

USO DE LOS RESIDUOS FORESTALES CON FINES ENERGÉTICOS USE OF FOREST WASTE FOR ENERGY PURPOSES

DR. ABELARDO D. RODRÍGUEZ-ARIAS Y DRA. LIZ BELKIS ROSABAL-PONCE

Laboratorio de Combustión INEL-UNE, Unidad Empresarial de Base de la Empresa de Ingeniería y Proyectos de la Unión Nacional Eléctrica, INEL. Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba,
abelardo@cfg.minem.cu

RESUMEN

La biomasa en general y la forestal en particular se perfila como un recurso energético renovable que deberá ser de uso sostenido en un futuro no muy lejano, debido al incremento del CO₂ en la atmósfera como consecuencia del uso secular de los combustibles fósiles, que genera el calentamiento global, así como la futura escasez de estos combustibles no renovables. El futuro mercado de biomasa deberá basarse en un conocimiento exhaustivo del producto a comercializar. Por tanto deberán determinarse las características como fuente de energía de esta biomasa forestal y sus diferentes formas de uso, con el objetivo de facilitar el asentamiento del mercado nacional de la misma con fines energéticos. En el trabajo se propone el uso de la tecnología aerodinámica de las secciones de paso en rotación, para la quema en llama de la biomasa forestal, que puede ser utilizada sola o en combinación con otras tecnologías de combustión, tanto en calderas existentes como en nuevas inversiones.

Palabras claves: Residuos forestales, biomasa, combustión, estabilidad.

ABSTRACT

Biomass in general and forestry in particular, is emerging as a renewable energy resource that must be of sustained use in the not too distant future, due to the increase of the CO₂ in the atmosphere as a consequence of the secular use of the fossil fuels, that generates the global warming, as well as the future shortage of these non-renewable fuels. The future of biomass market should be based on a thorough knowledge of the product to be marketed. Therefore the characteristics as a source of energy of this forest biomass and its different form of use should be determined, with the aim of facilitating the settlement of the national market of the same for energy purposes. This paper proposes the use of the aerodynamic technology of the pass-through sections in rotation, for flame burning of forest biomass, which can be used alone or in combination with other combustion technologies, both in existing boiler and in new investments.

Key words: Forest residues, biomass, combustion, stability.

INTRODUCCIÓN

La utilización de la biomasa residual forestal requiere de operaciones de transformación física y acondicionamiento, por lo que se hace necesario que el incremento del valor del producto final pueda compensar los costos de las operaciones. Desde luego, de acuerdo al destino final será necesario aplicar diferentes etapas de transformación. Las principales etapas de transformación para el tratamiento de la biomasa residual son astillado, secado, molida, tamizado y densificación.

Las calderas de lecho fluidizado y de parrillas de fuego han sido las tecnologías seleccionadas para la producción de energía a partir de los recursos forestales y agrícolas; sin embargo, en años recientes varios países han incrementado el uso de las calderas de quema en suspensión para la producción de calor y energía. Estas incluyen la co-combustión (*co-firing*) de biomasa con carbón hasta el 100 % de quema de biomasa, utilizando aditivos para reducir los problemas que provoca la ceniza en el funcionamiento

de las calderas. Unido a la comercialización de las tecnologías de quema en suspensión de biomasa, se llevan a cabo investigaciones para mejorar el conocimiento que se tiene sobre la formación de la ceniza volante. Se investiga además el impacto de la formación de depósitos y corrosión en las superficies de transferencia. Las calderas de quema en suspensión también se les conoce como calderas de combustible pulverizado (CCP) (en inglés *Pulverized Fuel Boilers o PF boiler*). Las CCP para generar electricidad con biomasa, según W. R. Livingston *et al.* (2016), logran la mayor eficiencia en cuanto a la generación de potencia, capital de inversión y costos de generación. Los desafíos de la co-combustión de carbón con biomasa están en los grandes porcentajes (por encima del 20 % de la energía base) de biomasa para mantener los mismos parámetros del vapor con alta eficiencia en la caldera y una operación estable.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se ha realizado tomando como base los resultados de las investigaciones aerodinámicas de A. D. Rodríguez Arias y Rosabal Ponce para lograr la combustión estable de pequeñas partículas de combustible de baja densidad detrás de un estabilizador, método aerodinámico al que su autor denominó tecnología de las secciones de paso en rotación.

