carbohidrato, pero de cadena más corta que la celulosa
	Compuesto principalmente de pentosanos y hexosanos.
	Su Poder calórico es 4100 kcal/kg.
Lignina	Es un polímero aromático de cadena ramificada que contiene cuatro o más monómeros de fenilpropano por molécula.
	Poder Calorífico: 6370kcal/kg.
Resinas:	Compuestos volátiles.
	Formado por: ácidos grasos, ácidos resínicos y fitoesteroles.
Terpenos:	Son hidrocarburos polímeros de isopreno.
	su fórmula es (C ₅ H ₈) _n
	Son sustancias olorosas con punto de ebullición bajo, por lo que volatilizan fácilmente.
	Su contenido en hojas y tallo varía entre 0 y 2%, aunque en algunas especies pueden llegar a 6%.

Fuente: Arnaldos *et al*, (2004).

En el cuadro N°1 se observa que la lignina tiene el poder calórico mayor que la celulosa y hemicelulosa. Sin embargo, **Arnaldos, *et al*, (2004)**, menciona que lignina libera menos calor durante la combustión (contribuye menos en la combustión), debido a que solo se volatiliza el 50%, el resto se queda en forma de carbón. La presencia de volátiles y resina provoca un aumento tanto en el poder calórico superior como en el inferior, ya que estos

compuestos tienen un poder calorífico mucho más elevado que los otros constituyentes de la madera.

Para **Neenan (1984)**, aproximadamente dos tercios de la energía de la madera se debe a los compuestos volátiles. Al respecto **Castell (2005)**, menciona que estos compuestos aportan el 60% del PCI de la madera.

Bueno (1987), refiere que las maderas que tienen resina o aceites poseen mayor poder calorífico. En un estudio realizado por **Uceda (1980)** determinó el PCS de las maderas latifoliadas varía entre 4621 y 4885 kcal/kg. La madera conífera resinosa tiene un PCS de 5000 a 5300 kcal /kg. (**Kollman, 1959**).

Dependiendo de la especie y humedad, todas las maderas tienen aproximadamente el mismo poder calorífico (que oscila entre 4000 a 5000 kcal/kg), pero por volumen las maderas duras tienen un poder calorífico más alto que las blandas. (**Flores, 2004**).

La **FAO (1991)**, refiere que la corteza de la madera suelen tener un poder calórico superior que la madera, debido a su alto contenido de gomas y resinas.

B. Influencia de la Humedad.

Para **Castell (2005)**, la humedad es el factor más crítico en los combustibles de biomasa, porque determina la energía que se puede obtener durante la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua para tener disponible el calor; por eso, cuanto más alto es el contenido de humedad, menor es el valor calorífico.

La humedad de la madera depende del momento de su recolección y las características de su almacenamiento (ubicación, tipo y duración), su valor en subproductos de la industria de la madera es menor al 10%, sin embargo, las astillas y aserrín pueden llegar a tener un 50% humedad. (**FAO, 2004**).

La madera que se extrae del bosque tiene aproximadamente un contenido de humedad de 50 a 55%, aunque puede variar según la especie, edad y parte del árbol. Si la madera es transportada flotando corriente abajo, se descortezan en húmedo o si dejan en estanques de almacenamiento podría tener un CH de 65-70%, mientras que las maderas que se arrastran por caminos y se descortezan en seco tendrían una humedad de 45 a 50%. (**FAO, 1991**).

En un estudio realizado por **Burschel, et al, (2003)**, se concluyó que la humedad tiene un efecto lineal con el poder calorífico, es decir, a mayor humedad menor poder calorífico. Además, se determinó que la leña en base seca contiene un 80% de materiales volátiles, la cual influye en la temperatura mínima exigida para la combustión completa.

C. Densificación de la biomasa:

Según **Sarabo and Pérez (1991)**, la baja densidad aparente y energética de gran parte de la biomasa (aserrín, y residuos de recuperación o recolectados en el terreno), así como su alto contenido de humedad, determinan en la mayoría de los casos no ser adecuada para reemplazar a los combustibles fósiles. Por ello se hace necesario la transformación previa de la biomasa en combustibles de mayor densidad energética y física.

Los principales productos elaborados industrialmente a partir de residuos forestales destinados a la generación de energía son: los pellets y las briquetas, los que son denominados de manera genérica por la sigla DBF¹. (**ROJAS, 2004**).

Según el cuadro N°2 la densidad de los productos compactados, pellets, puede llegar a ser aproximadamente seis veces la densidad de la materia prima como en el caso de las viruta. (**FAO, 2004**).

¹ Densified Biomass Fuel.

Cuadro N°2: Densidad aparente de algunos biocombustibles

Biocombustibles leñosos		Densidad aparente (kg/m³)
Trozas (madera apilada)	Haya	460
	Picea	310
Astillas	Coníferas	195
	Fronosas	260
Corteza	Coníferas	205
	Fronosas	320
Aserrín		170
Virutas		90
Pellets de madera		600

Fuente: FAO, 2004.

Velázquez (2006), explica que los pellets y las briquetas son materiales sólidos densificados por la compactación de partículas finas de madera, carbón vegetal o cualquier tipo de biomasa residual: paja, algodón, residuos urbanos, etc. Pueden ser formados mediante mezclas de diferentes materiales e incorporar aditivos que mejoren sus cualidades, como la parafina que aumenta el poder calorífico, la inflamabilidad y la adhesión de las partículas en la compactación.

Por otro lado, **Clotario, et. al., (2006)** menciona que la diferencia entre los pellets y las briquetas son las dimensiones, ya que se considera pellet si su diámetro es inferior a 2.5 cm., de lo contrario será una briqueta; además las briquetas no siempre tienen la forma de un cilindro. Otra diferencia importante es el grado de compactación, el pellet es mucho más compacto y uniforme, y su densidad es superior a 1kg/dm³.

1.2 BRIQUETAS:

Las briquetas son biocombustibles (generalmente de origen lignocelulósico), formados por la compactación de biomasa. Principalmente se usa como materia prima los residuos de madera (astillas y aserrín); sin embargo, a veces, están formadas por la compactación de cualquier tipo de residuos como: restos de tableros de fibra, residuos agrícolas, polvo de lijado, corteza, etc. **(Camps and Marcos, 2002).**

La forma de las briquetas es muy variable (ver fig. 1), y dependen de la maquina compactadora utilizada en la densificación. Las briqueteadoras con prensas de tipo tornillo sinfín dejan un hueco en el interior de las briquetas fabricada, este tipo de briquetas tienen una ignición más rápida por tener una mayor relación superficie – volumen, sin embargo, su desventaja es que se pierde espacio útil por el espacio vacío. Las briquetas de sección rectangular ligeramente redondeada en las cuatro esquinas tienen la ventaja de no desintegrarse con los golpes y se almacenan mucho mejor pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que las productos de tipo cilíndrico o prisma octogonal hueco, sin embargo, arden más despacio. **(Camps and Marcos, 2002).**



Figura 1: Tipos de Briquetas
Fuente: Marcos, 1994.

En el siguiente cuadro se detalla los tipos de briquetas por su forma.

Cuadro N°3: Tamaños y Formas de las briquetas.

TIPO	FORMA
Maciza	Cilíndrica
	Prisma hexagonal
	Prisma rectangular
	Prisma cuadrado –comida en las esquinas
	Prisma rectangular – comida en las esquinas
	Prisma octogonal
Hueca	Prisma hexagonal
	Prisma octogonal
	Prisma rectangular – comida en las esquinas

Fuente: Marcos, 1994.

1.2.1 ETAPAS DE LA PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS.

A continuación se detalla las etapas de producción de productos densificados a partir de residuos forestales (FAO, 1991).

- *Recolección y manipulación.*

Según **Ortiz (1994)**, los residuos generados en el monte producto de las labores silvícolas (podas, clareos, claras, entresacas, etc.) o de las labores de extracción de madera comercial (puntales, copas, ramas, tocones, etc.) pueden ser recolectados y apilados manualmente, con sistemas de tracción animal o con equipos especiales como pinzas, garras, plumas, etc.

