



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-538

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Aprovechamiento del matorral como combustible en calderas de biomasa

MEDIAVILLA, I.¹, BORJABAD, E.¹, RAMOS, R.¹, PÉREZ, P.¹, BADOS, R.¹ y ESTEBAN, L.S.¹

¹ CEDER-CIEMAT. Centro de Desarrollo de Energías Renovables – Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas

Resumen

Los incendios forestales que ocurren en los países del área mediterránea pueden iniciarse y propagarse por una incontrolada concentración de masas arbustivas. El uso de estos arbustos como biomasa para aplicaciones térmicas favorece una gestión sostenible de los bosques y supone una nueva fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.

El objetivo de este trabajo es el estudio del pretratamiento y combustión de la biomasa obtenida en desbroces de matorral (escoba, brezo, jara y tojo), con la finalidad de evaluar la calidad de los biocombustibles sólidos producidos y su comportamiento en calderas de los sectores doméstico e industrial.

La biomasa de matorral utilizada se ha recogido en cuatro zonas de Castilla y León y Galicia y se ha pretratado, mediante molienda y peletización, en plantas piloto localizadas en el CEDER-CIEMAT, obteniéndose pélets de calidad comercial y estudiándose los flujos máxicos producidos y los consumos energéticos requeridos. Además de pélets, también se ha obtenido material molido a 30 mm para su uso en calderas habilitadas para la utilización de astillas de madera.

Tanto los pélets como el material molido a 30 mm se han utilizado en ensayos de combustión de dos calderas comerciales, una de 40 kWt (pélets) y otra de 500 kWt (material molido). Además, los resultados obtenidos se han comparado con los de dos combustibles utilizados como referencia: pélets de pino A1 según la norma ISO 17225-2:2014 y pino molido a 30 mm.

Del trabajo realizado puede concluirse que la molienda y peletización de matorral puede llevarse a cabo sin registrarse problemas de operación, dependiendo el rendimiento de los procesos del tipo de biomasa utilizada y de la forma (pacas o astillas) en la que es recibida. Con respecto a la combustión, en el período de ensayo no se han registrado problemas de operación, aunque se aprecia la formación de escorias con las biomásas de brezo, jara y tojo que sí podrían generar problemas durante su combustión en periodos prolongados de tiempo; también se aprecia una mayor tendencia de estas biomásas a producir NO_x y partículas. Además, es destacable la emisión de SO₂ y HCl durante la combustión de tojo.

Palabras clave

Caldera, combustión, matorral, pélets.

1. Introducción

La sustitución de los bosques por matorrales que se produce en los países mediterráneos tras los incendios forestales, puede conducir al inicio y propagación de nuevos incendios (GARCÍA-HURTADO et al, NÚÑEZ-REGUEIRA et al, BAEZA et al). De este modo, consultando los datos proporcionados por el MAGRAMA, puede verse que, entre los años 2005 y 2013, el porcentaje que estaba cubierto por matorral del total de la superficie quemada, osciló entre el 46% y el 72%.

Por otro lado, dada la elevada demanda energética existente a nivel global en la actualidad, la limitada disponibilidad de combustibles fósiles convencionales y la relación directa de su uso con el calentamiento global, la utilización con fines energéticos de la biomasa de matorrales resulta una opción que es necesario explorar. En este sentido, autores como NÚÑEZ-REGUEIRA et al y PÉREZ et al, concluyen en sus trabajos que el uso de esta biomasa como fuente de energía alternativa puede

resultar viable, teniéndose en cuenta su disponibilidad en regiones específicas de España y sus características como combustible. Además, de este modo, también se garantiza la conservación del medio ambiente mediante el crecimiento sostenible del matorral. Sin embargo, hay otros autores, como VIANA et al, que indican que algunas de las características químicas de algunas biomásas arbustivas, como por ejemplo los contenidos en nitrógeno o en compuestos alcalinos, deben ser tenidas en cuenta para asegurar una combustión adecuada de estas biomásas. Con esto, se considera de especial importancia la realización de estudios en los que se analice tanto la producción de biocombustibles sólidos a partir de matorral como su comportamiento durante la combustión en estufas y calderas.

