

ANEXOS

APÉNDICE A

ANEXO A. Procesos de Conversión energética de la biomasa

Procesos de conversión energética de la biomasa

➤ Gasificación

Es el proceso por el cual un combustible sólido es oxidado parcialmente para producir un combustible gaseoso, el cual contiene: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), vapor de agua (H₂O). La cantidad o porcentaje que se obtiene mediante el proceso está relacionada con las características del biocombustible (humedad, granulometría), del carburante utilizado (oxígeno, aire) y las condiciones de operación (presión, temperatura) (ver Ilustración A. 1). Las temperaturas para iniciar la gasificación es de 700 – 800°C, sometiéndose una temperatura de operación de aprox. 1100°C, pero sin superar los 1500°C, para evitar la fusión de las cenizas. Las presiones puede oscilar entre 1 a 30 atmósferas. Se debe tener en cuenta que la biomasa debe tener humedad baja, para evitar que la evaporización del agua consuma parte de la energía y reduzca el rendimiento del proceso. Entre los factores que intervienen en la gasificación de un tipo específico de biomasa se pueden citar los siguientes:

- **Temperatura:** El aumento de la temperatura favorece la producción de H₂ y CO, en detrimento de CH₄ y H₂O.
- **Presión:** El aumento de la misma va en contra de las reacciones de gasificación, aumentando los alquitranes y los hidrocarburos. Los gasificadores de lecho móvil trabajan a presión atmosférica mientras que los de lecho fluidizado lo hacen con presiones que pueden alcanzar los 30 bares.

- **Relación agente gasificante/biomasa:** La relación óptima aire/biomasa se sitúa alrededor de 1.5 y para lecho fluidizado entre 0.5 y 1.6.
- **Composición química:** Está directamente relacionada con los gases producidos.
- **Poder Caloríficos:** Depende del punto anterior.
- **Tamaño de partículas:** Influye en el tiempo de calentamiento y en la difusión de los reactivos hacia y desde la partícula. Los tamaños adecuados para lecho móvil en contracorriente son de unos mm a 15 cm; para el de lecho móvil en corriente paralela de 3 a 10 cm y para el de lecho fluidizado de unos mm a 4 cm.
- **Densidad, forma y dureza de las partículas:** Afecta el movimiento de las partículas en el lecho y sobre la formación de bóvedas y canales preferenciales.
- **Humedad:** Para gasificadores de lecho móvil son convenientes humedades entre 10-20% y para los de lecho fluidizado hasta 40%.

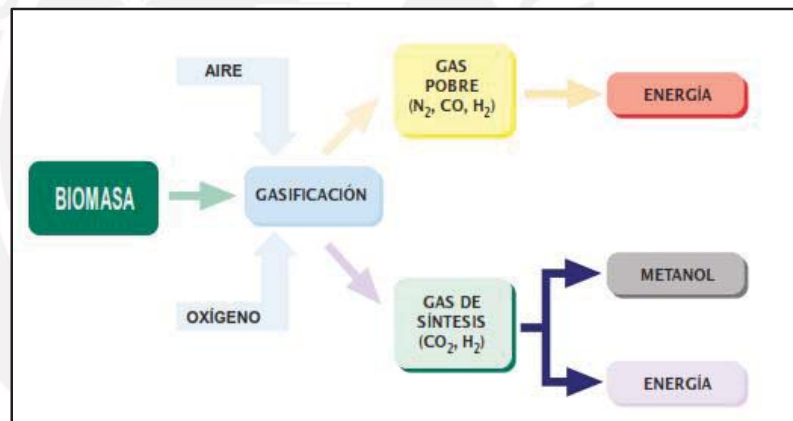


Ilustración A. 1 Proceso de Gasificación.

➤ Pirolisis

La pirolisis consiste en un calentamiento severo de la biomasa en ausencia de aire. El proceso (ver Ilustración A. 2) se inicia aprox. a los 260°C y finaliza aprox. A los 450 – 550°C. Los factores que determinan la composición y tipos de productos (ver Tabla A. 1) son: La características de la biomasa y las condiciones de operación (velocidad de calentamiento, temperatura, presión, tiempo). Los productos obtenidos mediante este proceso son: carbón vegetal, combustible líquido y combustible gas.

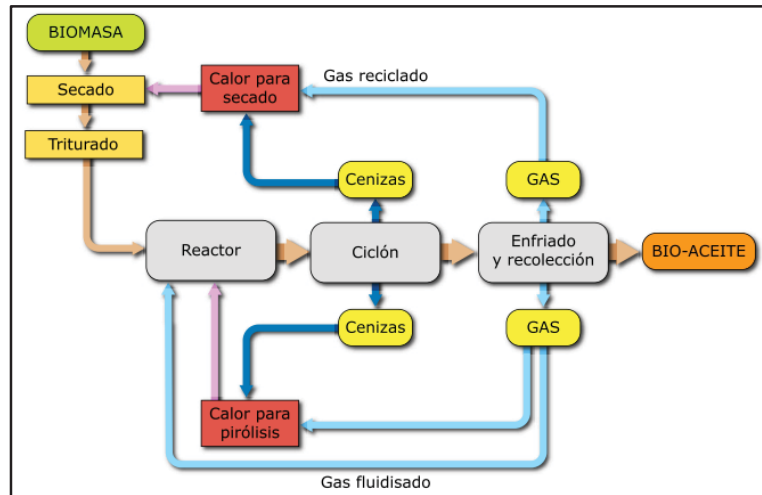


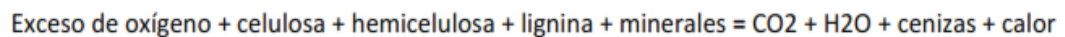
Ilustración A. 2 Proceso de Pirólisis.

Tabla A. 1 Tipo de pirólisis [5]

Tecnología	Tiempo de residencia	Temperatura máxima (°C)	Producto principal
Carbonización	Horas - días	300 - 500	Carbón vegetal
Lenta	5 - 30 min	400 - 600	Bio-oleo, carbón, gas
Rápida	< 5 s	450 - 600	Carbón, gas
Rápida	< 5 s	700 - 900	Carbón, gas

➤ Combustión

Es el proceso mediante el cual, la biomasa (combustible) reacciona químicamente con el oxígeno (carburante) en una reacción exotérmica, produciendo como resultado dióxido de carbono (CO₂), agua (en forma de vapor) y ceniza principalmente. La combustión directa de la biomasa es el sistema más elemental y, por supuesto, más antiguo de recuperación energética de la misma. La combustión de la biomasa puede caracterizarse por la siguiente reacción química:



Para que la biomasa combustione, es necesario que esta llegue a cierta temperatura, tal que en presencia de aire en exceso, se pueda mantener la reacción hasta su total oxidación, provocando los siguientes fenómenos (ver Ilustración A. 3):

- Deseccación de la biomasa y eliminación del agua en forma de vapor.
- Gasificación de los compuestos volátiles contenidos en la biomasa y descomposición inicial de las materias celulósicas, proceso que suele ocurrir

a partir de 200-250 °C. Algunos de los gases que se desprenden son combustibles, como CO, H₂, ácido acético, un poco de metano y algunos hidrocarburos, pero otros son inertes, como el vapor de agua o el anhídrido carbónico.