Los residuos biomásicos que se generan en la industria de la madera pueden ser transportados mediante tubos de aspiración colocados a cierta altura. Cada máquina que interviene en el proceso de fabricación puede disponer de un sistema de aspiración individual que se conectan con tuberías principales de succión. (**Lara and Antolín, 2005**).

Según **Ortiz (1994)**, el 90% de la materia prima para elaborar briquetas se obtienen de la industria de primera y segunda transformación de la madera y solo un porcentaje residual se obtiene de la limpieza del bosque. Esto demuestra que los costos de transporte, manipulación, astillado, etc. de los residuos forestales encarecen los costos de las briquetas.

- *Astillado*

El astillado, es una operación que convierte en astillas los restos leñosos de los tratamientos silvícolas (de las operaciones de corte de la madera o poda de árboles de cultivos leñosos) y los recortes de la industria de la madera. La materia de gran tamaño deben ser triturados antes de ser densificados. (**Lara and Antolín, 2005**).

Este proceso permite obtener astillas (chips) con un tamaño determinado que facilita el manejo, almacenaje, carga y transporte de los residuos de manera técnicamente viable. (**Ortiz, 1994**).

- *Secado*

El secado de los residuos forestales se puede realizar de forma natural o forzada. El secado natural aprovecha las condiciones ambientales, los residuos de la extracción de la madera que se dejan en espacios libres y expuestos a la acción del viento y del sol pueden reducir su humedad entre un 10 a 15%. (**FAO, 1991**).

Carretero (1992), menciona que los residuos de la madera son apilados para su secado natural, este tipo de secado genera una serie de procesos termogénicos que ocasionan pérdidas de madera, siendo entre 0.5 % y 1% en climas fríos y templados, y de 0.75 a 3% en climas cálidos y húmedos. Estos procesos se deben a la acción de las células vivas del parénquima, a la actividad biológica de microorganismos y a fenómenos de oxidación química e hidrólisis ácida de los componentes de la celulosa. En tal sentido, para evitar pérdidas de materia seca el autor recomienda que las pilas de secado no deben superar un volumen de 40 a 50 m³, se debe evitar la presencia de finos que impiden la entrada de aire y mantener la temperatura al interior de la pila, cuando se registran temperaturas superiores a 60°C se debe voltear el residuo.

El secado forzado se realiza por transferencia de calor, puede ser directo o indirecto. En el primero hay un contacto directo entre la materia prima húmeda y los gases calientes, mientras que la transferencia de calor indirecta es a través de una pared de retención. Este tipo de secado se usa cuando se requieren alcanzar en la materia prima una humedad por debajo del 20% en base húmeda. (**Carretero, 1992**).

Para **Ortiz (1994)**, la deshidratación de los residuos, mediante la aportación de un flujo térmico se puede realizar con secadores neumáticos o rotatorios.

El secador tipo neumático consta de: (1) Una fuente de calor que genera el flujo térmico deshidratador, (2) un canal de secado donde el flujo térmico arrastra los sólidos en suspensión y provoca la salida de agua contenida en ellos y (3) Un sistema de succión: que posibilita el movimiento del flujo y los materiales. Este diseño se usa cuando los sólidos son de granulometría fina y se requiere una ligera deshidratación. El secador rotatorio se basa en la circulación de los residuos por un canal que gira, facilitando el contacto entre los sólidos y el flujo secante, el movimiento de los sólidos se controla regulando la pendiente y el giro del cilindro. Estos diseños son usados cuando los materiales están muy húmedos y tienen granulometría gruesa. (**Ortiz, 1994**).

- ***Briqueteado***

Según **Piorno and Oviedo (1993)**, el briqueteado consiste en compactar los productos lignocelulósicos para obtener combustibles más densos con alto poder calorífico.

Existen dos métodos de densificación de las briquetas: con aglutinante y sin aglutinante.

Las briquetas fabricadas con aglutinante pueden ser hechas manualmente, ya que se mantienen unidas gracias a este material. Los combustibles orgánicos más apropiados para servir de aglutinantes son la resina, alquitrán, estiércol de animal, fango de alcantarillado, desechos de pescado y carbón vegetal. Como aglomerante también se puede usar el limo, arcilla o barro, aunque estos disminuyen el valor calorífico de la briqueta y aumenta el contenido de cenizas. (**Clotario, et al., 2006**).

Para fabricar briquetas sin aglutinante es necesario trabajar con máquinas que generen elevadas presiones (200 MPa/cm²), que al provocar un incremento de la temperatura origina la plastificación de la lignina que actúa como elemento aglomerante de las partículas de la madera. Para que se realice el proceso de auto aglomeración es necesaria

la presencia de una cantidad de agua, comprendida entre 8 y 15% de humedad en base húmeda. (Ortiz, 2008).

Según Ortiz (1994), durante la formación de las briquetas debe aplicarse calor para darle a esta una mayor cohesión. Una de las hipótesis sugiere que la acción beneficiosa del calor genera temperaturas entre 80°C y 200°C, en este intervalo la lignina reblandece, modifica su estructura y, tras su enfriamiento asegura la unión de las partículas. Al respecto Irvine (1984), señala que la lignina comienza a ablandarse en temperaturas de 130° y 140 °C, esta temperatura es conocida como la temperatura de transición vítrea (TTV), cuyo valor depende principalmente del contenido en humedad, es decir que a medida que la madera se satura de agua, el valor de la TTV disminuye.

La acción aglomerante de la lignina a altas temperaturas permite que se disminuya la presión aplicada para una densidad dada. Cuando la presión es ejercida en frío, la unión de las partículas será débil y para compensar ello se necesitarán presiones más elevadas, por ello recomiendan aplicar calor para generar más cohesión a las partículas. (Ortiz, 1994).

Las máquinas briqueteadoras, en general, consisten de una tolva de alimentación, un sistema dosificador simple o múltiple de velocidad variable, una cámara de compactación y un canal de enfriamiento de 5 a 40 m. de longitud, donde la briqueta toma consistencia. (Ortiz, 1994).

Según Ortiz and Miguez (1995), los principales tipos de briqueteadoras son:

➤ **Briqueteadoras a pistón** (densificación por impacto): La compactación se consigue por el golpeteo sobre la biomasa mediante un pistón accionado a través de una volante de inercia. La producción varía entre 200 y 1500 kg/h. Algunas prensas pueden producir 2000 a 6000 kg de briquetas por hora con densidades de 1 a 1,2 kg/dm³. Esta prensa puede operar con residuos con contenido de humedad de 15 a 17%.

➤ **Briqueteadoras por tornillos** (densificación por extrusión): Este sistema se basa en la presión que ejerce un tornillo sin fin sobre la biomasa. El tornillo gira a una velocidad constante, haciendo avanzar el producto a una cámara que se estrecha progresivamente. Este sistema permite obtener briquetas de mayor densidad respecto al proceso de

densificación por impacto. La producción oscila entre 50 a 800 kg/h, con densidades de 1 a 1.3 kg/dm³ del producto.

Algunos de estos modelos tienen una camisa térmica para regular el proceso de plastificación de la lignina. Con esta máquina es posible fabricar briquetas con orificios interiores que favorece la combustión. (Ortiz, 2008).

El mismo autor menciona que en este tipo de briqueteadoras la materia prima a compactar no debe superar el 10% de humedad, sin embargo, para modelos que tienen calefacción forzada (favorece la plastificación de la lignina) se puede usar materiales con humedad de 12 a 14%.

➤ **Briqueteadoras hidráulicas y Neumáticas:** En estas máquinas la presión es producida por la acción de varios pistones (1, 2, o 3) accionados mediante sistemas hidráulicos o neumáticos. Generalmente se usan cuando los residuos son de mala calidad (algodón, papel, serrín húmedo, etc.) y cuando no se requiere briquetas de buena calidad. Son equipos de bajo consumo y mantenimiento, con capacidad de producción de 50 a 5000 kg/h.

La presión ejercida en la compactación puede fluctuar de 200 a 600 kg/cm², con densidades de 0.6 a 1 kg/dm³. (Ortiz, 1994).

➤ **Briqueteadoras de Rodillos:** Son máquinas dotadas por dos rodillos, cuya superficie tiene una serie de rebajas donde se deposita el producto a compactar, la materia prima que queda densificado al ser sometido a la acción de los rodillos. Generalmente se utilizan cuando no se requiere briquetas con elevadas densidades.