El trabajo que se muestra a continuación se ha llevado a cabo dentro del proyecto LIFE+ ENERBIOSCRUB, cuyo objetivo es la movilización de nuevas fuentes de biomasa y la reducción del riesgo de incendios forestales a través de la obtención de biocombustibles sólidos sostenibles procedentes de matorrales españoles. Además, en este proyecto se considera el uso de métodos de manejo y cosecha de matorral que no se han evaluado suficientemente en el sur de Europa con anterioridad.

El proyecto tiene en cuenta cuatro áreas, localizadas en Castilla y León y Galicia, que pueden tener una capacidad de utilización de biocombustibles estable (una planta de producción de pélets, una central térmica de biomasa y dos redes de calor que operan habitualmente con pélets comerciales). En las áreas que estudia el proyecto se recogen diferentes especies arbustivas que, previamente a su uso final en las plantas anteriormente indicadas, son transformadas en biocombustibles sólidos y ensayadas en calderas en el CEDER-CIEMAT.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el estudio del pretratamiento y combustión de la biomasa obtenida en desbroces de matorral (escoba, brezo, jara y tojo), con la finalidad de evaluar la calidad de los biocombustibles sólidos producidos y su comportamiento en calderas de los sectores doméstico e industrial.

3. Metodología

3.1. Materias primas

Las biomásas arbustivas utilizadas procedían de desbroces llevados a cabo alrededor de las localizaciones que se describen a continuación:

- Escoba (*Genista cinerascens*) en Las Navas del Marqués (Ávila).
- Mezcla de arbustos, fundamentalmente brezo (*Erica australis*) y escoba (*Genista florida*) (a partir de este momento, se referenciará como brezo) en Figueruela de Arriba (Zamora).
- Jara (*Cistus laurifolius*) en Garray (Soria).
- Tojo (*Ulex europaeus*) en As Pontes (A Coruña).

Por otro lado, con el fin de comparar estas biomásas con una referencia en los ensayos de combustión, se han utilizado pélets de pino comerciales A1 (según la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014) y pino molido a 30 mm.

3.2. Planta de molienda

Para la reducción del tamaño de las biomásas recibidas se ha empleado una instalación que comprende dos etapas de molienda (Figura 1): en primer lugar, un molino triturador de cuchillas de giro lento (90 kW, 70 rpm), en el que se ha obtenido material molido a 30 mm, seguido de un molino de martillos (75 kW) en el que se muele la biomasa a 4 mm para ser peletizada posteriormente.

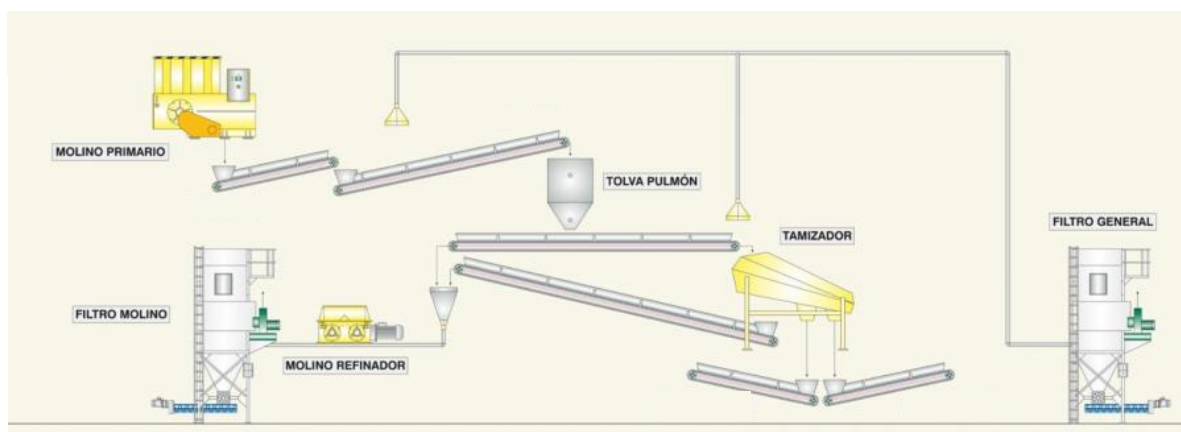


Figura1. Esquema de la instalación de molienda utilizada en los ensayos realizados en el CEDER-CIEMAT

3.3. Planta de peletización

La planta piloto de peletización utilizada en los ensayos (Figura 2) incluye un sistema de mezcla, una prensa de matriz plana, con diámetro de matriz 500 mm y 30 kW de potencia y un equipo de enfriamiento de pélets y ensacado.