REVISIÓN DOCUMENTAL

La biomasa forestal es un combustible que potencialmente puede lograr una significativa reducción de las emisiones netas de carbono, cuando se compara con los combustibles fósiles.

Como se explicó anteriormente la co-combustión está jugando un importante rol en la generación de electricidad en muchos países. Sin embargo, como las biomásas se caracterizan por tener alto contenido de volátiles y baja densidad energética, el proceso de combustión es muy diferente al de los carbones. Cuando la biomasa se quema en calderas de carbón existentes, las fuerzas de resistencia aerodinámica que actúan sobre las partículas de biomasa son más fuertes que las que actúan sobre el carbón, lo que puede causar modelos de llama inesperados comparados con los del carbón.

Según la literatura, el uso de las CCP o de quema en suspensión se están implementando típicamente de la siguiente forma:

- Co-combustión de pequeñas cantidades de biomasa (hasta el 10 % sobre la energía básica) con carbón.
- Co-combustión de grandes cantidades de biomasa y carbón (del 10 al 50 % de biomasa sobre la energía básica).
- 100 % de quema de biomasa con nuevas CCP con modificaciones.

Desde el año 2000 las plantas de quema de biomasa con CCP que usan el 100 % de esta y co-combustión de biomasa con carbón se han incrementado en países como Gran Bretaña, Dinamarca, Holanda y Canadá.

En la *Fig. 1* aparece un esquema de las etapas por la que transita el proceso de combustión de una partícula de biomasa. El proceso de combustión completa comprende secado, desvolatilización, la combustión de los volátiles y la oxidación del char. Una partícula de biomasa en el interior de un horno que ha sido calentado a una alta temperatura recibe calor por la vía de la convección y la radiación, y como resultado la superficie de la partícula de biomasa eleva su temperatura. El desprendimiento de calor entonces es transferido por conducción de la superficie al centro de la partícula. La conductividad de la biomasa es una función directa de la temperatura, tanto para el char como para la ceniza.

El gradiente de temperatura en el interior de la partícula es importante para el comienzo del secado y la desvolatilización cuando la temperatura local interior de la partícula alcanza los valores de temperatura correspondientes a la reacción. El secado y la desvolatilización se incrementan cuando se incrementa la temperatura de la partícula, y pueden ocurrir simultáneamente hasta que la partícula de biomasa se seque completamente. La cantidad de materia volátil que se desprende depende del tipo de combustible y de las condiciones de desvolatilización, es decir, temperatura final y rango de calentamiento. Los volátiles a alta temperatura consisten fundamentalmente en hidrocarburos gaseosos.