1.2.2 Características de las briquetas

- *Densidad*

La densidad² es la principal característica de las briquetas frente a las astillas, aserrín y otros residuos de la industria forestal; ya que son más densos, ello facilita su transporte, manipulación y almacenaje. Sin embargo, las briquetas son más costosas, ya que requiere un proceso industrial para su fabricación.

² La densidad son los kg de masa por m³

Para **Camps and Marcos (2002)**, los factores que influyen en la densidad de las briquetas son:

- ✓ La materia prima empleada. Cuanto mayor sea la densidad de la materia prima mayor será la densidad del producto final. Es así como los residuos provenientes de las maderas latifoliadas son más densas que las coníferas.
- ✓ La presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación. Las presiones de compactación son variables, dependen de la maquinaria utilizada.

- ***Humedad***

Según **Camps and Marcos (2008)**, La humedad de las briquetas está en función de la forma en que se suministre el producto, ya que durante el proceso de densificación se utilizan partículas secas. El autor señala que si las briquetas son vendidas en sacos de plásticos cerrados no absorberán más agua y su humedad aumentara ligeramente, pero si son vendidos a granel estos pueden aumentar su humedad de la briqueta.

Los mismos autores señalan que durante el proceso de densificación se da un calentamiento en la superficie lateral exterior de la briqueta, que provoca un baquelizado (fina película, de color negruzca) que impide el ingreso fácil del agua y por ende un aumento de la humedad del producto.

Marcos (1994), señala que en el proceso de compactación las partículas secas (inferior del 12% en base humedad) se secan aún más, al final la briqueta resulta con 8 a 10% de humedad.

Los residuos forestales obtenidos de maderas previamente secadas tienen un contenido en humedad de 5 a 7% B.H., por lo que es preciso humedecerlos antes de compactarlos. En algunos casos se mezclan estos productos ultra secos con otros más húmedos y así conseguir una dosificación adecuada. (**Ortiz, 1994**).

Según **Relova, et al., (2006)**, los residuos con humedad por encima de 15% y por debajo del 8% (en base seca) crean dificultades en el proceso de compactación, además de grietas y deformaciones en las briquetas.

La humedad de la materia prima influye en el costo energético del proceso de compactación. Es decir, si el material tiene altos contenidos de humedad o contenidos de agua demasiados bajos (inferior al 3 o 6%), la resistencia a la comprensión del material aumenta por un incremento de la presión ejercida, en tanto la demanda de energía es mayor. (**Ortiz, 1994**).

Ortiz, et al., (1996), menciona que en el proceso de compactación el agua además de influir en la densificación puede intervenir químicamente en la unión de las partículas, facilitando la unión entre puentes de hidrogeno de la pared celular.

- ***Friabilidad***

Senovilla and Antolín (2005), define la friabilidad como lo opuesto a la resistencia al golpeteo sin desmenuzarse. Esta cualidad en la briqueta es muy importante ya que debe mantener su propiedad como sólido compactado, durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión, hasta que cumplan su función,

- ***Composición Química***

La composición química de las briquetas determina su poder calorífico, los gases emitidos en la combustión y la composición de las cenizas. La composición química de las briquetas depende del material utilizado en su constitución. Si se usa aditivos, debe considerar su composición química. (**Camps and Marcos, 2002**).

- ***Poder Calorífico.***

El poder calorífico de un combustible se define como la cantidad de energía (KJ o Kcal) que produce en la combustión de un kilo del mismo. El poder calórico superior (PCS) es el calor que desprende un kilo de combustible completamente seco, contando con el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrogeno. El poder calórico inferior (PCI) solo considera el calor desprendido por el combustible sin contar con el calor de condensación del vapor. Esta característica define al combustible como tal. Altos poderes calóricos indican buenos combustibles y bajos poderes caloríficos indican combustibles más discretos. (**Castell, 2005**).

El poder calórico de las briquetas está en función del material de procedencia. Si la briqueta tiene restos de lijado el poder calórico es menor y el porcentaje de cenizas aumenta. Para aumentar el PC de la briqueta se puede añadir parafina, que tiene un poder

calórico mayor que la madera, arde bien y además transmite el calor al interior de la briqueta. (**Camp and Marcos, 2008**).

Las briquetas tienen mayor poder calórico volumétrico (kg/dm^3) que otros combustibles como por ejemplo las astillas, ya que su densidad es mucho mayor. Desde este punto de vista el poder calorífico de las briquetas es similar a los pellets. (**Senovilla and Antolín, 2005**)

- *Inflamabilidad o Temperatura de Ignición*

Borja (2006), define el punto de inflamación o ignición de un material a la temperatura a la cual se desprende vapor en cantidades suficientes para formar una mezcla que puede encenderse en contacto con el aire. El mismo autor señala que el porcentaje de humedad tiene una relación inversamente proporcional con la inflamabilidad del material.

Los combustibles (sólidos, líquidos o gaseosos) no podrán arder si no han alcanzado la temperatura de inflamación o temperatura de ignición. Existen dos temperaturas de ignición, la de auto ignición y la de ignición manejada. La primera es la temperatura mínima en la que una mezcla de gas y aire se enciende, debido a que ha llegado a una temperatura en la que no es necesario la chispa o llama para provocar fuego. La temperatura de ignición manejada es la temperatura a la cual una mezcla de gas y aire se encienden debido a la presencia de una llama o chispa. (**León and Carmona, 2008**).

Para **Camps and Marcos (2002)**, la temperatura de inflamabilidad de la briqueta es ligeramente superior a las astillas, porque en la superficie de la briqueta se forma una película carbonosa cuyo coeficiente de conductividad térmica es inferior a la madera. Esta capa es producto de una combustión incompleta por el calor generado en la compactación.

II. PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE DOS MADERAS DE IQUITOS:

2.1 OBJETIVO:

Hacer un análisis del proceso de producción de briquetas de residuos de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*) y la Caracterización física y química de las briquetas.

2.2 MATERIALES:

2.2.1 Lugar de estudio.

La ejecución del proyecto se desarrolló en la empresa Corporación Industrial Nanay S.A.C (CORINAY), dedicaba a la producción de briquetas de residuos de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*), la empresa está ubicada en el Km. 3 de la Carretera Rumo Cocha, Distrito de San Juan Bautista, Ciudad de Iquitos, Provincia de Maynas, Región Loreto.

La caracterización de las briquetas se llevó a cabo en el Laboratorio de Pulpa y Papel, Área de Transformación Química y en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, Área de Transformación Mecánica, ambas pertenecientes a la facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

2.2.2 Materia prima para la elaboración de briquetas:

Respecto a la materia prima, se usó los residuos de aserrín y viruta de las especies de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*), obtenidas de la empresa Desarrollo Forestal S.A.C., empresa dedicada principalmente a la producción de madera aserrada de dichas especies. La empresa se ubica al lado de la planta briqueteadora, por lo que, el traslado de residuos sólidos es a través de un sistema de succión.

2.2.3 Muestras:

2.2.3.1 Muestras de campo.

Las muestras usadas en la caracterización físico – química fueron obtenidas de la producción de un día de la planta briqueteadora, cuidando de obtener muestras representativas para los análisis del laboratorio.

Para tal efecto, por el método de muestreo aleatorio simple se estimó una muestra de 204 briquetas, de una población de 840 que equivale a una 1.008tn. (Producción del día de ensayo). Sin embargo, por el volumen de la muestra y para una mayor representatividad se ejecutó cuatro cuarteos y la eliminación de seis briquetas por exceder las dimensiones establecidas. Finalmente se obtuvo una muestra promedio de 12 briquetas.

Las briquetas tenían las siguientes características: 9.3 cm. de diámetro y 15 cm. de largo.

2.2.3.2 Muestras de laboratorio.

Las muestras de campo fueron reducidas manualmente a 5 cm. de largo. con la finalidad de tener porciones representativas en tamaño adecuado para ejecutar las pruebas de laboratorio. Haciendo un total de 36 muestras, las cuales fueron seleccionadas aleatoriamente para los respectivos análisis físico – químico, en un número de seis muestras por análisis.