- Inflamación de los compuestos volátiles desprendidos inicialmente, a partir de 300-500 °C, lo que provoca un aumento en la gasificación de la biomasa y su inflamación simultánea.
- Carbonización de la biomasa, que ocurre a temperaturas elevadas, cuando los principales procesos de gasificación han concluido. En estas condiciones se produce la incandescencia del carbón, que ocurre prácticamente son llama. Al final de una combustión completa del carbón solo quedan las cenizas con elementos minerales, principalmente en estado de óxidos.

Se debe tener en cuenta que la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero, ya que el carbono liberado forma parte de la atmósfera actual y no del subsuelo. La energía que contiene la biomasa, como ya se mencionó anteriormente, es energía solar almacenada.

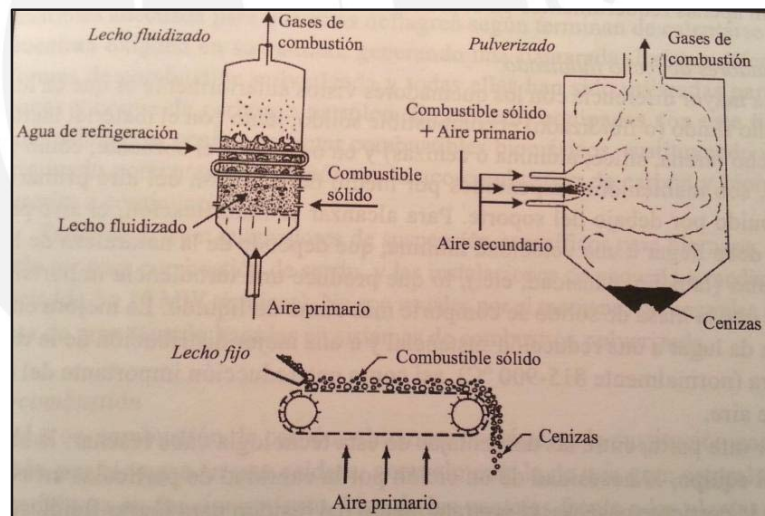


Ilustración A. 3 Principales tecnologías de combustión de biocombustible sólidos.

➤ Co-Combustión

La co-combustión es aplicable a todos los tipos de calderas de potencia que tradicionalmente utilizan combustibles fósiles aunque, evidentemente, cada tipo requiere de una tecnología de adaptación diferente. En el caso particular de usar combustibles pulverizados, y como su propio nombre lo menciona, el combustible debe ingresar a una granulometría determinada (molida), lográndose de esta forma altos rendimientos con tiempos de residencia relativamente bajos. [37]

La co-combustión presenta una serie de ventajas que son de particular interés en países en desarrollo. La co-combustión de residuos agrícolas y forestales mejora la rentabilidad de las empresas dedicadas a la actividad agrícola y forestal, lo que junto a la creación de empleo asociada a la recogida y manejo de la biomasa energética, contribuye a incrementar la actividad económica en el entorno rural. La co-combustión de estos residuos presenta una doble ventaja ambiental, ya que evita la combustión de combustibles convencionales en las centrales de combustible fósil y, además, evita que se acumulen estos desechos en los campos y bosques, con lo que se reduce el riesgo de propagación de incendios y de plagas. Por otra parte, ocurre con frecuencia que los países en desarrollo que disponen de importantes recursos de biomasa energética no disponen de carbón o recursos fósiles, con lo que deben importarlos. El uso de biomasa en procesos de co-combustión permitiría contribuir a equilibrar la balanza comercial de estos países y poder desarrollar otros sectores industriales que no se encuentran con la tecnología suficiente para darle un valor agregado a algunos productos. En función de las características de la central eléctrica de carbón se elegirá el tipo de co-combustión a utilizar más adecuado. Los sistemas de co-combustión se pueden dividir en tres tipos diferentes: co-combustión directa, co-combustión indirecta y co-combustión en paralelo. [38].

La Ilustración A. 4 e Ilustración A. 5 nos presentan las rutas que sigue la alimentación de biomasa y carbón a las calderas en el proceso de co-combustión.

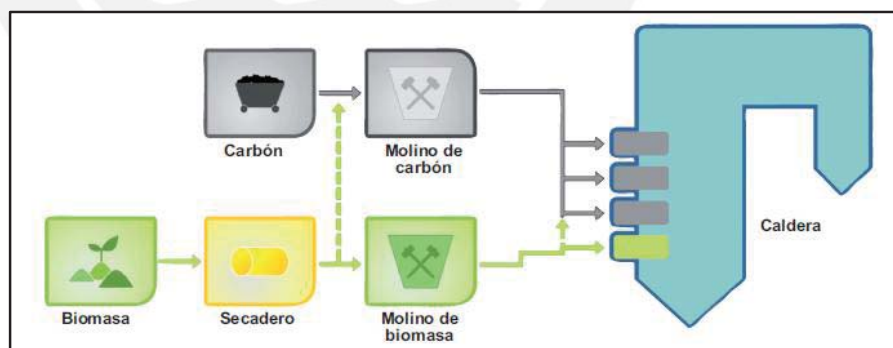


Ilustración A. 4 Esquema de proceso de co-combustión directa [38]

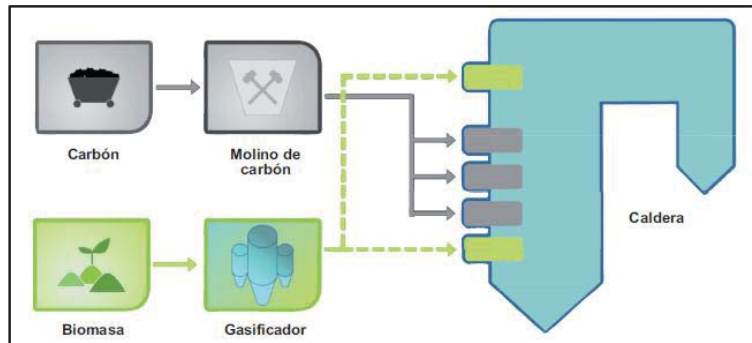


Ilustración A. 5 Esquema de proceso de co-combustión indirecta [38]

Cabe resaltar que, la co-combustión directa presenta el inconveniente de que se requiere una inversión sumamente elevada y se necesita disponer de un espacio considerable debajo de la caldera, lo cual se refleja en que no todas las centrales térmicas de carbón estarán capacitadas para utilizar estas alternativas.

Asimismo, Si bien la co-combustión indirecta requiere unas inversiones elevadas en equipos, este modo de operación presenta una serie de ventajas que lo hacen interesante. Se evita la reducción del rendimiento de la caldera por inyectar un combustible con menor poder calorífico, se evita su corrosión, su ensuciamiento, etc. Además, las exigencias en la biomasa energética utilizada no son tan estrictas como en el caso de la co-combustión directa.

APÉNDICE B

ANEXO B. Equipos para el densificado a presión

Equipos para el densificado a presión

- a) **Briqueteadora de rodillos:** En el proceso de fabricación de carbón vegetal, hay una gran pérdida de biomasa en la forma de partículas finas (polvo, granos y pequeños pedazos) de carbón. Las Briqueteadoras de extrusión por rodillos (ver Ilustración B. 1) de Lippel fueron desarrolladas para corregir ese problema, posibilitando el reaprovechamiento de ese material en forma de briquetas de carbón, compactados en forma de pelotas. De esta forma, el rendimiento del proceso es maximizado porque el producto generado posee poder calorífico mucho mayor que el carbón vegetal que encontramos en el comercio.



