

TORREFACCIÓN DE BIOMASA DENSIFICADA

Daria Tito Ferro*, Pedro Beatón Soler**, Rolando Zanzi***

*Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), **Delegación Provincial del CITMA en Santiago de Cuba, ***Department of Chemical Engineering and Technology (KTH), Stockoholm, Sweden.

Se presentan los resultados de un trabajo sobre torrefacción de biomasa realizado con dos tipos de biomasa densificada: pelets de paja de trigo y pelets de madera. Los experimentos de torrefacción fueron llevados a cabo en un equipo a escala de laboratorio a 3 temperaturas (230 °C, 250 °C y 280 °C) y a tres tiempos de residencia (1, 2 y 3 h) para cada una de las temperaturas seleccionadas. Se estudió el efecto de la materia prima y las condiciones de tratamiento sobre el proceso de torrefacción. El producto sólido se caracterizó con composición elemental, contenido energético, humedad, ceniza, fracción volátil y carbono fijo. En los productos gaseosos se analizó el contenido de CO₂, CO, CH₄, C₂H₂, C₂H₄ y C₂H₆ por cromatografía gaseosa.

Se encontró que la composición de la biomasa influyó en la distribución de los productos y que la temperatura tiene una influencia predominante respecto al tiempo de residencia. El valor calórico de las biomásas se incremento hasta 11,3 % para los pelets de madera y 18,2 % para los pelets de paja de trigo, a la temperatura de 280 °C y 3 horas de tratamiento.

Palabras clave: biomasa, torrefacción, pirólisis, pelets.

This work present the results of a study on biomass torrefaction realized with two types of densified biomass: straw pellets and wood pellets. The torrefaction experiments was carried out in a laboratory scale equipment to three temperatures (230 °C, 250 °C and 280 °C) and three residence time (1, 2 or 3 hours) for each temperature selected. The effect of the raw material and treatment conditions on the products of torrefaction process is studied. The solid product is characterized with elemental composition, energy content, moisture content, ash content, volatile fraction. In the gaseous product is analysed content of CO₂, CO, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, and C₂H₆ by gas chromatography. The biomass composition influenced the products distribution. The biomass calorific value increased 11,3 % for wood pellets and 18,2 % for straw pellets, at 280 °C and 3h of treatment.

Key words: biomass, torrefaction, pyrolysis, pellets.

Introducción

La biomasa se utiliza cada vez más para producir energía. Los elevados precios de los combustibles fósiles, junto con las nuevas políticas energéticas medioambientales, están convirtiendo el combustible biomasa en un elemento esencial de las políticas energéticas tanto en los países desarrollados como en desarrollo. La biomasa tiene algunas desventajas como combustible (bajo valor calórico, alto contenido de humedad, naturaleza higroscópica). La torrefacción es un método para el mejoramiento de las propiedades de la biomasa como combustible. Consiste en un calentamiento lento de la biomasa en una atmósfera inerte a una temperatura máxima de 300 °C /1/. Se produce un producto sólido uniforme con bajo contenido de humedad y alto poder calorífico comparado con la biomasa inicial.

El proceso puede ser llamado también pirólisis moderada, con remoción de los productos que producen el humo y la formación de productos sólidos que retienen aproximadamente el 70 % del peso inicial y entre 80-90 % del contenido de energía /2/. Cuando la biomasa se calienta, en primer lugar tiene lugar el secado. El calentamiento remueve además nuevas cantidades de agua producto de las reacciones químicas a través del proceso de termo-condensación, el cual ocurre por encima de 160 °C, así como la formación de CO y CO₂. A temperaturas entre 180-270 °C tienen lugar una reacción exotérmica, así como le sigue la degradación de la hemicelulosa. La biomasa comienza a tostarse y desprende humedad, CO₂ y grandes cantidades de ácido acético con algunos fenoles. Esos compuestos tienen bajo valor energético.