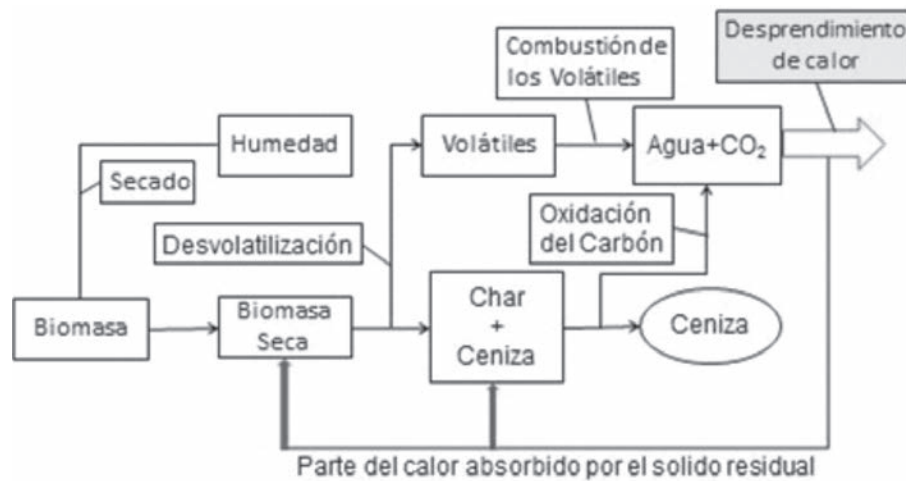


Figura 1. Etapas del proceso de combustión de una partícula de biomasa.

En el proceso de combustión de la biomasa leñosa, la oxidación del char es típicamente lenta, y consume el 99 % del tiempo total. El tiempo de combustión total normalmente incluye el tiempo de calentamiento, tiempo de desvolatilización, así como el tiempo de oxidación del char. Según los estudios realizados por Jun Li *et al.* (2016), el tiempo de oxidación de la biomasa representado por el tiempo de agota-

miento del 99 % del contenido de combustible de la biomasa consumida disminuye con el incremento de temperatura y con la disminución del tamaño de las partículas (Fig. 2). El tiempo de combustión a 900 °C es menos de la mitad del tiempo a 700 °C. Por ejemplo, una partícula de 10 mm tarda alrededor de 34,5 s para quemarse a 900 °C; si la temperatura disminuye a 700 °C demora 60,3 s.

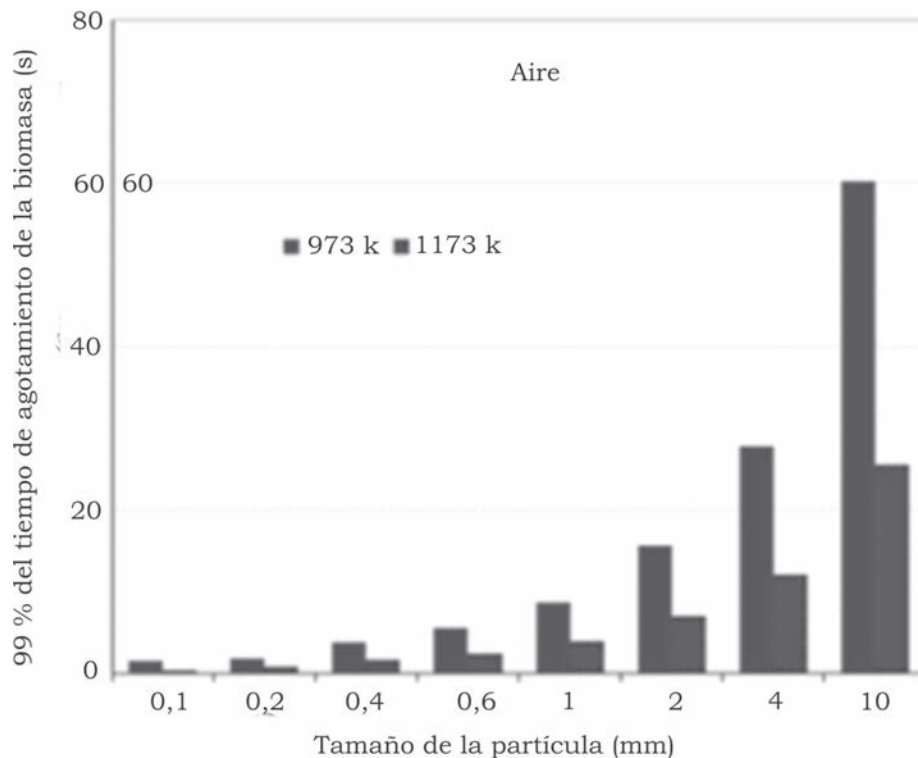


Figura 2. Tiempo de agotamiento de la biomasa para diferentes tamaños de partículas a 700 y 900 °C.