2.2.4 Materiales de campo.

- Higrómetro marca “Aquaboy”, con sensibilidad de 1 %.
- Cinta métrica metálica de 8m.
- Bolsas de cierre hermético.
- Bolsa de embalaje.
- Libreta de Campo.
- Lápiz.
- Cámara Fotográfica marca Sony.
- 1 Balanza de 0,1 g de precisión.

2.2.5 Materiales, equipos y reactivos del laboratorio.

2.2.5.1 Materiales:

- Matraz de 250 mL.
- Papel filtro.
- Vaso de precipitación de 50 mL.
- Vaso de precipitación de 250 mL.
- Erlenmeyer de 1000 a 2000 mL.
- Balones de 250 mL.
- Pipetas de 10 mL.
- Probetas de 250 mL.
- Crisoles de porcelana con capacidad de 30 mL.
- Varillas de vidrio.
- Embudos.
- Termómetro.
- Condensador de reflujo.
- Desecador.

2.2.5.2 Equipos:

- Equipo soxhlet.
- Calentador eléctrico.
- Bomba calorimétrica.
- Mufla eléctrica de un rango de temperatura de 0 a 1200 °C.
- Estufa marca Herarus y con rango de temperatura de 0 a 115 °C.
- 1 balanza analítica de 0,1 mg de precisión.
- Agitador magnético y Soportes.
- Tubo colector de 10 mL.
- Refrigerante a Reflujo.

2.2.5.3 Reactivos:

- Tolueno p.a.
- Alcohol – benceno 1:2.
- Ácido sulfúrico al 72 %.
- Agua destilada.
- Hielo.
- Alcohol de 96°.
- Ácido nítrico concentrado.
- Solución saturada de acetato de sodio.
- Solución de ácido Clorhídrico a 12,7 %.
- Solución de hidróxido de sodio a 0,1 N.
- Solución de Ioduro de potasio a 10 %.
- Solución de bromuro de potasio 0,1N.
- Solución de bromato de potasio 0,1N.

2.2.6 Materiales y equipos de gabinete.

- Computadora
- Impresora.
- Calculadora

2.3 METODOLOGÍA:

El proyecto consto de dos etapas: la Etapa I, consiste en la evaluación del proceso de producción de briquetas de madera de residuos de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*). En la segunda Etapa se realiza la caracterización física – químico de las briquetas.

La investigación realizada es de tipo exploratorio, con un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo).

2.3.1 Evaluación del proceso de producción de Briquetas

En esta etapa se realiza la evaluación y descripción de las características del proceso de producción de las briquetas que serán utilizadas en el análisis físico químico, durante un mes de observación en campo.

Para el desarrollo de esta etapa se aplicó una metodología con enfoque cualitativo bajo el método acción participación.

2.3.2 Caracterización físico – química de las briquetas.

Se realiza la caracterización física y química de las briquetas con un enfoque cualitativo bajo el método no experimental. El objetivo es determinar la calidad del producto como combustible. Los parámetros analizados son: la humedad, densidad aparente, friabilidad, resistencia a la compresión, poder calórico, composición química e inflamabilidad.

2.3.2.1 Determinación del contenido de humedad de las briquetas

Se determinó el contenido de humedad según norma TAPPI T 208 om – 94.

2.3.2.2 Densidad aparente:

La densidad aparente de las briquetas fue obtenida por el método de desplazamiento de agua. Para ello se introdujo cada muestra de briqueta en una probeta graduada con agua y se midió el volumen de agua desplazada. Previamente las briquetas fueron bañadas en silicona, determinándose su peso con medidas antes y después de la silicona. La densidad básica se calculó según la siguiente expresión (**Camps and Marcos, 2002**).

$$D_b = \frac{p}{V_{ad} - [(t-p)/d_s]} \text{ kg/m}^3$$

Donde:

- D_b : Densidad de la briqueta, en kg/m^3
 p : Peso de la briqueta, en kg
 v_{ad} : Volumen de agua desplazada, en m^3
 t : Peso de la briqueta más la silicona, en kg
 d_s : Densidad de la silicona, en kg/m^3

2.3.2.3 Determinación de la Friabilidad:

Para determinar la friabilidad, las briquetas fueron colocadas dentro de un tambor rotatorio por 15 minutos a una velocidad de rotación de 35 rpm. Se pesaron al inicio y al término del ensayo. Esta prueba fue determinada siguiendo la metodología descrito por **Quirino and Otávio, (1991)**.

La friabilidad se evaluó a través de la siguiente ecuación.

$$FR = \frac{F_2 - F_1}{F_1} * 100$$

Donde:

- FR : Friabilidad (%)
 F_1 : kg de briquetas antes del ensayo.
 F_2 : kg de briquetas después del ensayo.

2.3.2.4 Determinación de la Resistencia a la Compresión.

Se determinó la resistencia a la compresión de las briquetas con respecto a su eje simétrico, la finalidad es determinar su comportamiento mecánico cuando es sometido a una carga o esfuerzo (Fig.2). Para el ensayo se utilizó el Método Extended Planar Strength, descrito por **Rocha (2006)**. La resistencia a la compresión se determinó con la siguiente ecuación.

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{4 F \text{ (N/mm}^2\text{)}}{\pi * d^2}$$

Donde:

- Σ : Resistencia a la Compresión lateral (MPa)
- F : carga de ruptura (N)
- D : diámetro (mm)

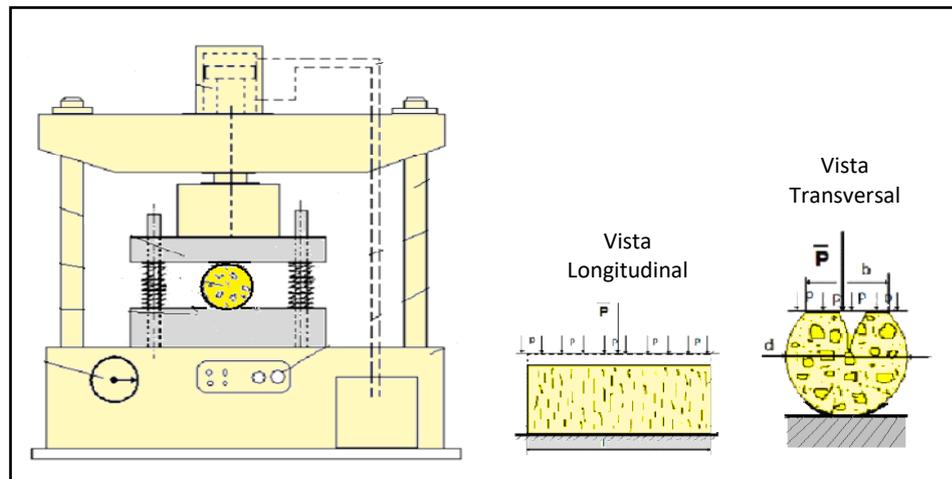


Figura 2: Determinación de la resistencia a la compresión.
Fuente: Lunguleasa and Budau, (2010)

Para la prueba se determinó una carga aplicada de 2400 libras a una presión de 0,0120 pulgadas/minuto. La carga fue aplicada en la parte superior de la briketa hasta que la fractura de la misma.

2.3.2.5 Poder Calorífico Superior

Para determinar el poder calorífico superior de las briquetas se utilizó el método de la bomba Calorimétrica Parr, siguiendo los pasos de la norma ASTM D-2015-66.

2.3.2.6 Determinación de la Composición Química.

Se determinó la composición química de la briqueta, según las siguientes normas y métodos.

Celulosa	:	Según método Kurschner Hoffner.
Hemicelulosa	:	Método SCAN C4: C61
Lignina	:	Método Klason.
Extractivos	:	Según norma TAPPI T204 cm – 97
% Cenizas	:	Según norma ASTM D1762

2.3.2.7 Determinación de la inflamabilidad o auto ignición.

Se determinó la temperatura de auto – ignición según el Método **Quintana, (2002)** adaptado en el Laboratorio de Pulpa y Papel – UNALM. Este método consistió en colocar 15 g. de briqueta en la mufla, y luego subir la temperatura progresivamente, registrando los grados centígrados a la cual se enciende, determinando así la temperatura de inflamación.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

2.4.1 Evaluación del Procesos de Producción de Briquetas:

La producción de las briquetas es de tipo Industrial, ya que la briqueteadora ejerce presiones de compasión superior a 100 MPa, y su producción es continúa.