La biomasa torrada puede sustituir al carbón vegetal en un gran número de aplicaciones como combustible para cocinas domésticas de leña,

para calentamiento de residencias, producción de pelets y briquetas para uso comercial y doméstico /3-5/. Puede ser usada como combustible en la industria. Con un intervalo entre 30 y 35 % de carbón fijo, la biomasa torrada es un excelente agente reductor /4/. La biomasa torrada puede ser mezclada con carbón mineral y quemada en una caldera de carbón mineral pulverizado. Una ventaja importante de la madera torrada, en comparación con la madera original, es su uniformidad. Debido al bajo contenido de humedad de la madera torrada, la calidad del combustible es mejor y el costo del transporte menor. Las propiedades de la madera torrada deberían implicar un mejoramiento en la operación de los gasificadores, donde la estabilidad del proceso es importante /3/.

Teniendo en cuenta las ventajas que tiene el uso de la biomasa torrada como sustituto del carbón en

zonas rurales, y las ventajas que proporciona el proceso de densificación el cual mejora también las características de la biomasa como combustible, es que se decide realizar este trabajo. El cual tiene por objetivo estudiar el proceso de torrefacción de 2 tipos de biomasa densificada, (pelets de aserrín madera y pelets de paja de trigo) a tres temperaturas y tres tiempos de residencia, así como caracterizar la materia prima y los productos obtenidos.

Materiales y métodos

Dos tipos de biomasa densificada fueron utilizadas como materia prima: pelets de madera y pelets de paja de trigo. La tabla 1 muestra las características físicas y el contenido de cenizas y humedad de las biomásas antes de someterlas al proceso de torrefacción.

Tabla 1
Características físicas, contenido de humedad y cenizas de la materia prima

Biomasa	Pelets de paja de trigo	Pelets de aserrín madera
Diámetro (mm)	8-8,5	6-8
Longitud (mm)	5-29,6	5-15
Densidad (Kg/m ³)	1224	650
Cenizas (% lh)	4,6	0,3
Humedad (%)	7,75	6,09

lh: libre de humedad

El equipo utilizado en los experimentos incluye un reactor cilíndrico y un equipo para la condensación de los productos líquidos y medición de los productos gaseosos. El reactor (0,5 m de largo y 0,04 m de diámetro) es calentado por calentadores eléctricos, consiste en dos cilindros, uno exterior y otro interior. La muestra se sitúa en el cilindro interior, el cual tiene una red metálica en la parte inferior. Dicho cilindro interior se puede sacar por arriba, de manera de poder retirar la biomasa torrada producida. La parte exterior está conectada mediante una rosca a un tubo metálico, a través del cual los volátiles son transportados al equipo de separación de productos líquidos. Los volátiles se enfrían en el condensador de agua. El gas pasa a través de una columna conteniendo algodón y pentóxido fosfórico como agente secante y luego es transportado a una bolsa.

En cada experimento se utilizaron 65 g de biomasa y un flujo de nitrógeno de 5 L/h como gas inerte. El reactor se calienta a 230, 250 y 280 °C y la biomasa es mantenida a la temperatura (T) final durante un período determinado de tiempo (t = 1, 2 y 3 h), luego se apagan los calentadores eléctricos y se deja enfriar el reactor. Antes de cada experimento se hacen circular 12 L de nitrógeno para evitar la presencia de oxígeno en el reactor.

El producto sólido torrado es pesado y caracterizado. Se estudia la influencia de las condiciones experimentales (temperatura y tiempo de residencia) sobre la distribución de los productos y sobre sus propiedades.

Las determinaciones de humedad, ceniza y contenido de volátiles en la materia prima y en los productos torrados fueron realizados como se describe en la

norma ASTM 1762 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. /7/.

La composición química (contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno) de las muestras sólidas se determinó con el analizador elemental Leco CHNS-932 en el Laboratorio de Análisis Químico de la Universidad de Málaga en España. El contenido de oxígeno fue calculado por diferencia.

Los productos gaseosos se analizaron en un cromatógrafo de gases. HEWELETT PACKARD 5890 Series II. Se analizó la concentración de CO₂, CO, CH₄, e hidrocarburos C₂ (etano, eteno y acetileno).