Ilustración B. 1 Briqueteadora de extrusión por rodillos. [39]

- b) **Briqueteadora de tornillo:** Briquetas producidas en estilo internacional, con mayor volumen y menos peso. Este tipo de briqueteadora, de extrusión por rosca sin fin (ver Ilustración B. 2), produce briquetas con un agujero central en proceso continuo. La Briqueteadora BEP 300 Lippel trabaja sobre el principio de extrusión continua, obteniendo un producto altamente homogéneo, con alta densidad y resistencia mecánica superior a cualquier otro tipo de briqueta producido en el mercado nacional. El calor y la presión ejercida en la matriz permiten usar las resinas de la biomasa como aglutinante natural, sin necesidad de uso de aglutinantes artificiales.

Características que hacen de este equipo único:

- Caja de transmisión en baño de aceite con Rodamientos de doble apoyo.
- Matriz tipo cónica revestida con anti-desgaste.

- Sistema de cambio rápido del tornillo de extrusión.



Ilustración B. 2 Briqueadora de extrusión por tornillo. [40]

- c) **Briqueadora de pistón:** Extrusoras de Pistón hidráulico o prensa briqueadora hidráulica (ver Ilustración B. 3): para quien posee cantidades pequeñas de residuos. Equipamiento que usa un pistón accionando hidráulicamente. El material a ser compactado es alimentado lateralmente por una rosca sin fin. Una pieza frontal el embolo abre una explosa o briqueta cuando se alcanza la presión deseada. Ideal para producciones menores y aprovechamiento y limpieza de empresas que generan cantidades menores de residuos.



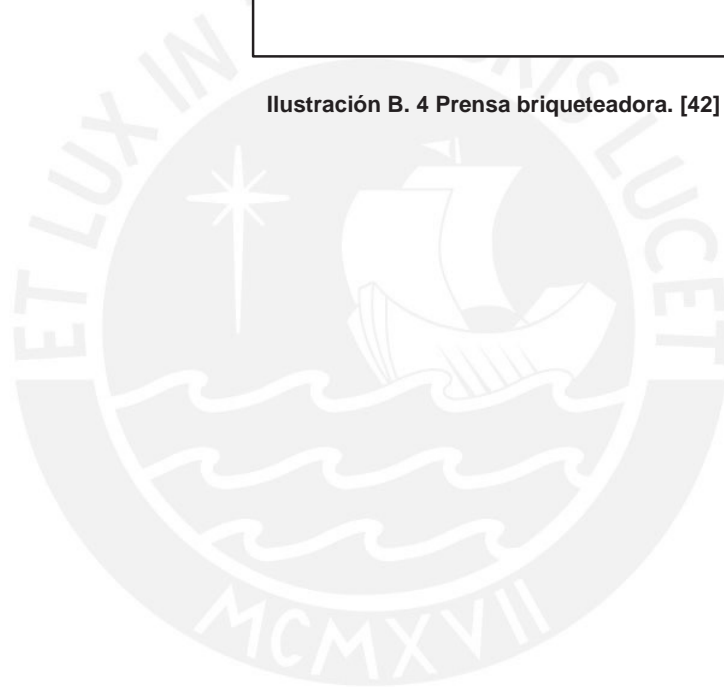
Ilustración B. 3 Briqueadora de pistón hidráulica. [41]

- d) **Briqueadora hidráulica:** Diseñado para dar respuesta a las demandas más exigentes, la prensa briqueadora (ver Ilustración B. 4) TH 3400 compacta materiales como madera, metal, papel o plástico convirtiéndolos en briquetas de dimensiones de 340 x 340 mm. Con un impresionante rendimiento potencial de hasta 6000. Gracias al nuevo diseño de cilindros y su sistema hidráulico revisado, es posible conseguir briquetas rectangulares de alta densidad. Dos cilindros integrados, los cuales tienen una válvula de succión, permiten un golpe de compresión más rápido; su punto de recogida de polvo más grande e interior permite la compresión de briquetas largas

con alto poder calorífico (especialmente aconsejables para gasificadores de madera).



Ilustración B. 4 Prensa briqueteadora. [42]



APÉNDICE C

ANEXO C. Equipos e Instrumentación

1. Equipos e instrumentación

1.1. Balanza electrónica

Se utiliza para el pesaje de muestras de HCA molidas, cantidades de agua destilada para el proceso de lavado, cantidades de aglutinantes para la aglomeración. Posee un display, plataforma de pesaje y un transformador.

Capacidad: 10 100 g

Precisión: 1 g

Marca: ACCULAB

Dimensiones: 140 mm x 127 mm

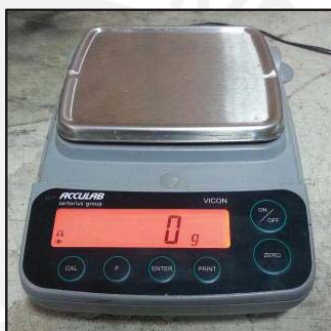


Ilustración C. 1 Balanza Electrónica de 5 dígitos.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.2 Balanza electrónica de precisión

Equipo utilizado para controlar el peso de los aglomerados de HCA preparadas para las distintas formulaciones y de las briquetas en el proceso de secado.

Capacidad: 200 g

Resolución: 0.05 g

Marca: CAMRY



Ilustración C. 2 Balanza de precisión.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.3 Termómetros digitales

Instrumentos utilizados para el control de temperatura en el proceso de lavado de las HCA.

Marca: HANNA

Modelo: HI 145-00

Rango: de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $220\text{ }^{\circ}\text{C}$

Resolución: $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $199.9\text{ }^{\circ}\text{C}$), $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (de 200 a $220\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Precisión: $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (de -20 a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$); $\pm 0.4\%$ F.R. (más)



Ilustración C. 3 Termómetros digitales en T.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.4 Guillotina manual

Equipo utilizado para dar el primer corte a las HCA y acondicionarlas para el siguiente proceso de molienda.



Ilustración C. 4 Guillotina de corte de HCA.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.5 Licuadoras

Utilizadas para la primera y segunda molienda de las HCA, diferenciándose estas por el tiempo del proceso. La primera molienda tiene el objetivo de disminuir el tamaño de partícula de las HCA a un tamaño menor a M6 y mayor a M16, por lo que el tiempo del proceso tiene una duración de 25 seg. Aprox; mientras que en la segunda molienda, se desea obtener el menor tamaño posible de partícula, por lo que el tiempo del proceso tiene una duración de 13 minutos.

Marca: Oster

Modelo: Licuadora BPST-02 1 velocidad + 1 pulse

Potencia: 600 W



Ilustración C. 5 Licuadoras para molienda de HCA.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.6 Molino de cuchillas

Equipo utilizado en la segunda molienda de HCA. Granulometría inicial 40 mm. Granulometría final $< 300 \mu\text{m}$. Posee cuchillas de acero inoxidable/titanio. Recipiente de plástico autoclavable.

Marca: RETSCH, **Modelo:** GM 200, **Voltaje:** 220 – 240 V
Frecuencia: 50 / 60 Hz, digital, 2,000 – 10,000 min⁻¹
Potencia: 900 W



Ilustración C. 6 Molino de cuchillas.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.7 Zaranda Vibratoria

Equipo utilizado para el cribado de las HCA que han pasado por la primera molienda. La zaranda cuenta con los siguientes cernidores: Malla M16 (1 mm), Malla M9 (2 mm), Malla M6 (3.36 mm).