Estos resultados evidencian que la reducción del tamaño de la partícula acelera el proceso de la reacción y reduce el tiempo requerido para quemarse completamente, lo que tiene una importancia extraordinaria en el diseño de hornos y calderas destinadas a este fin.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo expone los resultados de las investigaciones aerodinámicas a partir de las cuales se puede lograr el anclaje de una llama de un sólido pulverizado de muy baja densidad como la biomasa pulverizada seca, sin necesidad de combustible adicional.

Con las investigaciones realizadas por A. D. Rodríguez Arias y V. A. Xristich en 1988 se dieron los primeros pasos para el desarrollo de la tecnología aerodinámica de las secciones de paso en rotación, que en principio se basa en una estructura de dos conos concéntricos unidos por álabes (Fig. 3), que a partir de la combinación del giro con la velocidad del flujo de aire secundario produce un enrarecimiento entre ambos conos que succiona el flujo de aire primario y crea una zona de recirculación interna (ZRI) con características especiales. Los estabilizadores concéntricos con su eje,

como es el caso de los conos simples, han sido cuidadosamente estudiados. El estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC) se diferencia de los clásicos o convencionales en que gira alrededor de su propio eje y desarrolla una admisión de aire en la ZRI. Anterior a estas investigaciones en la literatura no aparecen informaciones sobre este tipo de estructura aerodinámica. El nuevo mecanismo aerodinámico genera un torbellino medio ($S = 0,33$) con un momento angular insuficiente para causar la ruptura del vórtice, lo que demuestra que la función principal de este torbellino no es la formación de la ZRI, como en los dispositivos clásicos de estabilización. El incremento de la intensidad de la turbulencia en la frontera de esta región y en la corriente periférica favorece el mezclado, y actúa como un mecanismo secundario de estabilización, lo que representa una ventaja de esta nueva organización aerodinámica.

Está demostrado que la ZRI con alta estabilidad. En este caso se forma como resultado de la combinación de las dos corrientes de aire que salen del doble cono, siempre que los valores de W_{II} se encuentren en el rango de 20 a 60 m/s, y la velocidad de rotación (ω) entre 80 y 400 r/s.

