

Combustión de biomasa

S. Jiménez

Científico Titular del CSIC.

Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión,
LITEC (CSIC-UZ). yago@litec.csic.es

Existen diversas razones por las que el aprovechamiento energético de la biomasa es conveniente:

- Por un lado, porque reduce las emisiones netas de CO₂ a la atmósfera, siempre que la biomasa vuelva a generarse (típicamente, por crecimiento de la planta quemada) y que la energía introducida en el ciclo de combustión-regeneración (por ejemplo, para recoger o transportar la biomasa hasta las plantas de incineración) sea pequeña frente a la producida en la combustión.
- Por otro, porque en muchos casos la biomasa es un residuo de un proceso agrícola, industrial o ganadero del que es necesario deshacerse. Tratarlos como combustibles o fuentes de combustible es una opción con la ventaja añadida de producir energía aprovechable. En el caso de la madera de bosques, por ejemplo, la limpieza de los montes puede contemplarse como un beneficio suficiente que compense la baja eficiencia del proceso de recogida y traslado a planta.

Las biomásas se dividen típicamente en grupos según su origen: forestal (madera), agrícola-ganadero (por ejemplo, orujillo, cáscara de almendra, gallinaza, etc.), cultivo energético (sembrado específicamente con el fin de ser usado como combustible; cardo, soja, etc.) o industrial (e.g. serrín, lodos de depuradora...). Conforman un grupo muy heterogéneo en sus propiedades, con grandes variaciones en su humedad, contenido en ceniza o cantidad de volátiles, por ejemplo, por lo que en general es preciso monitorizar estas y otras características antes de procesar los materiales en las plantas de combustión o preparación. En comparación con los carbones, suelen tener un poder calorífico menor, muchos más volátiles (la parte que se vaporiza al ser calentada y reacciona en fase gas; el resto es la brasa o, en inglés, *char*) y menos cenizas y azufre. Hay, sin embargo, numerosas excepciones: por ejemplo, los lodos tienen un contenido en cenizas muy alto, y hay carbones en el mercado internacional más «limpios» que la mayor parte de las biomásas.

Existen varias alternativas para el aprovechamiento energético de las biomásas, y este texto no puede ni pretende cubrir todas en profundidad. A continuación se mencionan algunas, con algo más de detenimiento en las de combustión:

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



– Producción de bio-diesel a partir de cultivos energéticos u otras biomásas (e.g. aceites reciclados). Diversas regulaciones han fomentado su desarrollo para el uso en vehículos. Mediante diferentes procedimientos químicos se transforman las cadenas de carbonos e hidrógenos de forma que sus propiedades finales son equivalentes a las de los combustibles diesel convencionales procedentes del refinado de petróleo.

– Combustión directa: tradicionalmente, la biomasa se ha empleado en pequeñas calderas domésticas para la generación de calor. En general, se trata de sistemas de limitada eficiencia energética y de uso local, que no requieren de un tratamiento previo complejo del combustible. Para su aprovechamiento industrial, sin embargo, ha sido necesario recurrir a instalaciones mayores, basadas en la generación de vapor a alta temperatura y presión / electricidad; atendiendo a la tecnología empleada, se distinguen, en general de menor a mayor eficiencia:



- Calderas de lecho fijo o parrilla. El combustible, en astillas o trozos de varios centímetros, se introduce sobre unas placas vibrantes o parrillas inclinadas, en las que se quema al tiempo que se desplaza hacia un colector de cenizas en el extremo opuesto a la inyección.
 - Calderas de lecho fluido. El combustible se reduce a tamaños menores (milímetros, típicamente) y se mantiene en suspensión junto con partículas de arena («lecho»). En ocasiones se añade al lecho un ciclón y el flujo es circulante, siendo arrastradas por el aire usado en la combustión sólo las partículas de ceniza.
 - Calderas de combustible pulverizado o lecho arrastrado. El combustible se muele hasta tamaños típicamente menores de un milímetro, y se introduce en la caldera a través de quemadores junto con el aire de combustión. Las partículas se van quemando a lo largo de la caldera, y salen junto con los gases hacia las etapas de filtrado y limpieza.
- Co-combustión: se trata de una opción particularmente interesante, en la que la biomasa se introduce en una caldera alimentada, en esencia, con carbón o un combustible similar, sustituyendo parte de la potencia del hogar (10-15%). La principal ventaja es el aprovechamiento de la estabilidad y eficiencia del conjunto de la caldera y la reducción de incertidumbres tanto en el comportamiento como en el suministro de la biomasa (muchas se caracterizan por variaciones estacionales o de otro tipo).