Potencia: 1 HP

Voltaje: 220 V

Capacidad: 250-2830 μm

Accionamiento: Motor eléctrico



Ilustración C. 7 (a) Mallas M6, M9, M16 y M40; (b) Zaranda vibratoria.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.8 Criba pequeña

Encargada de la separación de material después de la segunda molienda. Esta criba posee mallas que permiten la separación de granulometrías más pequeñas que el anterior equipo de cribado. Se debe tener en cuenta que para la densificación de las formulaciones que serán desarrolladas se utilizarán las granulometrías $M50 < X < M30$ y $X < M50$. Cuenta con las siguientes mallas: M16 (1.18 mm), M30 (600 μm), M50 (300 μm)

Marca: Gilson

Color: Azul

Voltaje: 220 V



Ilustración C. 8 (a) Criba vibratoria, (b) Mallas M16, M30 y M50.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.9 Hornillas eléctricas

Usadas para transferir calor y elevar la temperatura del agua destilada en el proceso de lavado, también en la preparación del gel (aglomerante: fécula) en la densificación de briquetas. Poseen placa antiadherente, temperatura regulable, luz piloto.

Marcas: PRACTIKA, MAGEFESA

Potencia: 1500 W

Cubierta: Acero inoxidable

Quemadores: 1 (18.7) cm



Ilustración C. 9 Hornillas eléctricas.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.10 Registrador de temperaturas

Equipo utilizado para registrar las temperaturas en el quemador de biomasa.

Marca: HANNA

Alimentación: 4 pilas AA

Rango de temperaturas: -200 °C a 999.9 °C

Número de salidas: 4 salidas

Impresora: 4 rollos de papel de impresión

Número de Termocuplas: 3 tipo K

N°	Descripción	Marca - Modelo	Rango de trabajo
RT-0190	Termocupla flexible	HANNA - HI93531	-200 a 900°C - 1,000°C a 1,370°C
RT-0200	Termocupla rígida	HANNA - HI93531	-200 a 900°C - 1,000°C a 1,370°C
RT-0210	Termocupla rígida	HANNA - HI93531	-200 a 900°C - 1,000°C a 1,370°C



Ilustración C. 10 Registrador de temperaturas y termocuplas de medición.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.11 Horno de secado

Utilizado para el secado de muestras de HCA lavadas, así como para el secado de las briquetas. Posee tres posiciones de resistencias, cuenta con los siguientes accesorios: bandeja, parrilla y agarradera metálica para la bandeja y parrilla.

Marca: IMACO

Modelo: AE30-I

Potencia: 1200 W

Voltaje: 220 V

Capacidad: 18 litros

Rango de Temperatura: de 100 °C – 250 °C



Ilustración C. 11 Horno de secado de biomasa.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

1.12 Briqueteadora Hidráulica

Utilizada para el proceso de densificado, en este equipo se ejerce presión a la biomasa por medio de unos cilindros accionados por un sistema hidráulico. Dando como producto briquetas, las cuales se utilizarán como biocombustibles sólidos.



Ilustración C. 12 Briqueteadora hidráulica.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

APÉNDICE D

Anexo D. Hojas de datos de los pre-tratamientos

Tabla D. 1 Dimensiones de las HCA de recepción.

Recepción HCA	Largo (mm)	Ancho prom. (mm)
Muestra 1	215	15
Muestra 2	200	6
Muestra 3	155	13
Muestra 4	155	20
Muestra 5	175	15
Muestra 6	160	20
Muestra 7	118	31
Muestra 8	150	8
Muestra 9	170	12
Muestra 10	290	11

Tabla D. 2 Densidad Aparente de las HCA de recepción.

Densidad Aparente de HCA recepción										
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso de las HCA (kg)	0.922	0.956	0.937	0.957	0.943	0.963	0.918	0.934	0.948	0.927
Capacidad de recipiente (m3)	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
Densidad Aparente (kg/m3)	15.1	15.7	15.4	15.7	15.5	15.8	15.0	15.3	15.5	15.2

Tabla D. 3 Datos y resultados del proceso de trozado.

Trozado										
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso HCA inicial [g]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Peso HCA no utilizable [g]	30	32	33	32	43	33	34	28	33	33
Peso después del corte [g]	470	468	467	468	457	467	466	472	467	467
Porcentaje recuperado [%]	94.0%	93.6%	93.4%	93.6%	91.4%	93.4%	93.2%	94.4%	93.4%	93.4%
Capacidad de recipiente [m3]	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
Peso de HCA que ocupa el Vol. Del recipiente [kg]	3.134	3.222	3.156	3.207	3.163	3.123	3.112	3.234	3.214	3.147
Densidad Aparente [kg / m ³]	51.4	52.8	51.7	52.6	51.9	51.2	51.0	53.0	52.7	51.6

Tabla D. 4 Datos y resultados del proceso de molienda.

Molienda										
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso HCA pos-trozado [g]	470	468	471	469	466	472	470	468	468	470
Peso HCA pos-molienda [g]	461	459	460	458	457	461	460	459	460	461
Porcentaje recuperado [%]	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Tabla D. 5 Datos y resultados del proceso de cribado.

Cribado										
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso HCA pos-molienda [g]	461	459	460	458	457	461	460	459	460	461
Peso HCA pos-cribado [g]	418	422	421	418	420	424	423	421	422	421
Peso de HCA X < M16 [g]	43	37	39	40	37	37	37	38	38	40
Porcentaje recuperado [%]	0.91	0.92	0.92	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91

Tabla D. 6 Variación del peso de las HCA en el secado.

Secado										
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso HCApre-lavado [g]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Peso HCA pos-lavado [g]	325	327	344	319	324	346	398	382	422	393
Peso después del secado T=30°C [g]	79	80	85	77	80	89	85	80	94	85
Peso después del secado T=90°C [g]	69	70	74	67	70	78	74	70	82	74
Porcentaje recuperado [%]	69.0%	70.0%	74.0%	67.0%	70.0%	78.0%	74.0%	70.0%	82.0%	74.0%

Tabla D. 7 Datos y resultados del proceso de molienda.

Molienda										
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso HCA pos-secado (g)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Peso HCA pos-molienda (g)	497	495	496	496	495	495	496	497	496	497
Porcentaje recuperado	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Tabla D. 8 Datos y resultados obtenidos del proceso de cribado.

	Cribado									
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9	Ensayo 10
Peso HCA pos-molienda [g]	497	495	496	496	495	495	496	497	496	497
Peso HCA pos-cribado [g]	497	495	496	495	495	495	495	497	496	497
Peso de HCA X > M16 [g]	48	47	48	49	48	47	48	47	46	49
Peso de HCA M30 < X < M16 [g]	156	150	148	153	152	149	157	155	149	151
Peso de HCA M50 < X < M30 [g]	124	125	126	122	124	126	125	125	126	124
Peso de HCA X < M50 [g]	169	173	174	171	171	173	165	170	175	173
Porcentaje recuperado [%]	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000	1.000

Tabla D. 9 Densidad aparente de HCA X < M50.

HCA secas $\rho_{aparente}$			
	Peso de las HCA X < M50 (kg)	Volumen del recipiente (ml)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
Ensayo 1	0.295	1070	275.7
Ensayo 2	0.296	1070	276.6
Ensayo 3	0.295	1070	275.7
Ensayo 4	0.296	1070	276.6
Ensayo 5	0.294	1070	274.8
Ensayo 6	0.296	1070	276.6
Ensayo 7	0.294	1070	274.8
Ensayo 8	0.297	1070	277.6
Ensayo 9	0.295	1070	275.7
Ensayo 10	0.294	1070	274.8

Tabla D. 10 Densidad aparente de HCA M50 < X < M30.