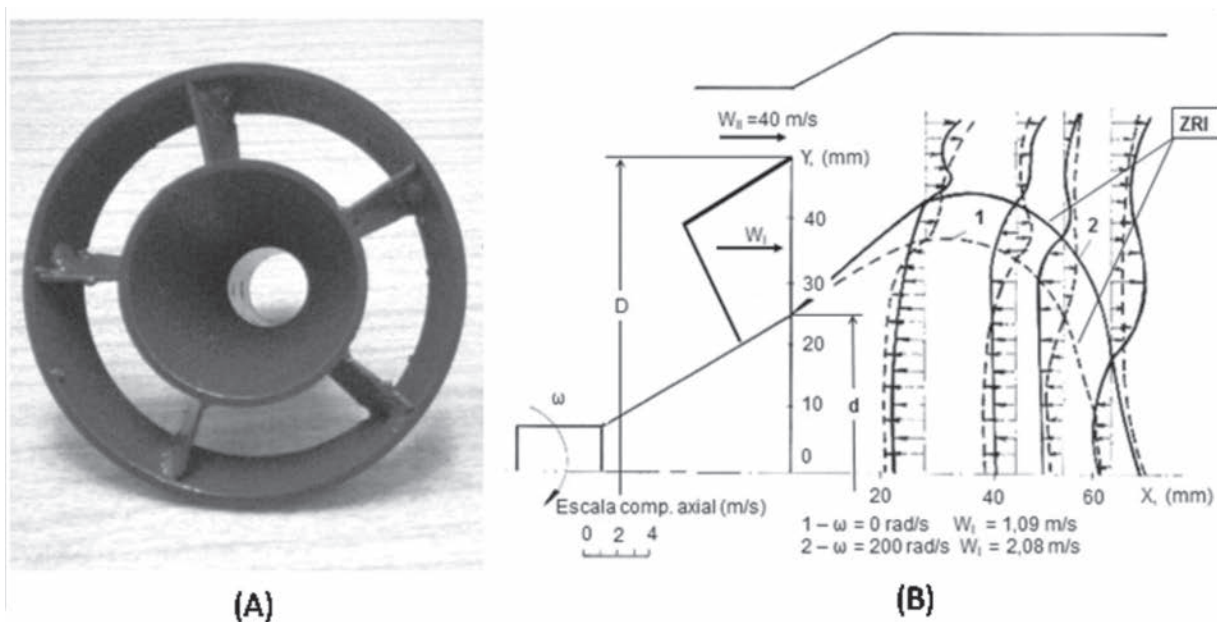


Figura 3. Estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC) (A), perfil de la componente axial de la velocidad detrás del ERDC.

En la *Fig. 4* se pueden ver imágenes de la primera aplicación de este quemador que se utilizó para quemar el meollo y los residuos pulverizados de una fábrica de tableros de bagazo. La foto de la llama de meollo solo es

comparable con la de cualquier combustible líquido. Hay que destacar dentro de las ventajas de los ERDC el alto margen de regulabilidad, la baja caída de presión y las bajas emisiones de NOx.