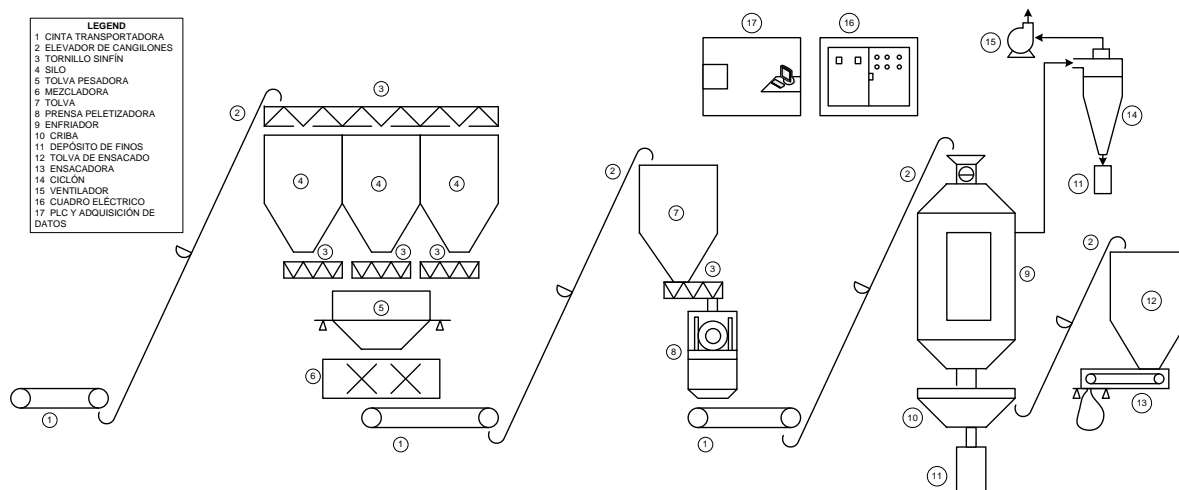


Figura2. Esquema de la planta piloto de peletización utilizada en los ensayos realizados en el CEDER-CIEMAT

3.4. Calderas

Se han utilizado dos calderas en los ensayos de combustión llevados a cabo, que a partir de ahora se denominarán: PM40 y PM500, y que pasan a describirse a continuación:

La caldera PM40 es un equipo comercial cuya potencia oscila entre 25 y 40 kWt, dependiendo del combustible utilizado, y que ha sido especialmente diseñada para combustibles agrícolas. Tiene parrilla móvil y un sistema automático de extracción de ceniza. Presenta dos entradas de aire de combustión (primario y secundario) y una sonda lambda para el control de oxígeno en humos. Su control es automático y no hay ningún sistema de eliminación de partículas asociado a este equipo. El fabricante de la caldera la clasifica dentro de la clase 3 según la norma EN 303-5:1999.

La caldera PM500 es un equipo comercial de parrilla móvil con 500 kWt de potencia. Tiene aire primario (que entra a través de la parrilla mediante un ventilador) y aire secundario (que se introduce por 6 toberas usando dos ventiladores). Además cuenta con un extractor para la salida de humos y con un multiciclón para la eliminación de partículas.

3.5. Equipos de medida de emisiones

Para la medida de la composición gaseosa de los humos se ha empleado un analizador FTIR portátil (espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier), una célula de óxido de zirconio y un FID (detector de ionización de llama).

Por otro lado, se ha registrado de forma continua la emisión de partículas con un equipo electrodinámico, que se ha calibrado mediante la medida con una sonda isocinética.

3.6. Diseño experimental

Las distintas biomásas de matorral utilizadas en este trabajo se han recibido en forma de pacas cilíndricas de 1.20 m de diámetro o pre-triturado (ver Figura 3), dependiendo del método de recogida utilizado en el campo. Una vez recibidas, han pasado a una primera etapa de pretratamiento, en la cual, 10 t de cada uno de los matorrales aproximadamente se han molido en el triturador a 30 mm. Una parte de este material, ha sido utilizado en ensayos de combustión en la caldera PM500, realizándose previamente un secado de la biomasa en los casos en los que el contenido en humedad era elevado.