HCA secas $\rho_{aparente}$			
	Peso de HCA M50 < X < M30 (kg)	Volumen del recipiente (ml)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
Ensayo 1	0.235	1070	219.6
Ensayo 2	0.235	1070	219.6
Ensayo 3	0.235	1070	219.6
Ensayo 4	0.234	1070	218.7
Ensayo 5	0.235	1070	219.6
Ensayo 6	0.236	1070	220.6
Ensayo 7	0.236	1070	220.6
Ensayo 8	0.234	1070	218.7
Ensayo 9	0.234	1070	218.7
Ensayo 10	0.235	1070	219.6

APÉNDICE E

Anexo E. Gráficos y resultados de los ensayos de evaluación.

1. Ensayo de Compresión

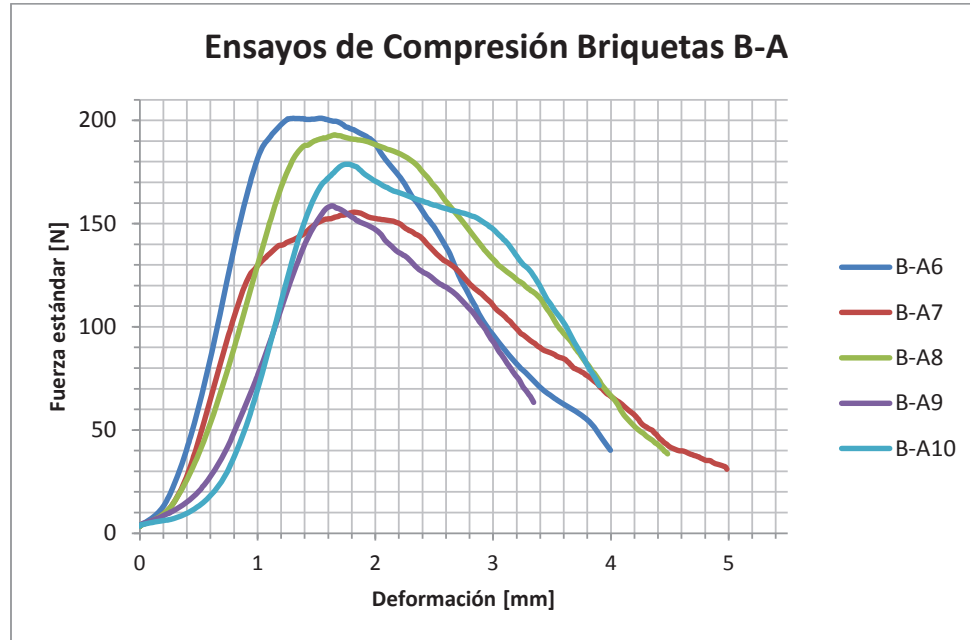


Ilustración E. 1 Ensayo de compresión briquetas B-A.

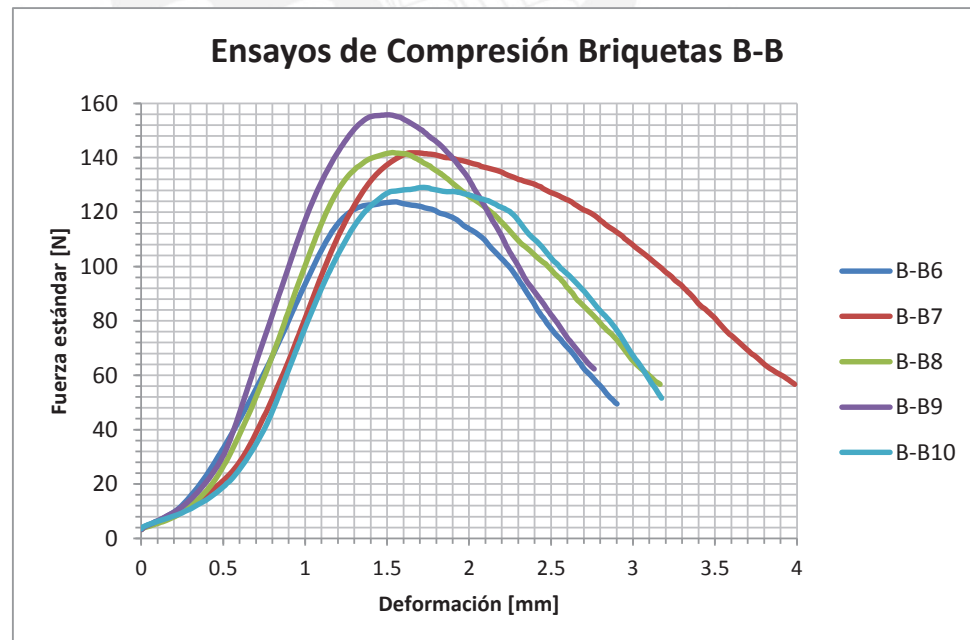


Ilustración E. 2 Ensayo de compresión briquetas B-B.

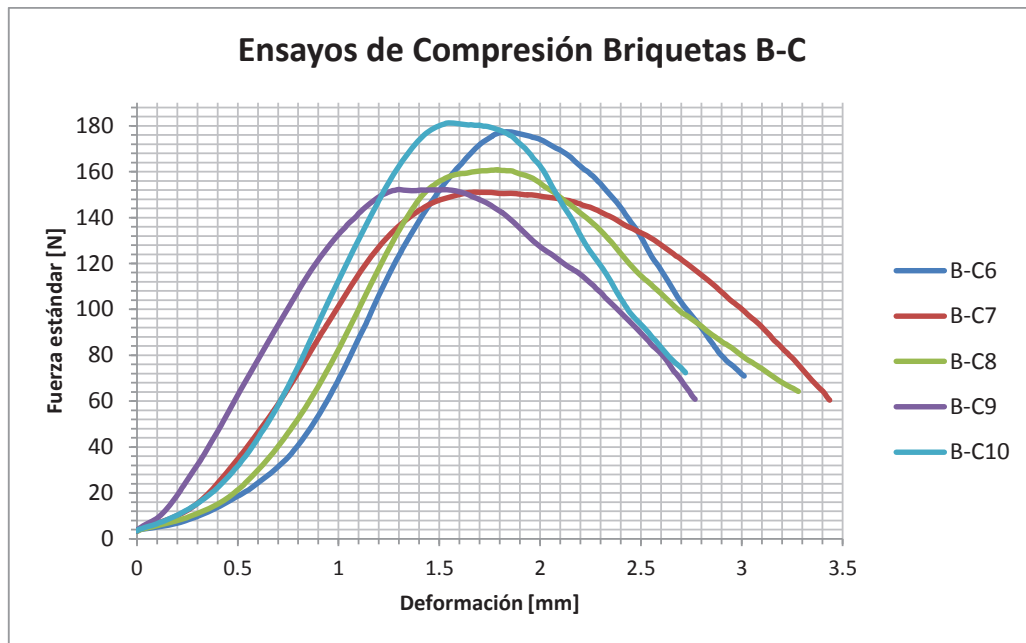


Ilustración E. 3 Ensayo de compresión briquetas B-C.