Texto publicado en la página web www.energia2012.es

- Gasificación: de manera análoga a la producción de bio-diésel, a partir de la biomasa también puede generarse gas combustible, a partir del cual puede producirse materiales diversos (plásticos, etc) o bien energía. En la combustión, la reacción básica es del carbono con el oxígeno, $C + O_2 \rightarrow CO_2$. En la gasificación, en cambio, se reduce mucho la presencia de O_2 y se incrementa en cambio la de CO_2 y H_2O ; centrándonos en el primero, la reacción básica resulta ser $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$. El hidrógeno, dependiendo de las reacciones involucradas y las condiciones empleadas, se encuentra finalmente como H_2 o CH_4 (por ejemplo). Estos gases sintéticos (syngas) pueden quemarse en plantas de ciclo combinado, de gran eficiencia energética.

En correspondencia con estas posibilidades de aprovechamiento industrial-energético del poder calorífico de distintas biomásas, se han ido abriendo sucesivas líneas de investigación en este campo. Lo que sigue es una breve descripción de un número limitado de ellas; las figuras utilizadas provienen de trabajos llevados a cabo en el LITEC (CSIC-Universidad de Zaragoza).

- Determinación de las cinéticas de devolatilización, gasificación y oxidación de los nuevos combustibles. Cuando el diseñador de una caldera se enfrenta a un combustible «desconocido» (sirve tanto para biomásas como para carbones o coques distintos a aquellos con los que tenga experiencia) necesita una serie de datos de entrada que incluye, de forma destacada, la «reactividad» del combustible; es decir, la rapidez de las distintas reacciones en determinadas condiciones de, por ejemplo, concentración de oxígeno y temperatura. A modo de ejemplo, un modelo de combustión popular por su aplicación en varios códigos de simulación de calderas es el de cinética aparente, en el que el ritmo de oxidación de una partícula viene dado por una expresión de tipo Arrhenius:

$$\dot{m}_c = dC/dt = -\pi d_p^2 k_c, \text{ con } k_c = A_c P_{O_2, s}^n \exp(-E_c/RT_p)$$

Además de la presión parcial de oxígeno (en este caso) sobre la superficie de la partícula, que es preciso calcular, sobre el ritmo actúan dos parámetros, A_c y E_c , característicos del combustible y que es preciso determinar experimentalmente. Aunque existen otras opciones, existe cierto consenso sobre el hecho de que los parámetros más fiables se obtienen a partir de datos de ensayos en un reactor de flujo laminar, en el que se capturan partículas en sucesivos estadios de la combustión en condiciones de O_2 y temperatura estables. La siguiente figura muestra el caso de la oxidación de cardo (*Cynara cardunculus*) en un corte de tamaños 300-400 μm y distintas condiciones, junto con los ajustes del modelo con los parámetros considerados óptimos.