Figura3. Biomasa de matorral utilizada en los ensayos. Arriba izquierda: paca de escoba; arriba derecha: brezo pre-triturado en campo; abajo izquierda: paca de jara; abajo derecha: tojo pre-triturado en campo

A continuación, aproximadamente 5 t de cada una de las biomásas trituradas a 30 mm, y secadas cuando ha sido necesario, se han molido a 4 mm en el molino de martillos, para ser posteriormente peletizadas.

Al inicio de los ensayos de peletización, se han ajustado los flujos de agua y biomasa a la prensa con el objetivo de que su operación sea estable y la calidad de los pélets aceptable. Una vez ajustado el proceso, se ha mantenido la peletización durante 2 horas con cada una de las biomásas.

Las variables de proceso registradas en los ensayos de molienda y peletización han sido el flujo másico específico (en kg de materia seca por h y por kW de potencia del equipo correspondiente) y el consumo energético específico (en kWh por t de materia seca). El flujo másico específico se calcula como la masa de materia molida o peletizada (en kg de materia seca) dividida por el tiempo utilizado para molerla o peletizarla (en horas) y por la potencia de los molinos (cuchillas: 90 kW, martillos: 75 kW) o de la prensa peletizadora (30 kW). El consumo energético específico se calcula como la energía eléctrica activa demandada por los diferentes equipos para moler o peletizar el material, dividida por la masa de material que se ha molido o la masa de pélets que se ha obtenido (en t de materia seca).

En cuanto a los ensayos de combustión, se han realizado inicialmente algunos ensayos preliminares con la finalidad de ajustar las condiciones de operación de modo que las emisiones sean

tan bajas como sea posible. A continuación, se ha llevado a cabo un ensayo en cada caldera con los distintos matorrales y con los combustibles de referencia. Cada ensayo ha tenido una duración de 6 h en régimen estacionario, trabajándose lo más próximo posible a la potencia nominal de las calderas. Se ha considerado como inicio del estado estacionario el momento en el que la temperatura de los humos no ha variado en más de ± 5 °C durante 30 minutos.

Una vez finalizados los ensayos de combustión, se han recogido las cenizas de distintos puntos de las calderas. En las Figuras 4 y 5 se muestran los puntos de recogida.

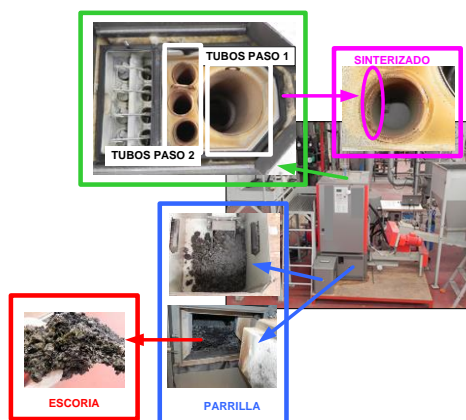


Figura 4. Esquema del muestreo de ceniza en la caldera PM40 localizada en CEDER-CIEMAT

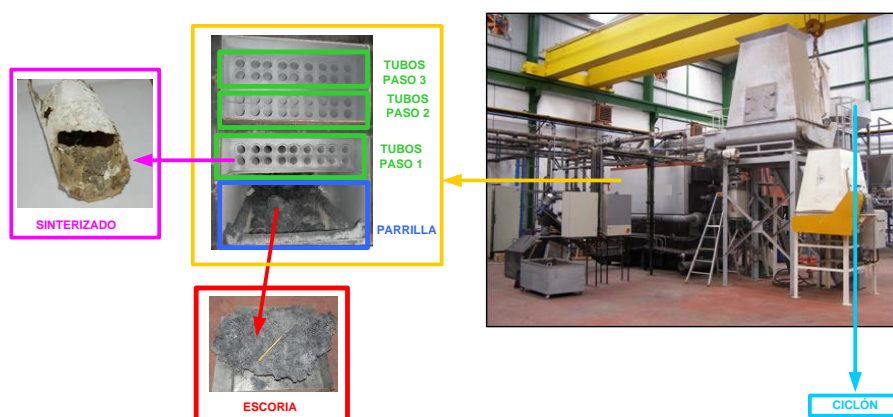


Figura 5. Esquema del muestreo de ceniza en la caldera PM500 localizada en CEDER-CIEMAT

Las variables de proceso estudiadas durante los ensayos de combustión han sido: potencia térmica introducida con el combustible, emisiones (O_2 , CO , NO_x , SO_2 , HCl , COT y partículas), y caracterización visual de las cenizas.