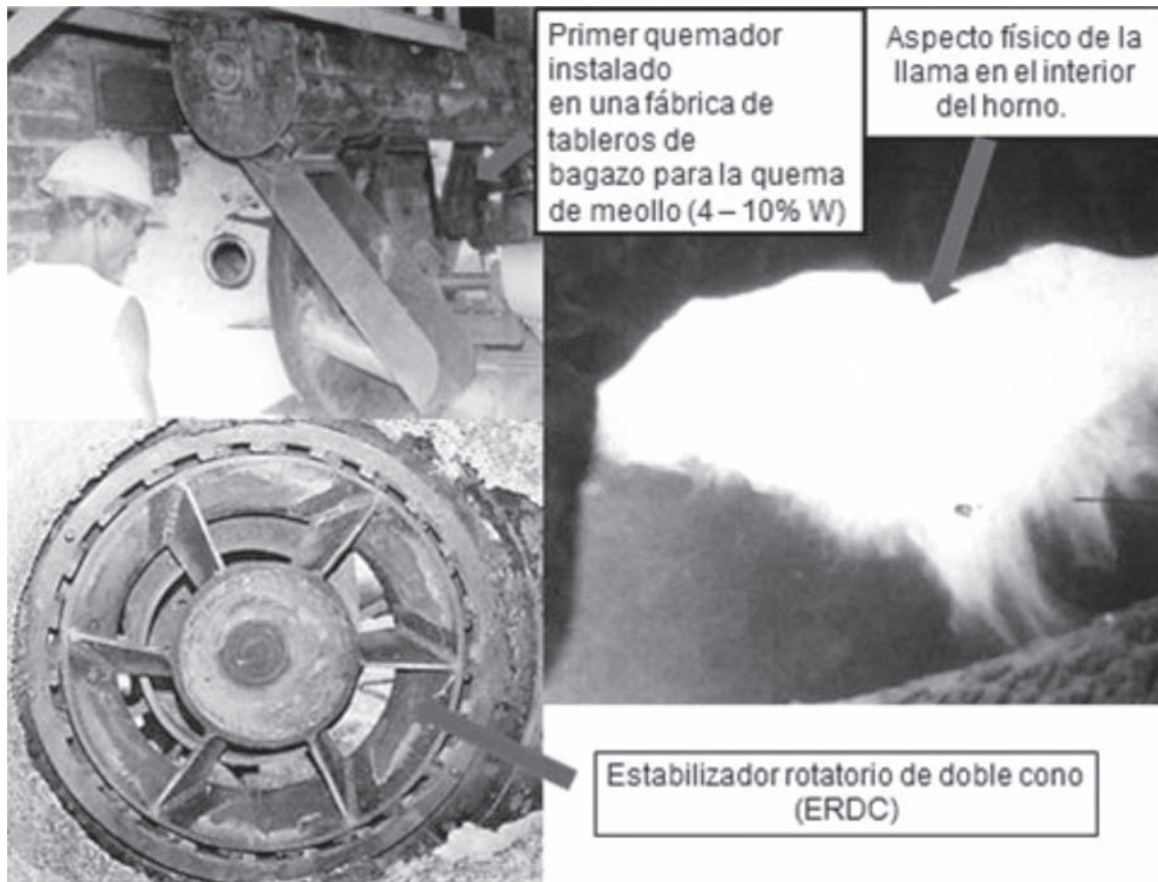


Figura 4. Quemador rotatorio para meollo de 3,5 MW_t.

Para resolver el problema de la quema del meollo en instalaciones donde este sale con alto contenido de humedad (aprox. 53 %) se desarrolló un secador, que se le denominó secador dinámico, que al igual que el quemador retiene las partículas finas de baja densidad durante el proceso de secado. Su funcionamiento está basado en el mismo principio del quemador, las secciones de paso en rotación y puede considerarse como una aplicación más de los resultados científicos obtenidos con el ERDC. En la *Fig. 5* se presenta un esquema del secador dinámico que consta de dos cámaras compactas de secado, la primera que

dispone de un ERDC con álabes en la periferia del cono exterior para la manipulación de los gases calientes, y la segunda que consta de un cono central con paletas inclinadas en la parte exterior de este. En ambas cámaras se logra un intenso régimen turbulento que, además de retener las pequeñas partículas, intensifica los procesos de transferencia de calor y de masa, lo que permite en un reducido espacio evaporar un alto porcentaje del agua contenida en el combustible. Este equipo fue diseñado para secar 12 t/h de meollo que entran con una humedad aproximada entre el 53 y 55 %, y salen con humedades entre el 15 y 20 %.