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



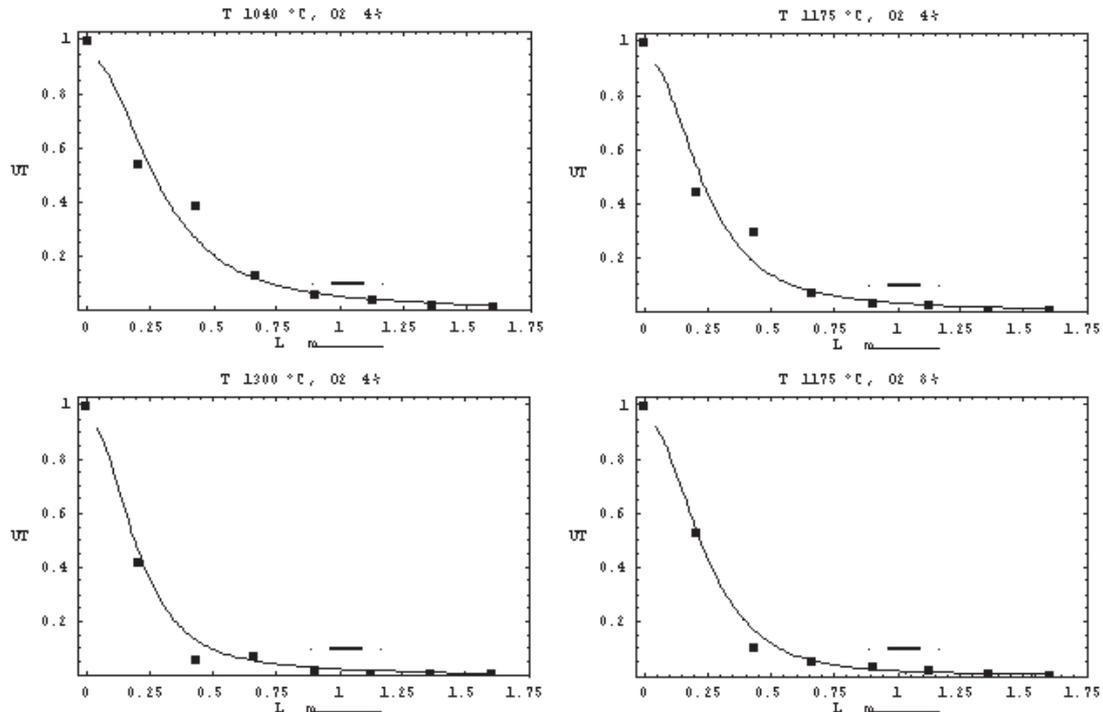
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA





Este tipo de ensayos permiten también determinar el valor real de volátiles de una biomasa, que en general es superior al medido por otras técnicas más alejadas de los ritmos de calentamiento característicos de una caldera industrial.

- Evaluación de modelos de combustión de partículas «gruesas». Una hipótesis muy habitual y razonable en la combustión de carbón (la referencia al pasar a biomasa) es que no hay gradientes internos en las partículas que se queman. Las estimaciones llevadas a cabo justifican su uso también en el caso de partículas de biomasa por debajo de cierto tamaño (~1 mm), pero en grandes calderas el tamaño podría incrementarse por la gran reactividad de estos combustibles. En tal caso, es preciso evaluar las desviaciones asociadas a la presencia de gradientes internos de temperatura y grado de quemado, que en promedio alargan la combustión de una partícula. Esta figura muestra, junto a una imagen de una partícula de madera de 15 mm de diámetro devolatilizándose (i.e. sin oxígeno, a alta temperatura) con varios termopares alojados en su interior para monitorizar la evolución de temperatura en distintos puntos, predicciones de este mismo parámetro en distintos radios con un código computacional:

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



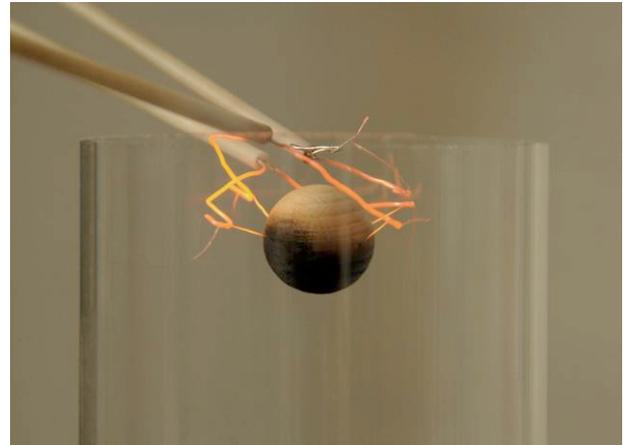
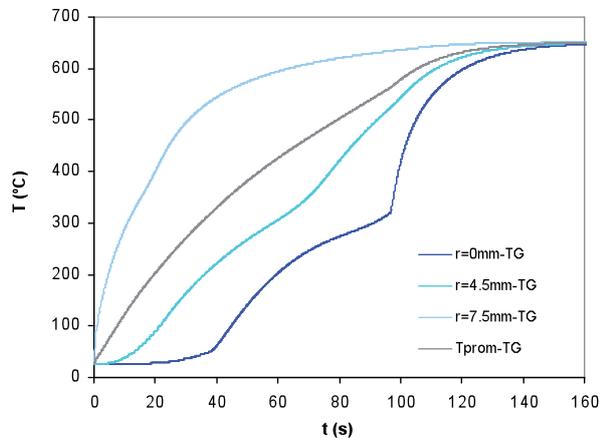
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