3.7. Procedimiento analítico

La muestra de laboratorio utilizada para análisis fue preparada de acuerdo con la norma UNE 14780:2011, mediante homogeneización, división, secado y molienda. En el Laboratorio de Caracterización de Biomasa (CEDER-CIEMAT) se llevaron a cabo los análisis correspondientes siguiendo la normativa que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos analíticos y normas utilizados en el Laboratorio de Caracterización de Biomasa (CEDER-CIEMAT)

| Parámetro | Método analítico | Norma |
|-------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Densidad de pila | Masa de un volumen conocido | EN 15103 |
| Distribución de tamaño de partícula | Separación en fracciones de tamaño | EN 15149-1 y |

| | | | |
|----------------------|----------|--|------------|
| | | definido (tamices) | EN 15149-2 |
| Durabilidad mecánica | | | EN 15210-2 |
| Análisis inmediato | Humedad | Secado a 105 °C | EN 14774-2 |
| | Ceniza | Calcinación a 550 °C | EN 14775 |
| Análisis elemental | C, H y N | Analizador elemental equipado con detectores de infrarrojo y detector de conductividad térmica | EN 15104 |
| | S y Cl | Cromatografía iónica después de la combustión de la muestra | EN 15289 |
| Poder calorífico | | Calorímetro automático | EN 14918 |

4. Resultados

4.1. Molienda

En las Tablas 2 y 3 se muestran los valores del flujo másico específico (M) y el consumo energético específico (E) registrados durante la molienda de los distintos matorrales en los molinos de cuchillas (a 30 mm) y martillos (a 4 mm), así como la humedad y la densidad de pila del material obtenido.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de molienda en el molino triturador de cuchillas a 30 mm

| Parámetro | Escoba (pacas) | Brezo (astillado en campo) | Jara (pacas) | Tojo (astillado en campo) |
|---|----------------|----------------------------|--------------|---------------------------|
| M (kg/h kW) (b.s.) | 18 | 20 | 18 | 5.6 |
| E (kWh/t) (b.s.) | 9.0 | 7.5 | 11 | 28 |
| Humedad (% m.) (b.h.) | 9.5 | 16.1 | 23.0 | 27.5 |
| Densidad pila (kg/m ³) (MS) | 240 | 240 | 260 | 210 |

b.s.: base seca; % m.: % en masa; b.h.: base húmeda; MS: materia seca

Tabla 3. Resultados de los ensayos de molienda en el molino de martillos a 4 mm

| Parámetro | Escoba | Brezo | Jara | Tojo |
|---|--------|-------|------|------|
| M (kg/h kW) (b.s.) | 11 | 12 | 27 | 21 |
| E (kWh/t) (b.s.) | 46 | 58 | 17 | 18 |
| Humedad (% m.) (b.h.) | 7.5 | 12.7 | 7.9 | 18.0 |
| Densidad pila (kg/m ³) (MS) | 320 | 360 | 390 | 260 |

b.s.: base seca; % m.: % en masa; b.h.: base húmeda; MS: materia seca

4.2. Peletización

En la Tabla 4 pueden verse los valores del flujo másico específico (M) y el consumo energético específico (E) registrados durante la peletización de los distintos matorrales. En la Tabla 5 se muestra la caracterización de los pélets obtenidos y la de los pélets de pino utilizados como referencia y los límites establecidos en la norma ISO 17225-2:2014 para la clase B.

Tabla 4. Resultados de los ensayos de peletización

| Parámetro | Escoba | Brezo | Jara | Tojo |
|--------------------|--------|-------|------|------|
| M (kg/h kW) (b.s.) | 6.9 | 6.7 | 5.9 | 8.8 |
| E (kWh/t) (b.s.) | 113 | 122 | 133 | 80 |

b.s.: base seca; b.h.: base húmeda; MS: materia seca; MH: materia húmeda; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior

Tabla 5. Caracterización de los pélets obtenidos y de los pélets de pino utilizados como referencia

| Parámetro | Escoba | Brezo | Jara | Tojo | Pino (A1) | ISO 17225-2:2014 Clase B |
|---|--------|-------|------|------|-----------|--------------------------|
| Humedad (% m.) (b.h.) | 9.6 | 12.3 | 7.2 | 10.8 | 6.3 | ≤ 10 |
| Diámetro (mm) | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | |
| Densidad pila (kg/m ³) (MS) | 620 | 630 | 700 | 650 | 690 | ≥ 600 |
| Durabilidad mecánica (%) (MH) | 98.4 | 98.1 | 97.3 | 97.8 | 99.2 | ≥ 96.5 |
| Finos (%m.) (MH) | 0.2 | 1.4 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | ≤ 1.0 |
| Cenizas (%m.) (b.s.) | 1.4 | 2.2 | 4.2 | 3.8 | 0.5 | ≤ 2.0 |
| Análisis elemental | | | | | | |
| C (%m.) (b.s.) | 50.3 | 49.1 | 50.2 | 50.0 | 51.4 | |
| H (%m.) (b.s.) | 6.3 | 6.2 | 5.8 | 6.1 | 6.1 | |
| N (%m.) (b.s.) | 0.88 | 0.86 | 0.40 | 0.97 | 0.05 | ≤ 1.0 |
| S (%m.) (b.s.) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.02 | ≤ 0.05 |
| Cl (%m.) (b.s.) | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.08 | 0.01 | ≤ 0.03 |
| Poder calorífico | | | | | | |
| PCI (MJ/kg) (b.s.) | 18.9 | 19.1 | 18.7 | 18.6 | 19.1 | |
| PCI (MJ/kg) (b.h.) | 16.9 | 16.4 | 17.2 | 16.3 | 17.8 | ≥ 16.5 |

4.3. Combustión

En los ensayos de combustión, las dos calderas trabajaron con los combustibles de matorral sin presentarse problemas de operación durante las 6 horas que se fijaron para la duración del estado estacionario. En las Tablas 6 y 7 se recogen los valores de la potencia térmica introducida con el combustible y de las emisiones medias derivadas de la combustión.

Tabla 6. Resultados de los ensayos de combustión con biomasa triturada a 30 mm en la caldera PM500

| Parámetro | Escoba | Brezo | Jara | Tojo | Pino |
|---|--------|-------|------|------|------|
| Potencia (kW) | 424 | 412 | 458 | 430 | 453 |
| O ₂ (%v.) (b.s.) | 8.7 | 10.1 | 9.6 | 10.4 | 8.8 |
| CO (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 2102 | 2144 | 1159 | 1192 | 1558 |
| NO _x (mg/Nm ³) (b.s.) ^{(1) (2)} | 335 | 330 | 224 | 305 | 126 |
| SO ₂ (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 6.2 | 65 | 32 | 155 | 21 |
| HCl (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 0.70 | 0.61 | 0.87 | 68 | 0.24 |
| COT (mg/Nm ³) (b.s.) ^{(1) (3)} | 30 | 20 | 13 | 13 | 43 |
| Partículas (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 148 | 295 | 161 | 210 | 42 |

%v.: % en volumen; b.s.: base seca; ⁽¹⁾: referido al 10% de O₂; ⁽²⁾: suma de NO y NO₂, expresados como NO₂; ⁽³⁾: compuestos orgánicos totales expresados como C

Tabla 7. Resultados de los ensayos de combustión con pélets en la caldera PM40

| Parámetro | Escoba | Brezo | Jara | Tojo | Pino (A1) |
|---|--------|-------|------|------|-----------|
| Potencia (kW) | 48.7 | 45.7 | 44.1 | 45.8 | 45.0 |
| O ₂ (%v.) (b.s.) | 8.0 | 7.7 | 8.3 | 8.2 | 8.1 |
| CO (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 623 | 60 | 71 | 22 | 295 |
| NO _x (mg/Nm ³) (b.s.) ^{(1) (2)} | 388 | 482 | 373 | 601 | 140 |
| SO ₂ (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 7.0 | 79 | 59 | 132 | 13 |
| HCl (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 2.9 | 13 | 7.4 | 60 | 0.34 |
| COT (mg/Nm ³) (b.s.) ^{(1) (3)} | 3.3 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.2 |
| Partículas (mg/Nm ³) (b.s.) ⁽¹⁾ | 235 | 135 | 32 | 40 | 97 |

%v.: % en volumen; b.s.: base seca; ⁽¹⁾: referido al 10% de O₂; ⁽²⁾: suma de NO y NO₂, expresados como NO₂; ⁽³⁾: carbono orgánico total expresado como C

Después de finalizar cada uno de los ensayos de combustión, se procedió al muestreo de ceniza de las calderas y a la limpieza de las mismas. Durante el muestreo se caracterizó visualmente la ceniza recogida, y se apreció que en la caldera PM500 no se formaron escorias en la parrilla tras la combustión de ninguno de los combustibles empleados. Sin embargo, en la caldera PM40, durante la combustión de pélets de brezo, jara y tojo, se produjeron escorias que cubrían toda la parrilla, aunque ha de indicarse que estas escorias no supusieron problemas de operación durante el tiempo de realización de los ensayos.