Según **Fonseca and Tierra (2011)**, la ventaja de este tipo de producción es que no es necesario el uso de aglomerados para obtener productos de buena calidad, debido a las presiones que se ejercen.

Durante la evaluación del proceso de producción de briquetas se pudo observar que las siguientes variables de la producción influían en la compactación de los residuos:

- Contenido de humedad de la materia prima.
- Respecto al horno de secado: Caudal de alimentación de la materia prima y temperatura de Secado.
- Respecto al horno: Temperatura de los gases del horno y su demanda de combustible por hora.

2.4.1.1 Succión, Traslado y Almacenamiento de la Materia Prima

El aserrín obtenido de la empresa Desarrollo Forestal S.A.C., se recoge a través de un sistema de succión, compuesto por una red de tuberías secundarias dispuestas en cada máquina de corte de la planta de aserrado. Este sistema se conecta con la red de tuberías de aspiración principal que transportan los residuos hasta el ciclón de la planta de briqueteadora, a través de un sistema neumático. La función del ciclón es separar el polvo de aserrín del aserrín y la viruta, estos últimos depositados en el patio de acopio o zona de recepción de la materia prima (Ver fig.3).

En promedio el contenido de humedad de la materia prima es de 38%, la proporción de Cumala y Marupa es de 75% y 25% respectivamente, dato proporcionado por la empresa aserradora, de acuerdo a su producción y rendimiento.



Figura 3: Almacenamiento de materia prima en la empresa Corinay.

Foto: L. Huanca.

2.4.1.2 Secado

El sistema de secado consiste en: un hogar y un tambor rotatorio (horno de secado). El hogar es de ladrillo refractario, con un área de 4.4 m^2 , tiene una ventana para el abastecimiento del combustible y una para limpieza de las cenizas. La temperatura de los gases que ingresan al horno de secado debe estar en un rango 500 y $600 \text{ }^\circ\text{C}$, la cual se controla con la frecuencia de abastecimiento del biocombustible que en promedio es de 160 kg. briquetas por hora, este proceso se realiza manualmente.

El tambor rotatorio (Tromel o drym), consiste en un equipo cilíndrico de metal inoxidable, revestido con fibra de vidrio para evitar la pérdida de calor, gira sobre 4 engranajes dos a cada extremo. Tienen una inclinación de 2% con respecto a la horizontal, la longitud del cilindro es 10 m. y el diámetro de 1.8 m., y la velocidad de rotación es 5 rpm. Asimismo, el tambor consta de un termómetro en la parte central que permite determinar la temperatura de secado de la materia prima (Ver fig. 4). Esta temperatura debe oscilar entre los $70 - 80^\circ\text{C}$, con la finalidad de obtener residuos con una humedad de 12 a 16%. Si no se mantiene estas condiciones se corre el riesgo de obtener aserrín demasiado seco (menores al 10% de humedad) o demasiado húmedo (mayor a 20%), por ende, se obtenían briquetas demasiado secas o húmedas que se desmoronaban o cuarteaban y finalmente se obtenían láminas de 2 cm. en promedio de residuos compactados.

El traslado de la materia prima del patio de acopio al horno de secado es a través de un sistema de tornillo Sinfín, que funciona con un motor eléctrico. La alimentación del tornillo sin fin es manualmente, el caudal másico de alimentación de la materia prima en promedio es de 7 kg/minuto.

La temperatura del secado de la materia prima depende de la temperatura de los gases del hogar y la frecuencia de alimentación del tornillo sin fin. Es decir, si la T° de los gases es estable, pero se observaba un descenso de la temperatura de secado inmediatamente se disminuye la frecuencia de alimentación del tornillo sin fin hasta estabilizar dicha temperatura. Bajo estas condiciones, la disminución de la temperatura se explica por la saturación del gas caliente con la humedad de la materia prima porque el secado ocurre en flujo paralelo, es decir, el aire caliente y el aserrín circulan en el mismo sentido.

La materia prima y los gases saturados son trasladados, por un sistema de succión a un ciclón (velocidad $9 \text{ m}^3/\text{s}$) que separa la fracción sólida del gas. Esta operación también permite eliminar partículas muy finas, cuya presencia perjudica la adhesión de los residuos. El aserrín y viruta secos son almacenados en un silo de materia prima seca de 45 m^3 .



Figura 4: Horno de Secado.
Foto. L. Huanca

2.4.1.3 Briqueteado

El proceso de briqueteado consiste netamente en la compactación de la materia prima, cuyas características se han mantenido estables durante la producción de las briquetas y son:

- Presión de compactación de 1200 kgf/cm²
- Frecuencia de alimentación de 60-63 Hz
- Matriz cónica de 93 mm diámetro

La materia prima seca se traslada a través de un sistema de tornillos sin fin a la tolva de alimentación de la briqueteadora, para luego pasar a la cámara de pre compactación por un sistema de dosificación, que consta de dos tornillos que giran en sentido contrario. En la cámara de pre – compactación los residuos son reducidos en volumen y conducidos al área de compactación, aquí el pistón comprime la materia prima hasta la matriz cónica (quien fija la forma de la briqueta), con golpes continuos, a una presión de 1200 kg/cm².

Esta presión provoca un rozamiento en las paredes del cilindro, aumentando la temperatura, al interior, a más de 100° C. Los golpes del pistón son provocados por un sistema de biela-manivela acoplado a la volante que eleva la energía cinética y proporciona una compactación continua y suave. Sin embargo, cuanto más seco se la materia prima, la demanda de energía aumenta por la fricción generada. (Ver fig. 5)



Figura 5: Planta briqueteadora para residuos de madera
Foto: L. Huanca.

En campo se observó que el incremento de la humedad superior a 16% en promedio genera durante la compresión una mayor cantidad de vapor de agua, el cual, rompe la briqueta por su superficie al enfriarse. En algunos casos, se genera la explosión que la briqueta que es lanzada como un proyectil.

Por otro lado, si la frecuencia de alimentación está por debajo de los 60 Hz, las briquetas el pistón no tiene suficiente materia prima para su compactación, por ende, no se lograba una buena densificación de la briqueta que finalmente se desmoronaba al manipuleo.

2.4.1.4 Enfriamiento y embalado.

Después de la etapa de briqueteado, el aserrín compactado sale por un conducto cilíndrico propio de la briqueteadora unido a un canal de enfriamiento de 6 m. de longitud, de acero, regulable y a manera de molde. (Ver fig. 6). Este tipo de canal de enfriamiento permite mantener el volumen de la briqueta, ya que según lo explicado por **Fonseca and Tierra (2011)**, controla el efecto de relajación de la briqueta debido expansión de la materia prima, cuando se altera el “equilibrio” por eliminación de la presión. Los mismos autores manifiestan que este equilibrio se logra cuando los fragmentos son capaces de soportar la presión externa aplicada, porque las partículas tienden a comportarse como solidos frágiles por efecto de la presión.

El canal de enfriamiento tiene como finalidad darle un tiempo adecuado de enfriamiento a las briquetas. Cuanto mayor tiempo la briqueta permanece en el canal de enfriamiento su compactación era más estable.

Las briquetas, formadas en continuo, son cortadas manualmente a una longitud de 15 cm. Finalmente, las briquetas fueron embaladas en costales de polipropileno con un peso de 50 kg. en promedio, para luego ser apiladas en parihuelas para facilitar su traslado.



Figura 6: Sistema de almacenamiento de las briquetas.
Foto: L. Huanca

A continuación, se muestra el flujo de la producción de briquetas (Fig. 7).