El poder calorífico (CV) de las muestras es calculado usando la composición elemental de las mismas /6/:

$$CV = 0,34 \% C + 1,40 \% H - 0,16 \% O \text{ (MJ/kg)}.$$

Resultados y discusión

Distribución de los productos de la torrefacción. Composición del producto sólido

La tabla 2 muestra los rendimientos de los productos obtenidos en los experimentos reali-

zados. La distribución de los productos es influenciada por el tipo y composición de la biomasa utilizada. En los experimentos con madera (pelets de aserrín) se producen mayor cantidad de producto sólido y menor cantidad de líquido (agua-alquitrán) y gas, que en los experimentos con residuos agrícolas (pelets de paja de trigo).

Tabla 2
Distribución de los productos de la torrefacción

Biomasa	Condiciones de tratamiento	Rendimiento de productos %, lhc			
	T (°C)	t (h)	Sólido	Líquido	Gas
Pelets paja de trigo	230	1	95,0	5,0	0,1
	230	2	93,6	6,2	0,2
	230	3	92,4	8,3	0,3
	250	1	90,0	9,8	0,3
	250	2	89,1	10,5	0,4
	250	3	86,9	12,2	0,6
	280	1	79,9	19,1	1,0
	280	2	76,5	21,1	1,6
	280	3	74,9	22,5	2,0
Pelets aserrín madera	230	1	96,5	3,5	0,06
	230	2	95,5	4,4	0,10
	230	3	94,6	5,3	0,15
	250	1	94,4	5,5	0,15
	250	2	93,3	6,5	0,20
	250	3	92,5	7,2	0,30
	280	1	89,4	10,0	0,60
	280	2	86,7	12,3	1,00
	280	3	85,8	12,9	1,30

lhc. Libre de humedad y ceniza

Como se esperaba, cuando la temperatura aumenta de 230 °C a 280 °C, la producción de biomasa torreficada disminuye, mientras que la producción de gases y líquidos aumenta. El efecto de la temperatura sobre la distribución de productos es más pronun-

ciado entre 250 y 280 °C que entre 230 y 250 °C. Un incremento del tiempo de duración de la torrefacción de 1 h a 3 h provoca una disminución en la cantidad de biomasa torrada debido al aumento de la cantidad de volátiles producidos.

Tabla 3
Análisis elemental y propiedades de las biomásas torradas

Biomasa	T (°C)	t (h)	C % lhc	H % lhc	N % lhc	O % lhc	CV MJ/kg	$\frac{CV_p}{CV_b}$	ER %
PPT MP			47,5	6,4	0,63	45,5	17,8	--	--
PPT	230	1	47,8	6,3	0,66	45,2	17,90	1,00	95,5
	230	2	47,9	6,3	0,69	45,1	17,90	1,00	94,1
	230	3	48,1	6,2	0,69	45,0	17,90	1,00	93,0
	250	1	49,0	6,1	0,79	44,1	18,21	1,02	92,1
	250	2	49,6	6,1	0,80	43,5	18,43	1,03	92,2
	250	3	49,6	6,1	0,80	43,5	18,46	1,04	90,1
	280	1	52,8	6,1	0,85	40,3	20,02	1,12	90,0
	280	2	53,8	6,0	0,92	39,3	20,40	1,14	87,7
	280	3	55,5	5,9	0,95	37,7	21,04	1,18	88,5
PAM MP			48,5	6,6	0,05	44,9	18,58	--	--
PAM	230	1	49,8	6,3	0,09	43,8	18,77	1,01	97,5
	230	2	50,4	6,3	0,09	43,2	19,02	1,02	97,8
	230	3	50,6	6,2	0,11	43,1	19,03	1,02	96,9
	250	1	50,7	6,2	0,12	43,0	19,05	1,03	96,8
	250	2	50,8	6,2	0,12	42,9	19,12	1,03	96,0
	250	3	51,0	6,2	0,12	42,4	19,24	1,04	95,8
	280	1	52,5	6,2	0,12	42,5	19,87	1,07	95,6
	280	2	53,0	6,2	0,13	42,5	20,13	1,08	94,0
	280	3	54,1	6,2	0,14	42,6	20,68	1,11	95,0

Leyenda:

PPT: Pelets de paja de trigo

PAM: Pelets de aserrín madera

MP: Materia prima

CV_p: Poder calorífico del producto torrado.