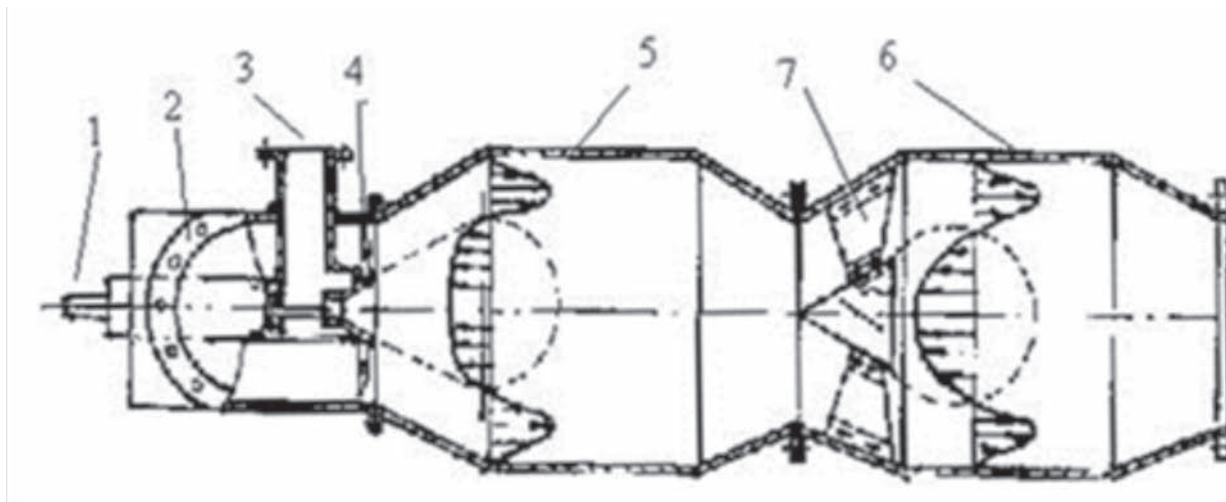
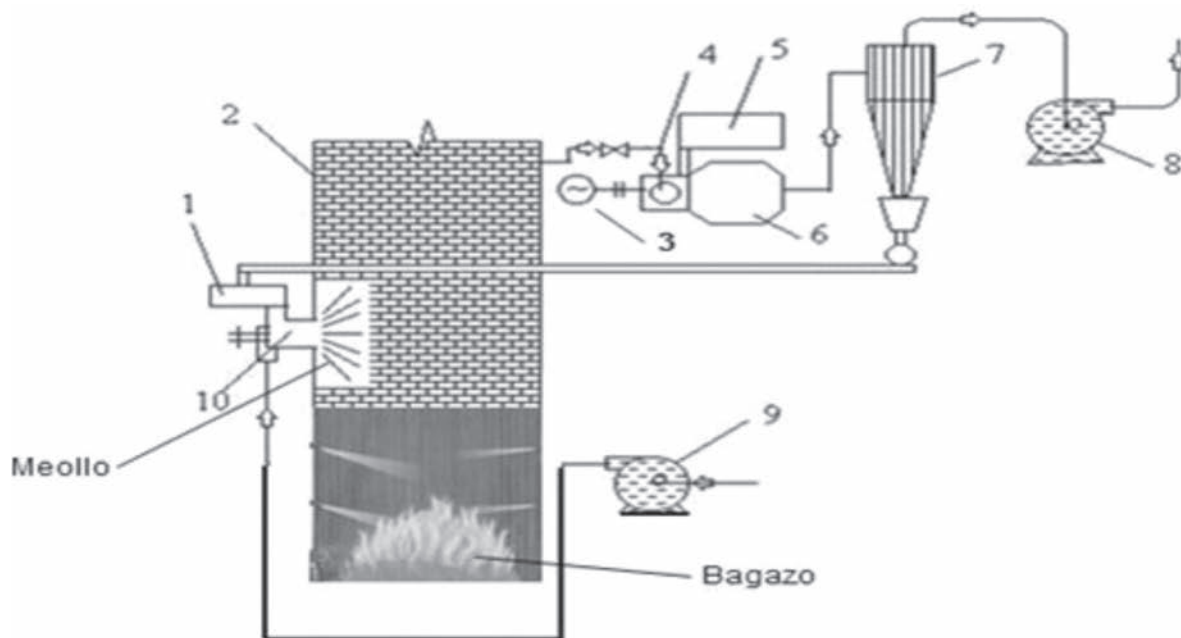


Figura 5. Secador dinámico.

Los quemadores y el secador fueron montados en una caldera de 45 t/h de vapor de una fábrica de azúcar que originalmente consumía 22 t/h

de bagazo integral con un 50 % de humedad y una eficiencia del 70 %.



1-5: Alimentadores de meollo seco y húmedo, respectivamente; 2: Caldera de 45 t/h con bagazo; motor eléctrico; 4: Entrada de gases al secador; 6: Secador dinámico; 7: Ciclón; 8: Tiro inducido; 9: Tiro forzado; 10: Quemador rotatorio de meollo.

Figura 6. Tecnología de las secciones de paso en rotación para la quema del meollo en una caldera de bagazo de 45 t/h.

En la parte superior del horno se instalaron cuatro quemadores de meollo de 3,5 MW_t cada uno, lo que equivale a una sustitución del 32 % de la energía base requerida por la caldera. La diferencia fue suministrada por el bagazo con el sistema de quema en parrilla con lanzador.