5. Discusión

5.1. Molienda

A la vista de los resultados reflejados en la Tabla 2, puede decirse que la molienda de tojo presenta menor flujo másico y mayor consumo energético que el resto de matorrales (cuyos valores son del mismo orden) cuando se muele a 30 mm. Este hecho se debe fundamentalmente a la mayor dificultad durante la alimentación del tojo al molino. Por otro lado, si se comparan los resultados mostrados en la Tabla 3, cabe destacar que la molienda a 4 mm de escoba y brezo supone menores flujos másicos y mayores consumos energéticos, siendo esto debido a que son especies que presentan mayor elasticidad y mayor resistencia a la rotura. Además, ha de indicarse que la biomasa de brezo utilizada era de edad elevada y calibre grueso (más de 2 cm en la base). Por el contrario, la jara y el tojo son materiales de menor elasticidad que, con baja humedad, se rompen mejor mediante las acciones de impacto y rozamiento dentro del molino de martillos.

5.2. Peletización

Considerando los resultados mostrados en la Tabla 4, puede verse que el tojo es el matorral cuya peletización resulta más fácil. Así, comparando con la jara, el consumo para la peletización del tojo es un 39.7% más bajo y el flujo másico se encuentra un 49.2% por encima. Por otro lado, los valores correspondientes a la escoba y el brezo son similares entre sí, situándose entre el tojo y la jara.

Con respecto a la caracterización de los pélets obtenidos, si se comparan con la norma ISO 17225-2:2014, puede verse que podrían considerarse de uso no industrial, con las siguientes consideraciones:

- La categoría B implica humedades por debajo del 10%. Aunque este límite no se consigue con los pélets de brezo y tojo, ha de indicarse que es simplemente por el hecho de que el pequeño tamaño de la prensa utilizada no permite trabajar con humedades inferiores, que normalmente requieren mayor presiones. En prensas de tamaño industrial los pélets se obtendrían con humedades inferiores al 10%.
- En cuanto al poder calorífico, puesto que su valor está ligado a la humedad, podría cumplirse con el límite establecido en la categoría B si se realizara un ajuste del contenido en humedad.
- Con respecto al contenido en ceniza, tanto la escoba como el brezo cumplen o están muy próximos al límite del 2.0%. En los otros matorrales, ha de tenerse en cuenta que durante la recogida y transporte del material se pueden arrastrar impurezas que aumentan el contenido en ceniza final, con lo que este parámetro podría reducirse hasta cierto punto con un control adecuado de la cadena logística. Así, en muestras concretas recogidas para su análisis en laboratorio, VIANA et al reportan contenidos en ceniza medios para matorral comprendidos entre el 1 y el 2%.
- Por último, a la vista del análisis elemental, puede decirse que el tojo supera de forma notable los valores establecidos para el azufre y el cloro en la categoría B, por lo que un uso industrial sería más adecuado para este combustible.

5.3. Combustión

Comparando los valores medios de las emisiones registradas durante la combustión de los biocombustibles de matorral y los de pino utilizados como referencia (Tablas 6 y 7), puede verse que, en general, la combustión de los primeros conduce a una mayor emisión de NO_x y partículas. La emisión más alta de NO_x era de esperar, dado el mayor contenido en nitrógeno de estos combustibles (ver Tabla 5), hecho que también ha sido reportado por VIANA et al, PÉREZ et al y NÚÑEZ-REGUEIRA et al en sus trabajos. Por otro lado, la mayor emisión de partículas puede estar relacionada tanto con las condiciones de operación durante los ensayos como con la composición de la biomasa utilizada.

Con respecto a las emisiones de SO₂ y HCl cabe destacar las elevadas emisiones durante la combustión de tojo, como cabría esperar del mayor contenido en azufre y cloro de esta biomasa (Tabla 4).