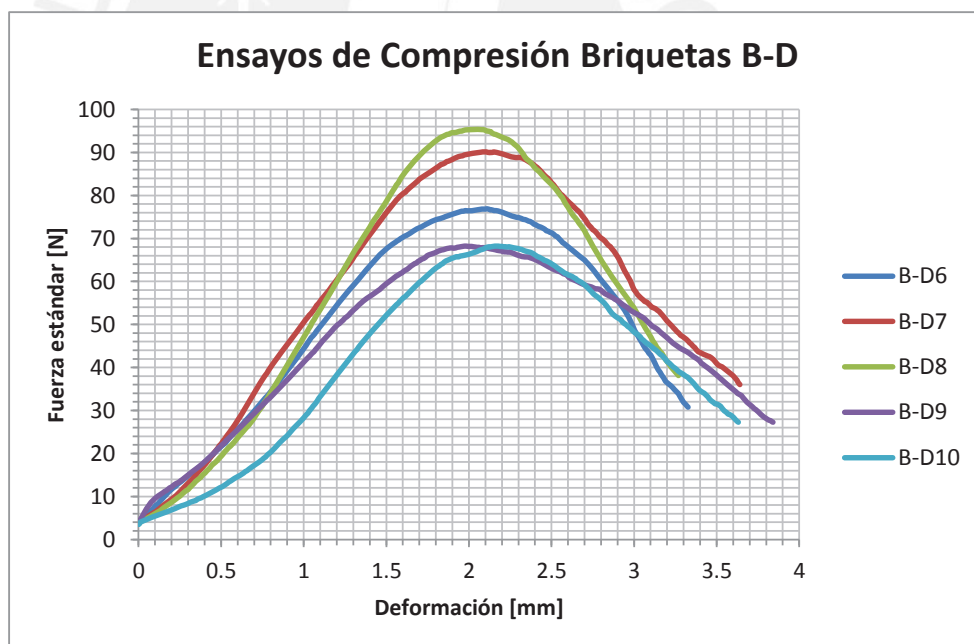


Ilustración E. 4 Ensayo de compresión briquetas B-D.

Tabla E. 1 Resultados del ensayo de compresión B-A

Identificación de probeta	F_{max}	
	[N]	
B-A6	201.05	
B-A7	155.48	
B-A8	192.97	
B-A9	158.60	
B-A10	178.81	
B-A	Fuerza Media	Desv. Estándar
	177.38	± 20.24

Tabla E. 2 Resultados del ensayo de compresión B-B.

Identificación de probeta	F_{max}	
	[N]	
B-B6	123.77	
B-B7	141.82	
B-B8	141.88	
B-B9	155.76	
B-B10	129.11	
B-B	Fuerza Media	Desv. Estándar
	138.47	± 12.5

Tabla E. 3 Resultados del ensayo de compresión B-C.

Identificación de probeta	F_{max}	
	[N]	
B-C6	177.40	
B-C7	151.08	
B-C8	160.79	
B-C9	152.24	
B-C10	181.23	
B-C	Fuerza Media	Desv. Estándar
	164.55	± 14.06

Tabla E. 4 Resultados del ensayo de compresión B-D.

Identificación de probeta	F_{\max}	
	[N]	
B-D6	76.88	
B-D7	90.14	
B-D8	95.38	
B-D9	68.23	
B-D10	68.26	
B-D	Fuerza Media	Desv. Estándar
	79.78	± 12.5

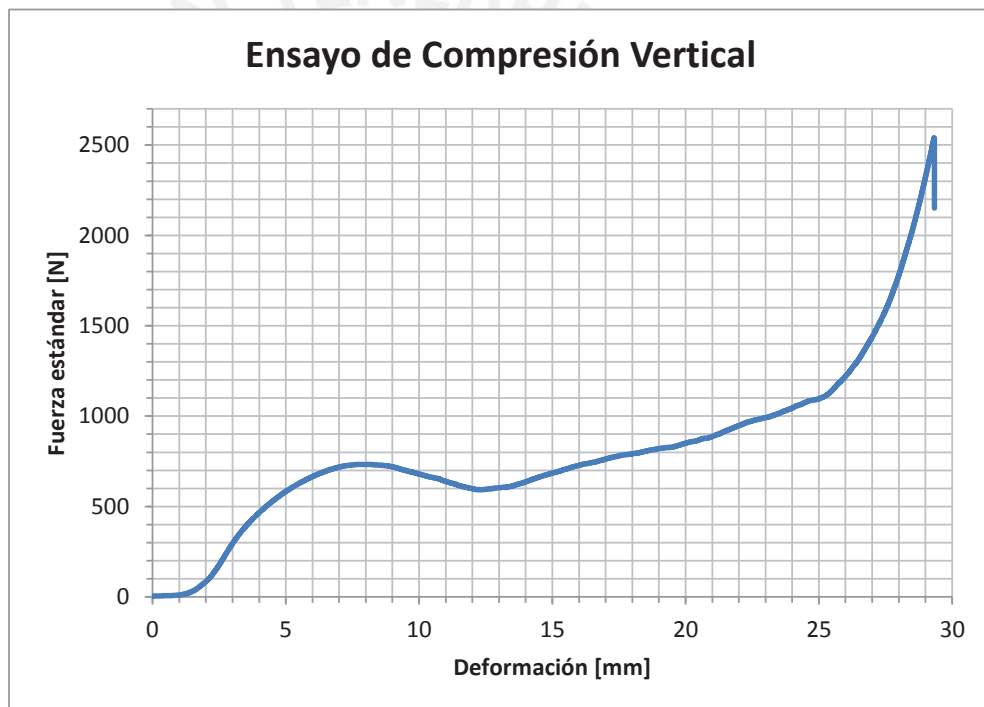


Ilustración E. 5 Ensayo de compresión en posición vertical.

2. Ensayo de Esponjamiento

Tabla E. 5 Datos del ensayo de esponjamiento briquetas B-A.

Formulación B-A										
A la salida de la Matriz										
Codificación	B-A1	B-A2	B-A3	B-A4	B-A5	B-A6	B-A7	B-A8	B-A9	B-A10
Mediciones Altura [mm]	37.3	34.6	39.2	40	37.6	35	37	36.9	35	36.7
	37.9	36.3	39.4	40.3	37.6	35.9	36.8	36.9	36	35.9
	39	36.5	39.3	40	36.8	36	36.9	35.4	36.4	35.3
Promedio [mm]	38.1	35.8	39.3	40.1	37.3	35.6	36.9	36.4	35.8	36.0
Media [mm]	37.1 ± 1.57									
1 hora de secado										
Mediciones Altura [mm]	38.3	35.6	38.7	40	37.1	36.4	35.9	36.9	36.4	35
	37.8	37.3	37.9	38.3	37.5	35.4	37.6	36.2	36.2	36.7
	37.3	35	37.9	39.7	38.2	35.4	37.7	37.6	35.5	37
Promedio [mm]	37.8	36.0	38.2	39.3	37.6	35.7	37.1	36.9	36.0	36.2
Media [mm]	37.1 ± 1.15									
2 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	38.2	35.3	40.2	41.1	38.2	37.6	37.7	37.3	37	37
	37.8	36.7	38.8	40.7	38.4	37.6	38	36.9	37	37.3
	37.3	37.6	39.4	39.7	39	37.4	38.1	37.7	36.7	36.3
Promedio [mm]	37.8	36.5	39.5	40.5	38.5	37.5	37.9	37.3	36.9	36.9
Media [mm]	37.6 ± 0.92									
3 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	37.9	37.6	39.4	40.8	38.3	37.4	38	37.5	36.9	36.6
	38.5	37.4	39	41	38	37.6	38.1	36.8	36.7	36.8
	38.4	36	40	40.9	38.6	38	37.8	37.9	37	37.4
Promedio [mm]	38.3	37.0	39.5	40.9	38.3	37.7	38.0	37.4	36.9	36.9
Media [mm]	37.8 ± 0.85									
4 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	38.1	37.7	39.6	40.8	38.3	37.5	38.1	37.5	37.2	36.9
	38.5	37.3	39.2	41	38.4	37.6	38.1	36.8	36.9	36.6
	38.4	36.3	40	40.9	38.6	38.2	37.9	37.9	37.3	37.3
Promedio [mm]	38.3	37.1	39.6	40.9	38.4	37.8	38.0	37.4	37.1	36.9
Media [mm]	37.9 ± 0.85									

Tabla E. 6 Datos del ensayo de esponjamiento briquetas B-B.