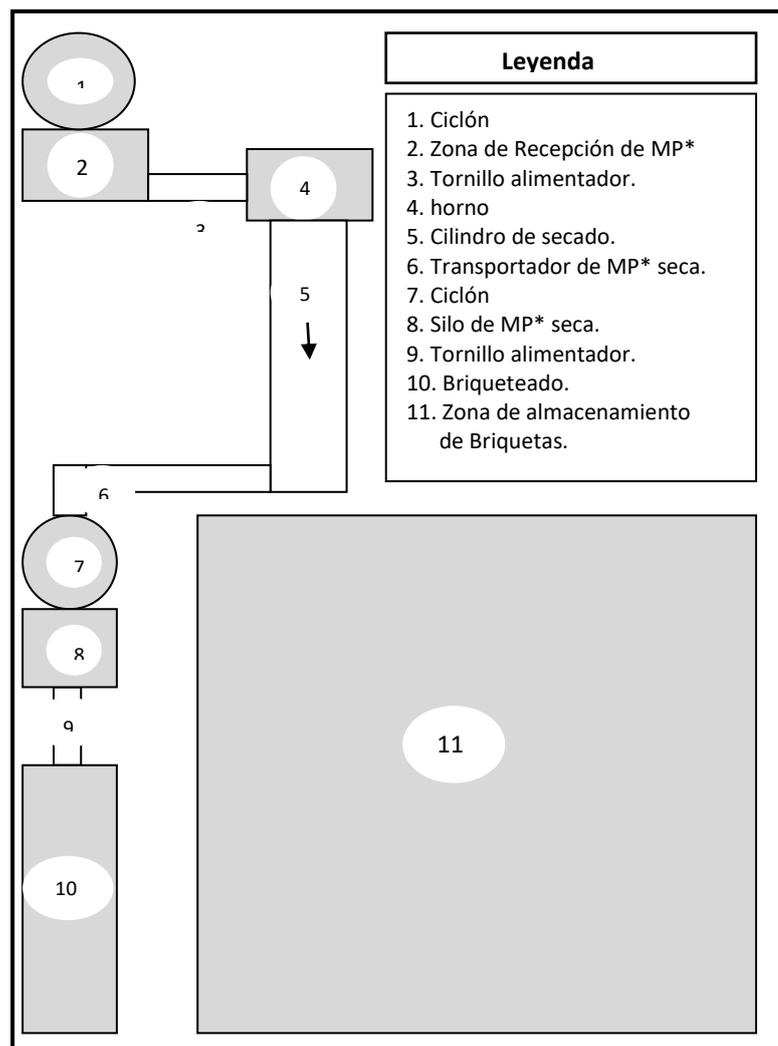


Figura 7: Flujo de Proceso Productivo.
Fuente: Elaboración Propia

2.4.2 Caracterización físico – química de las briquetas.

En el siguiente cuadro se detalla los resultados promedio de la caracterización fisicoquímica de las briquetas, respecto a sus dimensiones, contenido de humedad, densidad aparente, friabilidad, resistencia a la compresión y carga de ruptura promedio, poder calórico y temperatura de inflamabilidad. Para un mejor análisis se compara los resultados con la norma sueca SS18721 que clasifica la calidad de la briketa en tres grupos.

Cuadro N°4: Resultados promedio de la caracterización físico – química de las briquetas.

Características de la Briketa		Unidad	Resultados
Dimensiones	Diámetro	mm	93
	Altura	mm	150
Contenido de Humedad		%	11.75
Densidad Aparente		Kg/m ³	1145.29
Friabilidad		%	11.32
Resistencia a la compresión		MPa	2.23
Carga de Ruptura promedio (kgf)		Kgf	1546.35
Poder Calórico	PCS	Kcal/Kg	4185.04
	PCI	Kcal/Kg	3622.8
Temperatura de Inflamabilidad		°C	320

- Dimensiones.

Las briquetas obtenidas son cilíndricas y tiene las siguientes dimensiones, 93 mm. de diámetro y 150 mm. de largo, cumplen con los requisitos de calidad del grupo I de la norma SS18721. La forma de las briquetas le da la cualidad de ser más resistentes al impacto durante el almacenado y transporte.

- Porcentaje de Humedad.

El porcentaje de humedad promedio de las briquetas es de 11.75%, y según la clasificación de la norma sueca se ubica en el grupo I. Esta característica es importante ya que tiene una relación indirecta con el poder calórico, es decir a mayor humedad disminuye el poder calórico.

Según **Castell (2005)**, el porcentaje de humedad igual o menor a 25% es adecuado para la combustión. Porcentajes elevados de humedad demandan mucha energía para secar la madera disminuyendo así la cantidad de energía disponible.

- **Densidad aparente.**

Respecto a la densidad aparente, su valor promedio de las briquetas ensayadas es de 1145.29 kg/m³. Según **Quirino (2002)**, las densidades aparentes pueden variar de 1000 kg/m³ a 1300 kg/m³; siendo las densidades de briquetas de aserrín de 1220 kg/m³ y de cascara de arroz 1280 kg/m³. Respecto a la norma Sueca las briquetas serian clasificadas en el grupo I, ya que sus valores son superiores a 550 Kg/m³.

Según la **CPM (2008)**, densidad de la madera de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*) es 450 y 360 kg/m³ respectivamente. En un estudio de caracterización de residuos **Ricardo (2003)**, concluyo que la densidad del aserrín es 367.6 kg/m³, mientras que de las astillas secas es de 442.9 kg/m³. Por lo expuesto, las briquetas en estudio han cumplido con su objetivo de ser un producto más denso que las materias primas, asimismo sus valores están dentro del rango de las densidades de la bibliografía.

- **Friabilidad.**

El ensayo de friabilidad simulo el golpeteo que sufren las briquetas cuando son trasladadas o descargadas; cuanto más friable es la briqueta se deshace con facilidad. El valor promedio obtenido de la friabilidad quiere decir que se perdió el 11.32% de la masa de la briqueta durante el ensayo.

En un estudio de briquetas de Pinus Caribae **Bocorny (2008)**, encontró valores relativos de friabilidad que variaba en rangos de 10.38% y 29.45%. De acuerdo a la norma sueca SS 187121 las briquetas evaluadas pertenece a la clase 3, ya que el porcentaje de finos supera el 10%. En tal sentido, las briquetas en estudio son más friables que las referencias, sin embargo son menos friables que las briquetas de carbón vegetal que en promedio tienen un valor de 18.5%. (**Quirino and Otávio, 1991**).

- **Resistencia a la compresión**

Las briquetas obtenidas tienen una resistencia a la compresión paralela promedio de 2.23 MPa. La carga de ruptura promedio fue de 1546.35 kgf. **Rocha (2006)**, obtuvo una resistencia a la compresión lateral promedio de 4 MPa, para briquetas de madera, utilizando el mismo método empleado en este estudio. **Bocorny (2008)**, con la misma metodología determinó una resistencia a la compresión de 3.2 MPa para briquetas de madera de 95 mm de diámetro a 12.9% de humedad. En ambos casos las briquetas en estudio tienen menos resistencia a la compresión. Ello se puede deber a la débil cohesión de las partículas comprimidas, que puede explicar los resultados obtenidos en los ensayos de la resistencia a la compresión y la friabilidad de la briketa.

En el análisis de resistencia de compresión lateral de briquetas de carbón se obtuvo una carga de ruptura promedio de 31.71 kgf (**Quirino and Otávio, 1991**). En este sentido las briquetas en estudio tienen una ventaja considerable, ya que su carga de ruptura promedio es de 1546.35 kgf.

- **Poder Calorífico.**

El poder calorífico superior promedio de las briquetas es de 4 185.04 kcal/kg (18 MJ/kg o 5 KWh/kg). El PCI promedio obtenido es de 3622.80 Kcal/kg (15 MJ/kg), en referencia a la norma sueca SS187121 la briketa estaría dentro del Grupo I.

Así mismo, **Carlos (2005)**, encontró en briquetas de corteza eucalipto un poder calórico superior de 4200 kcal/kg., este valor es superior a los resultados obtenidos en la presente investigación. Esto explica porque la corteza tiene más PCS que la madera debido a su mayor contenido de resinas y gomas. (**FAO, 1991**).

En un estudio de caracterización de briquetas de carbón vegetal se obtuvo un PCS promedio de 5364 kcal/kg, superior a las briquetas obtenidas, debido a su mayor porcentaje de carbono fijo. (**Quirino and Otávio, 1991**). El petróleo tiene un poder calórico de 9300 a 10 400 Kcal/kg., dos veces mayor que las briquetas evaluadas, sin embargo, su desventaja radica en que su transformación para su uso genera una liberación significativa de gases de efecto invernadero que contaminan la atmosfera, y la combustión del petróleo y sus derivados genera lluvia acida por la producción de óxidos de nitrógeno.