Por último, ha de tenerse en cuenta que, dada la mayor concentración de ceniza en los pélets de matorral comparados con los de pino, es necesario regular apropiadamente las calderas para evitar temperaturas elevadas en el quemador que podrían originar la formación de escorias.

6. Conclusiones

Teniéndose en cuenta los resultados obtenidos, puede concluirse que:

- El comportamiento del matorral en la molienda es difícil de predecir ya que depende de varios factores, como la humedad, la elasticidad y edad de los tallos que lo componen y el formato en el que se recibe, pacas o a pre-triturado en campo a granel.
- Con respecto a la peletización, el tojo es el matorral que presenta mayor flujo másico de pélets y menor consumo energético, seguido por la escoba y el brezo, con valores similares y, finalmente, la jara.
- En cuanto a la caracterización de los pélets, con un pretratamiento adecuado, que implica la reducción en la humedad y en el contenido en ceniza de los pélets obtenidos, se podrían llegar a clasificar los pélets de escoba, brezo y jara dentro de la categoría B de la norma ISO 17225-2:2014, para uso en aplicaciones comerciales y residenciales. Sin embargo, los pélets de tojo, dado su alto contenido en azufre y cloro, deberían destinarse a uso industrial. Actualmente se está realizando un estudio del almacenamiento de estas biomásas con objeto de determinar su influencia sobre la eliminación de algunos de sus componentes, tales como el nitrógeno, el azufre y el cloro.
- La combustión de biomasa de matorral da lugar a una mayor emisión de NO_x y partículas que la combustión de los combustibles de pino utilizados como referencia. De este modo, sería aconsejable utilizar sistemas de reducción de NO_x (como la combustión escalonada) y partículas (como multiciclones, filtros de mangas o precipitadores electrostáticos).
- La combustión de tojo genera emisiones de SO₂ y HCl especialmente altas, por lo que sería necesario un estudio más amplio sobre la combustión de este matorral con el objeto de intentar reducir los contenidos de azufre y cloro en la biomasa y las emisiones de SO₂ y HCl durante la combustión.
- En función de la caldera empleada y de las condiciones de operación utilizadas, el uso de combustibles de matorral (especialmente brezo, jara y tojo) puede dar lugar a la formación de escorias, cuyo comportamiento a largo plazo, podría limitar la utilización de estos combustibles en calderas del sector doméstico. Por este motivo, se están realizando estudios complementarios al realizado sobre la combustión de estos matorrales.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto LIFE+ ENERBIOSCRUB (LIFE 13 ENV/ES/000660), cofinanciado por el Programa LIFE de la UE.

Para su realización, se han utilizado además dos equipos cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional: una línea de acondicionamiento y pretratamiento de biomasa (proyecto CIEM09-3E-275) y un sistema de recolección y empacado simultáneo de biomasa (proyecto CIEM13-3E-2505).

8. Bibliografía

BAEZA, M.J.; DE LUIS, M.; RAVENTÓS, J.; ESCARRÉ, A.; 2002. Factor influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. *J Environ Manage* 65 199 – 208.

GARCÍA-HURTADO; E., PEY; J., BAEZA, M.J.; CARRARA, A.; LLOVET, J.; QUEROL, X.; ALASTUEY, A.; VALLEJO, V.R.; 2013. Carbon emissions in Mediterranean shrubland wildfires: An experimental approach. *Atmos Environ* 69 86 – 93

MAGRAMA (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE); 2015. Available at http://www.magrama.gob.es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx#para0. Acceso el 25 de julio de 2016.

NÚÑEZ-REGUEIRA, L.; PROUPÍN-CASTIÑEIRAS, J.; RODRÍGUEZ-AÑÓN, J.A.; 2004. Energy evaluation of forest originated from shrub species in Galicia. *Bioresource Technol* 91 215 - 221.

PÉREZ, S.; RENEDO, C.J.; ORTIZ, A.; DELGADO, F.; FERNÁNDEZ, I.; 2014. Energy potential of native shrub species in northern Spain. *Renew Energ* 62 79 – 83.

VIANA, H.; VEGA-NIEVA, D.J.; ORTIZ TORRES L.; LOUSADA, J.; ARANHA, J.; 2012. Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain. *Fuel* 102 737 – 745.