Formulación B-B										
A la salida de la Matriz										
Codificación	B-B1	B-B2	B-B3	B-B4	B-B5	B-B6	B-B7	B-B8	B-B9	B-B10
Mediciones Altura [mm]	34	34.7	34.2	34.4	34.1	34.7	34.7	34.8	34.6	35.2
	34.1	34	35	35.1	34.9	34.8	35.1	35	34.3	35.1
	34.3	34.5	34.5	35	34.2	34.5	35.5	35.3	34.7	35
Promedio [mm]	34.1	34.4	34.6	34.8	34.4	34.7	35.1	35.0	34.5	35.1
Media [mm]	34.7 ± 0.33									
1 hora de secado										
Mediciones Altura [mm]	34.7	35.8	35.1	35.7	35.2	34.8	35.7	35.9	36.6	36.2
	35.1	35.7	35.4	35.5	35	35	35.3	35.6	36.1	35
	34.9	36	35.2	35.4	35.8	35.5	35.6	35.7	36.1	36
Promedio [mm]	34.9	35.8	35.2	35.5	35.3	35.1	35.5	35.7	36.3	35.7
Media [mm]	35.4 ± 0.32									
2 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	35	35.4	35.5	36	35.6	35.6	35.4	35.9	36.3	35.3
	34.5	35.2	35.3	36.1	35.7	35.2	35.7	36	35.3	35.9
	35.1	35.4	35	36	35.7	35.3	35.7	35.8	36.2	35.2
Promedio [mm]	34.9	35.3	35.3	36.0	35.7	35.4	35.6	35.9	35.9	35.5
Media [mm]	35.5 ± 0.36									
3 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	34.7	36.1	35.3	35.6	35.9	34.9	35.6	35.6	35.8	35.7
	34.9	36	35.5	35.5	34.9	35.6	35.6	35.4	36.4	35.6
	34.5	35.3	36	35.5	35.6	35.5	35.5	36	35.8	35.8
Promedio [mm]	34.7	35.8	35.6	35.5	35.5	35.3	35.6	35.7	36.0	35.7
Media [mm]	35.6 ± 0.20									
4 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	34.9	36.5	35.4	35.2	36.1	35.5	36	35.9	36.1	35.9
	35	35.7	35.6	35.9	35.3	35.3	35.5	35.8	36.5	35.8
	35.1	35.5	35.9	35.8	35.5	35.3	35.8	36.2	36.6	35.8
Promedio [mm]	35.0	35.9	35.6	35.6	35.6	35.4	35.8	36.0	36.4	35.8
Media [mm]	35.7 ± 0.37									

Tabla E. 7 Datos del ensayo de esponjamiento briquetas B-C.

Formulación B-C										
A la salida de la Matriz										
Codificación	B-C1	B-C2	B-C3	B-C4	B-C5	B-C6	B-C7	B-C8	B-C9	B-C10
Mediciones Altura [mm]	36.5	35.9	36.9	37.7	36.5	36.4	37.1	37.1	36.9	36.4
	36.2	35.5	36.6	37.2	36.1	35.9	37.7	37.2	36.3	35.7
	37	36.4	36.8	37.1	36.2	35.9	38	36.9	36.5	36.3
Promedio [mm]	36.6	35.9	36.8	37.3	36.3	36.1	37.6	37.1	36.6	36.1
Media [mm]	36.6 ± 0.56									
1 hora de secado										
Mediciones Altura [mm]	38.3	36.4	38.1	38.6	36.9	37.5	39	37.8	37.6	36.3
	37	36.6	37.2	38.2	37	37.2	39.4	37.9	37.2	36.5
	37.5	36.6	37.4	37.7	37.4	37.3	38	38.1	38.3	37
Promedio [mm]	37.6	36.5	37.6	38.2	37.1	37.3	38.8	37.9	37.7	36.6
Media [mm]	37.5 ± 0.69									
2 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	37.5	36.8	37.4	38.1	37.2	37.6	38.7	37.6	37.3	37.4
	38.7	37.8	37.8	38.7	37.3	37.6	39.6	38.2	38.3	37
	37.4	36.6	38.1	38.6	37.1	37.5	38.6	37.7	39	38.4
Promedio [mm]	37.9	37.1	37.8	38.5	37.2	37.6	39.0	37.8	38.2	37.6
Media [mm]	37.9 ± 0.57									
3 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	38.1	37	37.9	38.1	37	37.5	38.1	37.5	38.3	38
	38.8	36.7	37.6	38.6	37.5	37.4	39.1	38.2	37.3	36.7
	37.1	37.7	38	38.8	37.3	37.7	40	37.2	39	37.2
Promedio [mm]	38.0	37.1	37.8	38.5	37.3	37.5	39.1	37.6	38.2	37.3
Media [mm]	37.7 ± 0.46									
4 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	38.1	37.4	38.7	38.6	37.7	37.9	38.7	37.6	39	38
	38.4	37	37.8	38.5	37.4	37.6	39.1	37.7	38.7	37.1
	39	37.6	37.9	38.9	37.2	37.4	40.1	38.2	37.6	37.6
Promedio [mm]	38.5	37.3	38.1	38.7	37.4	37.6	39.3	37.8	38.4	37.6
Media [mm]	38.1 ± 0.64									

Tabla E. 8 Datos del ensayo de esponjamiento briquetas B-D.

Formulación B-D										
A la salida de la Matriz										
Codificación	B-D1	B-D2	B-D3	B-D4	B-D5	B-D6	B-D7	B-D8	B-D9	B-D10
Mediciones Altura [mm]	37.3	36.7	37.9	36.7	34.9	34.3	35.5	36.4	34	34
	36.4	36.2	35.6	37.9	36.3	34.9	36.1	36.9	34.3	34.2
	37.2	36.1	36.3	37.4	35.8	35.1	36	35.9	35	33.2
Promedio [mm]	37.0	36.3	36.6	37.3	35.7	34.8	35.9	36.4	34.4	33.8
Media [mm]	35.8 ± 1.15									
1 hora de secado										
Mediciones Altura [mm]	41.5	39.8	42	42.4	39.9	37.4	40.8	37.8	39.2	36.1
	42	41	37.5	38.2	36	37.8	37.3	39.8	37.7	38
	38.5	38.8	40.8	41.7	39.7	37.5	40.3	38	38.4	37
Promedio [mm]	40.7	39.9	40.1	40.8	38.5	37.6	39.5	38.5	38.4	37.0
Media [mm]	39.1 ± 1.28									
2 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	41	38.9	41.7	42	40	38.6	41.1	40.3	39	37
	42.3	40.9	37.7	39.1	39.6	36.5	40.3	38.7	37.3	37.9
	40	39.4	42.3	41.9	39.3	38.1	37.5	39.8	39	36.8
Promedio [mm]	41.1	39.7	40.6	41.0	39.6	37.7	39.6	39.6	38.4	37.2
Media [mm]	39.5 ± 1.31									
3 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	40.9	40.6	42.5	41	40	38.5	41.3	39.9	39.5	38
	41.5	40.2	40.4	42.2	40.2	38.3	37.7	38.8	38.3	37.3
	41.9	39.7	37.5	39.8	39.5	36.2	40.7	40.1	37.8	37.6
Promedio [mm]	41.4	40.2	40.1	41.0	39.9	37.7	39.9	39.6	38.5	37.6
Media [mm]	39.6 ± 1.28									
4 horas de secado										
Mediciones Altura [mm]	41.3	40.9	40.9	42	39.3	39	41.1	39.5	38.7	38
	40.2	40.5	41	41.5	40	38.3	39.2	39.6	38.7	38.6
	41.4	39.9	42.1	41.7	40.2	36	37.7	39.3	39	37.2
Promedio [mm]	41.0	40.4	41.3	41.7	39.8	37.8	39.3	39.5	38.8	37.9
Media [mm]	39.8 ± 1.37									

3. Ensayo de Combustión

Tabla E. 9 Datos registrados en el ensayo de combustión B-A.