El consumo de combustible fue de 3,8 t/h de meollo con un 17 % de humedad y 13,5 t/h de bagazo con el 50 % de humedad. La eficiencia de la caldera se elevó al 7 %, lo que propició una reducción del consumo de 8,5 t/h de bagazo integral con un 50 % de humedad (204 t/d).

CONCLUSIONES

- Los ERDC permiten quemar y secar con eficiencia y estabilidad pequeñas partículas sólidas pulverizadas de biomasa, lo que abre una nueva etapa en el aprovechamiento energético de estos recursos renovables.
- Los quemadores desarrollados con la tecnología de las secciones de paso en rotación aseguran muy bajas caídas de presión, alta regulabilidad y una mínima formación de emisiones de NOx.
- Como resultado de los estudios realizados sobre las características constructivas y de régimen de los ERDC, se demostró que es posible el diseño de llamas o corrientes en torbellino para diferentes intereses industriales, diversas configuraciones aerodinámicas y rangos de estabilidad que están en función de los diámetros de los conos la velocidad del giro y el número de álabes.
- Diferentes variantes de quemadores y secadores diseñados con la tecnología aerodinámica de los ERDC pueden ser utilizados para la generación de energía y calor a partir de los recursos forestales.

BIBLIOGRAFÍA

- Jensen, P. A.; Jappe Frandsen, F.; Wu, H.; & Glarborg, P. 2016. A review: Fly ash and deposit formation in PF fired biomass boilers. In *Impacts of Fuel Quality on Power Production*. Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark.
- Livingston, W. R. *et al.* 2016. *The status of largescale biomass firing – The milling and combustion of biomass in large pulverised coal boilers*. IEA Bionenergy, ISBN 978-1-910154-26-7.
- Jun, Li. *et al.* 2016. Prediction of high-temperature rapid combustion behaviour of woody biomass particles. *Fuel (NL)* 165: 205–214. www.elsevier.com/locate/fuel.
- Jun, Li. *et al.* 2015. Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model. *Applied Energy (NL)* 156: 749-755.
- Rodríguez Arias, A. D. 1988. Quemador Rotatorio con autosucción del aire primario para la quema de meollo. 142 h. Tesis en (opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad Kiev.
- Rosabal Ponce, L. B. 2006. Desarrollo de turbulizadores rotatorios cónicos para quemadores de alta regulabilidad, baja caída de presión y bajo NOx. Tesis en (opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad Central de Las Villas.
- Rodríguez Arias, A. D.; Rosabal Ponce, L.B. Dispositivo rotatorio para la estabilización de la llama. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22752. 2001.
- Rodríguez Arias, A.D., Rosabal Ponce, L.B., Martínez de Villier, P.B. 2000. *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*. La Habana. Editorial Academia. 453 p.
- Saxena, S. C.; Jotshi, C. K. 1994. Fluidized-bed incineration of waste materials. *Progress in Energy and Combustion Science (GB)* 20:281–324.
- Butovski, L.S.; Jristich, V. A. y otros. 1982. Algunas particularidades de la combustión en la ZRI detrás del estabilizador. *Isvestia Vusov. Serie Energética (RS)* 1:105-109.
- Abramovich, L. S. 1984. *Teoría de las corrientes turbulentas*. 716 p.
- Rodríguez Arias, A. D. 1995. Quemador rotatorio para combustibles líquidos y sólidos pulverizados. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22526. Cuba.
- Rodríguez Arias, A. D. 1997. Secador de sólidos pulverizados. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22485. Cuba.

RESEÑA CURRICULAR

Autor principal: Abelardo Daniel Rodríguez Arias

Doctor en Ciencias Técnicas, Académico Titular de la ACC, Profesor Titular Adjunto de la Universidad de Cienfuegos, es creador del Laboratorio de Combustión de la Unión Eléctrica. Es autor de varias publicaciones, entre ellas el libro *Teoría y práctica de los procesos de combustión*, que obtuvo Premio Nacional de la ACC en el año 2000. Ha participado en eventos nacionales e internacionales.