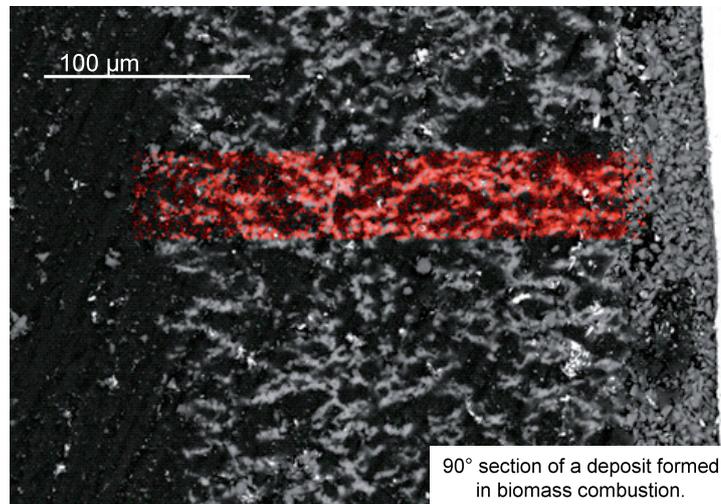
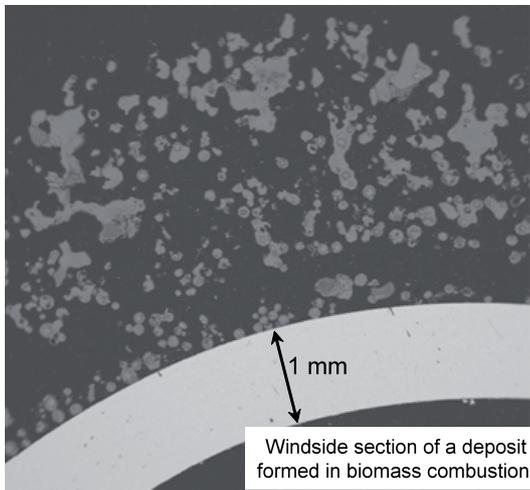
FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA





– Materia mineral. Tanto si se trata de carbones como de biomasa, no todo el «combustible» es en realidad combustible. Junto con el carbono, el hidrógeno, el azufre y otros elementos liberados en forma gaseosa, se introducen en la caldera compuestos sólidos estables a alta temperatura (ceniza) y otros que pueden no serlo a alta temperatura, pero sí condensan al bajar la temperatura de humos antes de la emisión. Ciertos aspectos de la materia mineral de las biomásas hacen que su estudio sea relevante, tanto desde el punto de vista industrial como medioambiental. Específicamente, la biomasa suele contener cantidades relativamente importantes de alcalinos (potasio, sodio) y cloro. Los primeros, en combinación con aluminosilicatos en la ceniza, pueden hacer disminuir su temperatura de fusión, dando lugar a depósitos fundidos a temperaturas relativamente bajas, lo que es un problema serio en la operación de las plantas; la presencia de cloro agrava el problema, pues acelera mucho la corrosión de las paredes metálicas de las calderas, lo que en la práctica suele ser la razón última de las paradas planificadas e imprevistas de las plantas de generación de energía eléctrica (extremadamente costosas en tiempo y dinero). En consecuencia, se está dedicando esfuerzo a la comprensión de los fenómenos involucrados en la formación de depósitos, y en particular a los compuestos por sulfatos y cloruros alcalinos, muy relacionados con la corrosión de las calderas. La imagen de la derecha, en la figura de la página siguiente, muestra el aspecto dendrítico típico de estos depósitos, formados por acreción de partículas submicrónicas generadas en el volumen de gas inmediato a la pared «fría». Los estudios experimentales llevados a cabo apuntan al depósito de partículas de cloruro, seguido por una sulfatación heterogénea rápida. La microscopía electrónica ha permitido realizar análisis químicos locales y encontrar, por ejemplo, dependencias espaciales en el ratio cloruro/sulfato que sugieren este tipo de mecanismos de formación-transformación (la imagen de la izquierda corresponde a un depósito de partículas de ceniza supermicrónicas, y en ella puede apreciarse también la evolución desde partículas individuales en la superficie del metal a grandes áreas de material fundido).