CV_b: Poder calorífico de la biomasa de origen.

RE: Recuperación de energía = CV_p * rend. sólido / CV_b.

El análisis elemental de las biomasa y de sus productos torrados (tabla 3) muestra que el contenido de carbono (C) aumenta con la temperatura y que el contenido de hidrógeno (H) y oxígeno (O) decrece. Las pérdidas de hidrógeno y oxígeno se deben a la formación de agua, monóxido y dióxido de carbono durante la torrefacción, en tanto que el aumento del carbono al incremento de la cantidad de carbono fijo.

El poder calorífico (CV) del producto sólido torrado aumenta con la temperatura.

A temperaturas sobre los 250 y 280 °C se observa un mayor efecto de la temperatura sobre el poder calorífico del producto torrado.

También, cuando se incrementa el tiempo de residencia en la torrefacción aumenta ligeramente el poder calorífico. Para los pelets de madera el CV varia de 18,57 MJ/kg a 20,67 MJ/kg mientras que para los de paja de trigo varia de 17,94 MJ/kg a 21,36 MJ/kg. Lo que significa que el valor calórico de las biomásas se incrementó hasta 11,3 % para los pelets de madera y 18,2 % para los pelets de paja de trigo, a la temperatura de 280°C y tres h de tratamiento.

Los productos sólidos obtenidos en los experimentos con ambas biomásas tienen grados de carbonización similares (CV_p/CV_b) y este aumenta con la temperatura.

Tabla 4.
Contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo de las biomásas torradas

Biomasa	Condiciones de tratamiento	% Humedad	% Cenizas	% Materia volátil	% Carbono fijo
	T(°C) -t (h)				
PPT MP	-	7,75	4,56	77,12	18,32
PPT	230-1	0,22	4,57	75,66	19,77
	230-2	0,59	4,29	75,25	20,46
	230-3	0,27	4,74	74,00	21,26
	250-1	0,71	5,18	74,14	20,68
	250-2	0,19	4,97	72,49	22,54
	250-3	0,44	5,07	72,24	22,69
	280-1	0,90	5,47	64,61	29,92
	280-2	0,37	5,40	69,74	24,86
PAM MP	-	6,09	0,23	82,86	16,91
	230-1	0,17	0,21	82,22	17,57
PAM	230-2	0,04	0,23	83,13	16,64
	230-3	0,12	0,22	82,32	17,46
	250-1	0,04	0,22	82,38	17,40
	250-2	0,19	0,23	80,30	19,47
	250-3	0,26	0,23	82,20	17,57
	280-1	0,39	0,24	78,49	21,27
	280-2	0,10	0,23	80,21	19,56
	280-3	0,02	0,26	78,25	21,49

Como se puede observar en la tabla 4 el proceso de torrefacción disminuye notablemente el contenido de humedad en las biomásas, entre 88-98,7 % en los pellets de paja de trigo y entre 93,6-99,7 % en los pellets de madera.

El contenido de cenizas en los pellets de paja de trigo se incrementa en menos de 1 % con la temperatura, mientras para los pellets de madera permanece prácticamente invariable, esto último debido al bajo contenido de ceniza presente en ellos (menor de 0,3 %).

La materia volátil disminuye y el contenido de carbono fijo se incrementa con el aumento

de la temperatura para ambas biomásas estudiadas. La disminución de los volátiles se corresponde con el hecho de que durante el proceso de torrefacción la cantidad de gases que se producen aumenta con el aumento de la temperatura. Largos tiempos de residencia no parecen tener influencia significativa sobre estas propiedades.