- **Temperatura de inflamabilidad o temperatura de auto ignición.**

La temperatura de la inflamabilidad promedio de las briquetas es 320 °C, según **Ritter (1956)** la temperatura de auto ignición de la madera es 300 °C. Al respecto, **Marcos (1994)**, explica que las briquetas al ser un material más denso que la madera tienen menos aire en su interior, por lo tanto, su coeficiente de transmisión térmica es menor que la madera.

La alta densidad y su bajo coeficiente de transmisión hacen que las briquetas ardan más despacio que la madera y que permanezcan más tiempo en el hogar.

- **Composición Química de la briqueta.**

En el siguiente cuadro se detalla los valores promedio del análisis de la composición química de la briqueta.

Cuadro N°5: Resultados de la Composición química de la Briqueta.

Composición Química	Unidad	Briqueta
Celulosa	%	49.76
Pentosanos	%	13.32
Lignina	%	24.67
Extractivos	%	3.72
Contenido de Cenizas	%	1.63

Para realizar un mejor análisis en la siguiente figura se realiza la comparación de la composición química de las especies de Cumala (*Virola sp.*) y Marupa (*Simarouba amara*) con la briqueta. Respecto a los valores de las especies, se ha tomado como referencia los resultados de una investigación realizado por **Uceda (1980)**.

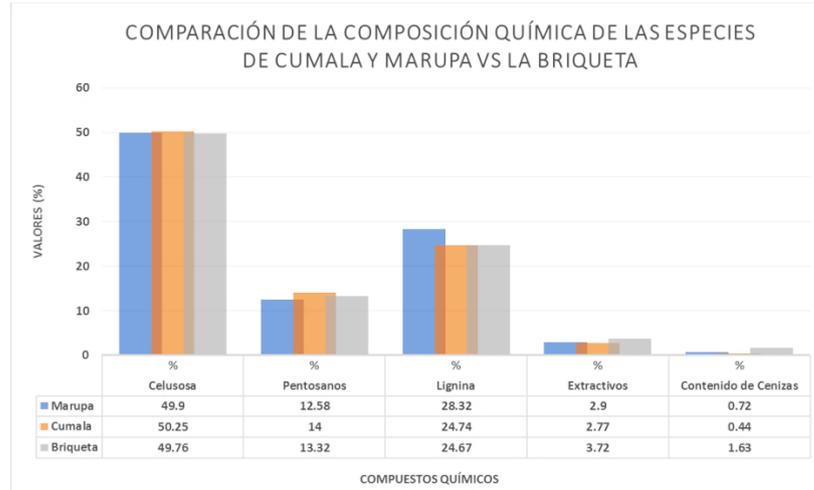


Figura 8: Comparación de la composición Química de la Briqueta y las especies de Cumala y Marupa y las Briquetas.
Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico se puede observar que los compuestos de celulosa y lignina de la briqueta tienen valores relativamente menor respecto a la materia prima. El porcentaje de cenizas de la briqueta es significativamente mayor que ambas especies, lo cual puede deberse a la presencia de residuos de corteza. Al respecto **Neenan (1984)**, señala que la corteza tiene 4% más de ceniza que la madera. De igual manera **Vieira (2005)**, encontró en briquetas de corteza de eucalipto tiene 9% de cenizas. El alto porcentaje de cenizas también puede ser explicado por la contaminación de la materia prima con tierra y otros materiales durante el manipuleo.

La ceniza residual es un problema para las industrias, por lo tanto, cuanto menor es el porcentaje de cenizas mejor es la calidad del combustible. **Quirino and Otávio (1991)**, hallaron 21.3% de cenizas en promedio en briquetas de carbón vegetal, por lo tanto, las briquetas en estudio son de mejor calidad. Según **Castell (2005)**, las cenizas reducen el poder calorífico del combustible y el rendimiento térmico de un horno por interferir en la transferencia de calor.

III. CONCLUSIONES

- En el proceso de secado se debe controlar la Temperatura a la cual se seca el producto para obtener materia prima con una humedad adecuada, en consecuencia, un producto final de calidad.
- La tecnología usada en la producción de briquetas ha determinado que se obtengan productos de buena calidad y de excelentes propiedades físico - mecánicas.
- La humedad es uno de los parámetros más importantes para fabricar briquetas, ya que de ello dependerá las características energéticas que pueda tener en el producto final, siendo recomendable para este proceso que los valores de la humedad de la materia prima de la briqueteadora se encuentren en un intervalo de 14 -16% (base húmeda).
- El control del proceso de secado de la materia prima es fundamental para lograr briquetas de buena calidad.
- Por las características físico – química de las briquetas de residuos de cumala (*Virola sp*) y marupa (*Simarouba amara*) son biocombustibles sólidos de calidad, que pueden ser usados como fuente de energía de los calderos de la industria forestal de la región Loreto.
- Las briquetas por sus características en dimensiones, humedad, densidad y poder calórico, según la Norma Sueca SS18721 han sido clasificadas, dentro del grupo I.

IV. RECOMENDACIONES.

- Para futuras investigaciones se debe considerar determinar el tamaño de las partículas de la materia prima, ya que según bibliografía influye en las propiedades de la briqueta.
- Una de las dificultades para fabricación de briquetas es el abastecimiento continuo de materia prima, por lo tanto, se debe promover los inventarios de biomasa con potencial energético y el análisis del costo de su extracción.
- Desde el punto de vista energético las briquetas son competitivas en el mercado, sin embargo, es necesario conocer la rentabilidad de la producción de briquetas, ya que los costos de producción podrían imposibilitar la inclusión de este producto al mercado

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ARNALDOS, J., NAVALON, X., PASTOR, E., & PLANS, E. A.** 2004. *Manual de Ingeniería Básica para la prevención y extinción de incendios forestales*, Madrid, Libros Mundi Prensa Ed.,474 p.
- BALLESTEROS, M.** 2008. Biomasa como recurso energético. En HERAS, M., *Fuente de Energía para el Futuro, España, Ministerio de Educación Ed.,125-140 p.*
- BANEO, P.** 2015. *Caracterización de los aserraderos en los Distritos de Iquitos, Unchana, San Juan y Belén*". Iquitos. Consultado en Sep. 2017. Disponible en URL: http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/4477/Ida_Tesis_Titulo_2015.pdf?sequence=1
- BORJA, M.** 2006. *Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético*. España, Univ. Politec. Valencia Ed., 158p.
- BOCORNY, V.** 2008. *Tecnología e economía do briquete de madeira*. Brasil. Consultado en Sep. 2017. Disponible en URL: http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/6274/Tese-Parte1_Luiz-Vicente-Bocorny-Gentil.pdf?sequence=1
- BUENO, Z.** 1987. Madera como Combustible. *Revista Forestal del Perú*, 14 (2). 3-14p. Consultado en Agost. 2017. Disponible en URL: [http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol14_2_87_\(20\)/vol14_no2_art1.pdf](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol14_2_87_(20)/vol14_no2_art1.pdf)
- BURSCHEL, H., HERNANDEZ, M., & LOBOS, M.** 2003. *Leña: Una Fuente Energética Renovable para Chile*,. Universitaria Ed.,171p.
- CAMPS, M., & MARCOS, F.** 2002. *Los Biocombustibles*. Madrid, Mundi-Prensa Ed. 200p.