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



Además de por su importancia en la formación de depósitos y aerosoles, los alcalinos, el cloro y el azufre contenidos en las biomásas son motivo de estudio, ya que estos elementos son los componentes casi en exclusiva de las partículas submicrónicas (es decir, menores de una micra) generadas en la combustión. Estas partículas, aunque minoritarias en masa en la distribución de cenizas producidas, son importantes, porque tanto los filtros de las centrales como las defensas del sistema respiratorio humano son menos eficientes en ese rango de tamaños (también, por sus dimensiones, permanecen mucho más tiempo suspendidas en la atmósfera). Por otra parte, estudiar su formación supone un reto tecnológico y científico, ya que los procesos de nucleación y condensación que dan lugar a estas partículas ocurren a alta temperatura y en presencia de vapores inorgánicos altamente inestables. Con ayuda de sondas de nuevo diseño que «congelan» las partículas existentes en el punto muestreado, han podido estudiarse en el microscopio electrónico de transmisión series como la de la siguiente figura:

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



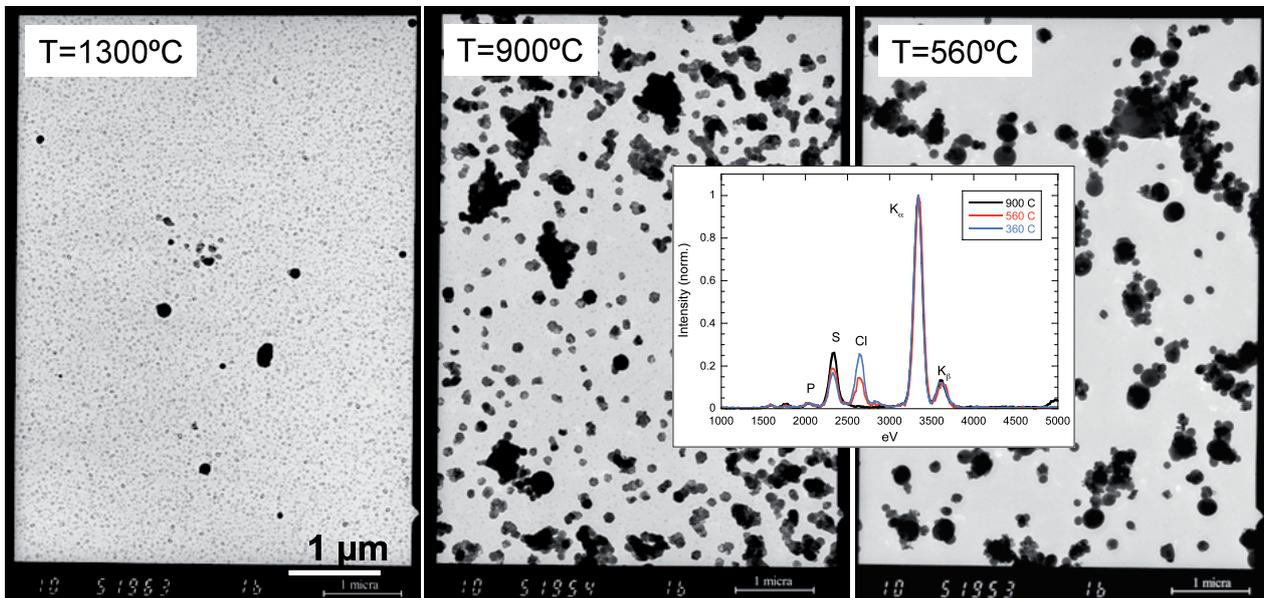
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA





En ella se observa que a muy alta temperatura los alcalinos, el azufre y el cloro están en fase vapor (esas partículas nanométricas se han formado en la sonda por nucleación), mientras que a 900 °C el sulfato ya ha nucleado en los gases de combustión y a temperaturas inferiores el cloruro va condensando sobre estos núcleos frescos. Una vez establecido este proceso, ha sido posible plantear innovaciones tecnológicas tendentes a minimizar e.g. el problema asociado a la presencia de cloro en las partículas (la adición de azufre con combustibles ricos en él, como algunos carbones, en estrategias de co-combustión).

Texto publicado en la página web www.energia2012.es



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