Composición de los productos gaseosos

La tabla 5 muestra la composición del gas obtenido durante la torrefacción.

Tabla 5
Composición de los productos gaseosos

Biomasa	T (°C)	t (h)	CH ₄ %vol.	C ₂ %vol.	CO ₂ %vol.	CO %vol.
Pelets paja de trigo	230	1	bld	0,04	77,0	23,0
	230	2	bld	0,05	76,2	23,8
	230	3	bld	0,06	75,9	24,0
	250	1	0,08	0,07	73,2	26,7
	250	2	0,11	0,08	73,0	26,9
	250	3	0,12	0,15	72,7	27,0
	280	1	0,13	0,13	71,6	28,1
	280	2	0,15	0,35	71,0	28,5
	280	3	0,23	0,43	68,5	30,8
Pelets aserrín madera	230	1	bdl	0,05	78,7	21,25
	230	2	bdl	0,06	78,4	21,59
	230	3	0,22	0,07	75,4	24,29
	250	1	0,23	0,07	74,3	25,4
	250	2	0,34	0,08	72,3	27,3
	250	3	0,37	0,09	70,8	28,8
	280	1	0,52	0,09	70,2	29,4
	280	2	0,37	0,12	66,2	33,3
	280	3	0,34	0,15	64,5	34,9

bld: bajo límite de detección

Las mayores temperaturas favorecen la producción de CO, metano e hidrocarburos C₂, mientras que disminuye el porcentaje de CO₂ en el producto gaseoso. El efecto de la temperatura sobre la composición del producto gaseoso es más pronunciado entre 250-280 °C que entre 230-250 °C.

Mayores tiempos de residencia producen el mismo efecto sobre la composición de los productos gaseosos, que un aumento de la temperatura.

Conclusiones

1. El tipo de biomasa influye sobre la distribución de los productos. Las muestras de madera (pelets de aserrín) producen más producto sólido y menos producto líquido y gaseoso que el residuo agrícola estudiado (pelets de paja de trigo). El rendimiento de productos sólidos disminuye mientras que el de líquido y gas aumenta con la temperatura y el tiempo de residencia.
2. El contenido de carbono en el producto sólido aumenta a temperaturas más elevadas y a tiempos de residencia más largos, mientras que el contenido de hidrógeno y oxígeno disminuye. Por lo tanto, el poder calorífico de la biomasa torrada aumenta con la temperatura y el tiempo de residencia. El valor calórico de las biomazas se incrementó hasta 11,3 % para los

pelets de madera y 18,2 % para los pelets de paja de trigo, a la temperatura de 280 °C y tres horas de tratamiento.

3. El contenido de CH₄, CO e hidrocarburos C₂ en el producto gaseoso aumenta con la temperatura, mientras que el porcentaje de CO₂ disminuye.
4. El contenido de humedad es mucho menor en el producto torrado, que en la biomasa de partida.

Bibliografía

1. Fonseca felfli, F., *et al.*, *Bench unit for biomass residues torrefaction*, in *Proceeding of International Conference on Biomass for Energy and Industry* págs. 1593-1595, Alemania, 1998.
2. Arcate, J. R., *New process for torrefied wood manufacturing*, en *Bioenergy update*, vol. 2, No.4, April 20.
3. Bourgeois, J. P. and J. Doat., *Torrefied wood from temperate and tropical species: Advantages and prospects*, en *Proceedings of International Conference on Bionergy*, vol. 3, págs. 153-159, Elsevier Applied Science Publishers, Göteborg, 1985.
4. Girard, P.; and N. Shah., *Developments on Torrefied Wood an Alternative to Charcoal*, en *REUR Technical Series, Charcoal Production and Pyrolysis Technologies*, No. 20, 1991, págs. 101-114.
5. Battacharya, S. C., *Some aspects of screw press briquetting*, en *Int. Workshop on Biomass Briquetting*, New Dehli, 3-5 Abril 1995.

6. Ruyter, H. P., Coalification model, en Fuel 61, 1982, págs. 1182.

7. Norm ASTM D1762 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.