Ensayo de combustión:

Ensayo N° 1 Fecha: 22/06/015 Hora de inicio: 11:20 a.m.

Briquetas de hojas de caña:

Tipo: B-A Código: B-A11 / B-A30 Peso: 218 g

Iniciador utilizado:

Tipo: Ron Peso inicial: 10 g Peso final: 3 g

Flujo de aire:

Condición de flujo: A3 Ventilador (voltaje): 15 V

Temperaturas:

t (min)	T (°C) en el reactor				T (°C) en la chimenea			
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)
0	40.4	38.5	39.5	39.4	33.7	30.1	39.8	35.3
1	217	349	140	67.7	51.4	29.6	153.4	191
2	473	764	616	772	315	43.2	683	659
3	610	813	747	850	439	69	798	735
4	718	858	805	723	415	94	635	565
5	688	785	641	540	310	102	461	409
6	563	612	517	426	246	106	359	316
7	467	418	379	322	199.4	104	255	218
8	347	289	268	230	150.7	99	212	193
9	236	199	195	169	116	93	159	137
10	151	132	135	122	93	81	121	102
11	91	89	93	87	76	77	87	72
12	56	59	63	62	63	70	66	58
13	42	44	48	47	52	60	51	45
14	36.8	38.6	41.8	41.6	47.4	53.7	45.7	41.2
15								

Tiempo para el encendido del biocombustible 1.00 min

Duración de la llama 4.40 min

Tiempo T5 > 200 °C 7.27 min

Temperatura máxima 858.00 °C

Ceniza generada:

Cantidad: 8 g

Tabla E. 10 Datos registrados en el ensayo de combustión B-B.

Ensayo de combustión:

Ensayo N° 2 Fecha: 22/06/015 Hora de inicio: 11:41 a.m.

Briquetas de hojas de caña:

Tipo: B-B Código: B-B11 / B-B30 Peso: 215 g

Iniciador utilizado:

Tipo: Ron Peso inicial: 13 g Peso final: 4 g

Flujo de aire:

Condición de flujo: A3 Ventilador (voltaje): 15 V

Temperaturas:

t (min)	T (°C) en el reactor				T (°C) en la chimenea			
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)
0	30	31	32	33	49	44	34	42
1	155	181	107	73	52	42	53	82
2	189	432	518	457	120	45	255	231
3	136	362	431	338	142	47	258	251
4	175	465	641	489	241	51	436	423
5	294	603	675	550	274	61	461	440
6	366	590	619	524	267	63	443	417
7	431	656	612	511	271	69	438	406
8	385	556	492	408	226	68	372	369
9	294	434	376	306	177	69	290	252
10	216	344	302	237	145	74	231	199
11	162	270	240	188	121	67	175	148
12	113	201	184	141	96	63	128	116
13	80	149	137	106	80	57	103	84
14	58	104	99	79	65	55	77	65
15	43	71	70	58	53	54	58	50
16	36.3	54	54	47	46	53	47	42
17	33	43	43	39	41	51	40	36
18	31	37	38	35	38	49	35	34

Tiempo para el encendido del biocombustible 1.23 min

Duración de la llama 6.19 min

Tiempo T5 > 200 °C 9.20 min

Temperatura máxima 675.00 °C

Ceniza generada:

Cantidad: 15 g

Tabla E. 11 Datos registrados en el ensayo de combustión B-C.

Ensayo de combustión:

Ensayo N° 3 Fecha: 22/06/015 Hora de inicio: 12:07 p.m.

Briquetas de hojas de caña:

Tipo: B-C Código: B-C11 / B-C30 Peso: 242 g

Iniciador utilizado:

Tipo: Ron Peso inicial: 11 g Peso final: 2 g

Flujo de aire:

Condición de flujo: A3 Ventilador (voltaje): 15 V

Temperaturas:

t (min)	T (°C) en el reactor				T (°C) en la chimenea			
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)
0	29	30	44	30	43	38	32	37
1	307	253	681	183	63	37	130	172
2	485	740	733	730	310	53	680	637
3	622	816	764	831	402	75	731	668
4	747	909	577	685	372	111	597	498
5	569	816	551	501	298	118	430	374
6	393	680	504	383	235	116	332	287
7	282	571	422	310	190	103	276	237
8	166	426	327	230	160	101	225	193
9	108	318	256	178	126	95	163	139
10	77	234	198	137	103	85	129	109
11	59	164	147	103	84	79	97	82
12	48	118	110	79	71	74	78	66
13	40	83	79	59	59	62	60	52
14	36	64	63	48	50	58	50	44
15	33	50	48	39	44	53	41	38
16	30	40	41	37	39	44	35	33

Tiempo para el encendido del biocombustible 1.15 min

Duración de la llama 3.53 min

Tiempo T5 > 200 °C 7.14 min

Temperatura máxima 909.00 °C

Ceniza generada:

Cantidad: 30 g

Tabla E. 12 Datos registrados en el ensayo de combustión B-D.

Ensayo de combustión:

Ensayo N° 4 Fecha: 22/06/015 Hora de inicio: 12:30 p.m.

Briquetas de hojas de caña:

Tipo: B-D Código: B-D11 / B-D30 Peso: 245 g

Iniciador utilizado:

Tipo: Ron Peso inicial: 10 g Peso final: 2 g

Flujo de aire:

Condición de flujo: A3 Ventilador (voltaje): 15 V

Temperaturas:

t (min)	T (°C) en el reactor				T (°C) en la chimenea			
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)
0	29	30	31	30	44	40	32	37
1	275	83	79.3	95	65	39	101	109
2	521	660	588	672	212	51	571	537
3	476	894	797	817	404	82	736	683
4	464	842	829	786	414	104	663	586
5	444	722	642	555	310	115	468	407
6	386	590	490	410	237	109	353	309
7	276	551	417	327	195	109	281	243
8	174	455	329	251	156	104	220	188
9	106	355	255	196	127	98	169	146
10	69	275	197	148	105	91	136	115
11	51	198	147	111	86	83	104	89
12	41	137	109	83	72	79	81	69
13	36	91	79	63	60	69	62	53
14	33	64	58	50	51	59	50	43
15	31	47	45	41	45	57	42	38
16	30	40	41	37	41	52	36	35

Tiempo para el encendido del biocombustible 1.32 min

Duración de la llama 3.08 min

Tiempo T5 > 200 °C 7.18 min

Temperatura máxima 894.00 °C

Ceniza generada:

Cantidad: 42 g