- CARRETERO, R.** 1992. Potencial Energetico de la Biomasa Forestal Mediterranea. *Montes* (Ext.): 98–102p. Consultado en Agost. 2009. disponible en URL: <http://www.enersilva.org/areasubir/articulos/Articulo%20revista%20montes%201992.pdf>
- CASTELL, X.** 2005. *Tratamiento y Valorización Energética de residuos*. España, Santos Ed. 1228p.
- CASTRO, P., & COELLO, J. C.** 2007. *Opciones para la Producción y Uso del Biodisel en el Perú*. Lima. Sol. Practicas de ITDG Ed. (En línea). Consultado en Nov. 2008. Disponible en URL: <http://www.solucionespracticas.org.pe>
- CONFEDERACIÓN PERUANA DE LA MADERA,** 2008. *Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales*. CITE madera Ed. Lima. (En línea). Consultado en Sept. 2009. Disponible en URL cites.produce.gob.pe/uploads/.../20100323TOMO_II_32_ESPECIES.pdf
- CLOTARIO, T., PAREDES, C., SIMBAÑA, A., & BERMUDEZ, J.** 2006. Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. *ESPOL*, vol.19 (1): 113-120p. (En línea). Consultado en Nov. 2009. Disponible en URL: www.fimcp.espol.edu.ec/sitefimcp/web/profesores/.../166_curriculum.pdf
- FAO.** 1991. *Consevación de Energía en la Industria Mecánica Forestal*. Estudios FAO: Montes N° 93. Roma, Food y Agricultura Org. (En línea) Consultado en Febr. 2008. Disponible en URL: <http://www.fao.org/docrep/t0269s/T0269S00.htm>
- FAO.** 2004. *Terminología Unificada de los Dendrocombustibles Sólidos*. Roma, 50 p. (En línea) Consultado en Abr. 2009. Disponible en URL: <http://www.fao.org/docrep/t0269s/T0269S00.htm>

- FONSECA, C., & TIERRA, T.** 2011. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre*. Ecuador. 10-18 p. (En Línea). Consultado en Sept. 2017. Disponible en URL: [file:///C:/Users/lizbeth.huanca/Downloads/15T00495%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/lizbeth.huanca/Downloads/15T00495%20(4).pdf)
- FLORES, P.** 2004. *Diseño y Montaje y puesta en marcha de un Reactor de Laboratorio para la medida de la Actividad Catalitica de Catalización de Oxidación Total de Efluentes de Combustión de Leña*. Temuco – Chile, 15p. (En Línea). Consultado en Abr. 2008. Disponible en URL: <biblioteca.uct.cl/tesis/paola-flores/tesis.pdf>
- HERAS, M.** 2008. *Fuentes de Eneqía para el Futuro*. España, Ministerio de Educacion,307p. (En línea). Consultado en Agos. 2008. Disponible en URL: [http://books.google.com.pe/books?id=EcpvEn3c8vcC&dq=inauthor:"Her+as+Celemín,+Ma+del+Rosario"&source=gbs_navlinks_s](http://books.google.com.pe/books?id=EcpvEn3c8vcC&dq=inauthor:)
- IRVINE, G.M.** 1984. “*The glass transition of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis*” Tappi J. 67(5): 118-121 p.
- KOLLMAN, F.** 1959. *Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones*. 2^{da} Ed. Madrid, España. Instituto Forestal de Investigación y experiencia al servicio de la madera. 789p.
- LARA, V., & ANTOLIN, G.** 2005. *Planta Térmica de Biomasa de la Industria de Transformación de la Madera*. España, 25p. (En línea). Consultado en Agos. 2009. Disponible en URL: www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos_05/LaraGarcia.pdf
- LEÓN, A. & CARMONA, R.** 2008. Estudio comparativo del punto de ignicion y avance de llama en madera de pino radiata versus un compuesto de madera - resina termoplástica. (En línea). Consultado en Mayo. 2010. Disponible en URL: dspace.otalca.cl/retrieve/20077/Resumen.pdf

- LUNGULEASA, A. and BUDAU, G.** 2010. Two features of the ecological wooden briquettes. *Revista Recent*, 11 (1), 33-37p. (En línea). Consultado en Jun. 2010. Disponible en URL: http://www.recentonline.ro/028/Lunguleasa_R28.pdf
- MARCOS, F.** 1994. Pellets y Briquetas. *Ecologia*. Revista AITIM. 171: 54-62. Madrid. Consultado en Jul. 2017. Disponible en URL: http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf
- NEENAN, M.** 1984. *Biomass qualities for energy conversion with particular reference to the combustion of wood*. Reporte N°2. Biomass growth and production. International Energy Agency Forest Energy Agreement, Ministry of Natural Resources. Ontario. Canada. 19 p.
- ORTIZ, L.** 1994. *Energías Xilogeneradas*. Vigo. España, 216p.
- ORTIZ, L.** 2008. *Producción de Biocombustibles de Alta Densidad en España*. CIDEU , 17 p. (En línea). Consultado en Jul. 2009. Disponible en URL: dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=2718831&orden=0
- ORTIZ, L., & MIGUEZ, J.** 1995. *Energía Alternativas y Medio Ambiente*. Ed. Ayuntamiento de Vigo. España: Concello, Patrimonio Histórico y Medio Ambiente. 248 p.
- ORTIZ, L., TEJADA, A., & VAZQUEZ, A.** 1996. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de Elementos.
- PIORNO, A., & OVIEDO, F.** 1993. *Energías Renovables: Aproximación a su Estudio* 2^{da} Ed. Salamanca, Amauro, 177p.
- QUINTANA, V.** 2002. *Elaboración y Evaluación Fisico-Química de Tableros de Fibra de residuos del aserrio de tres especies forestales del CIEFOR-Puerto Almendra*. Tesis de Ingeniero forestal. Iquitos, Perú. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.

- QUIRINO, W., & OTÁVIO, B.** 1991. *Características e Índice de Combustao de Briquetas de Carvao Vegetal*. Brasil, 30p. (En línea). Consultado en Jul. 2009. Disponible en URL: <http://mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf>
- QUIRINO, W.** 2002 *Utilização energética de resíduos vegetais*. Laboratório de produtos florestais. Módulo do Curso “Capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e dos resíduos vegetais”. Brasilia, Ed. Ibama. Consultado en Ago. 2017. Disponible en URL: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>
- RAMOS, P.** 2008. *Energías y Cambios Climaticos: XII Jornadas ambientales*. Colección Aquilafuente N° 128. 416p. (En línea). Consultado en Nov. 2008. Disponible en URL: http://books.google.com.pe/books?id=Y6VasPJrQQC&dq=energia+y+cambios+climaticos&source=gbs_navlinks_s
- RELOVA, I., MARCOS, F., & VIGNOTE, S.** 2006. Obtención de Energia a partir de residuos madereros densificados. *AITIM* (242): 80 p. (En Línea). Consultado en Ene. 2008. Disponible en URL: www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_5099_23541.pdf
- ROJAS, A.** 2004 *Prefactibilidad Técnica y Económica para la Instalación de una Planta de Pellets para Combustibles a partir de Deschos de Madera*. Tesis de Ingeniero Forestal. Santiago-Chile. Universidad de Chile. 127p. (En Línea). Consultado en Mar. 2009. Disponible en URL: www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2004/rojas_a2/.../rojas_a2.pdf
- ROCHA, S.** 2006. *Mechanical evaluation for the quality control of biomass pellets and briquettes*. Aachen University. The Netherlands, 26p. (En Línea). Consultado en Jul. 2010. Disponible en URL: www.svebio.se/attachments/33/291.pdf

- SARABO, F., & PEREZ, C.** 1991. *Energías Renovables*. España. Publicaciones Técnicas S.A.
- SENOVILLA, L. & ANTOLIN, G.** 2005. *Revalorización Energética de los Residuos de la Industria Vitivinícola*. España. (En Línea). Consultado en Abr. 2009. Disponible en URL http://www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos_05/SenovillaArranz.pdf.
- RITTER, H.** 1956. *Introducción a la Química*. México: Editorial Reverte. 20 p.
- UCEDA, M.** 1980. *Determinación del Poder Calorífico de 20 especies Forestales de la Amazonia Peruana*. Tesis de Ingeniero Forestal. Lima-Perú, Universidad Agraria la Molina. 57p.
- CARLOS, V.** 2005. *Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto*. Tesis de Magister Scientiae. Vicosa-Brasil, Universidade Federal de Vicosa. 26 p. (En Línea). Consultado en Ago. 2017. Disponible en URL: <http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9759/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- VELÁZQUEZ, B.** 2006. Situación de los Sistemas de Aprovechamiento de los Residuos Forestales para su Utilización Energética. *Ecosistemas* , 15 (1), 77-86p. (En Línea). Consultado en Nov. 2010. Disponible en URL: www.revistaecosistemas.net/pdfs/402.pdf