

---

# APLICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN PULVERIZADA DE BIOMASA EN LAS CALDERAS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

Por **Dr. C. Abelardo Daniel Rodríguez Arias\*** y **Dra. C. Liz Belkis Rosabal Ponce\*\***

\* Profesor titular. Laboratorio de Combustión INEL, Cuba.

E-mail: abelardo@cfg.minem.cu

\*\* Laboratorio de Combustión INEL, Cuba.

E-mail: lizbelkis@cfg.minem.cu; lizbelkis@cfg.inel.une.cu

## Resumen

Las calderas de bagazo de la industria azucarera trabajan con eficiencias muy bajas, debido fundamentalmente al alto contenido de humedad en el combustible y a la no uniformidad en la distribución del colchón de partículas sobre la parrilla, lo que provoca afectaciones en el proceso de formación de la mezcla aire combustible y en la estabilidad de la combustión, sobre todo para coeficientes de exceso de aire inferiores a  $\alpha = 1.5$ .

Los altos valores de exceso de aire que se necesitan en los lechos fijos, para asegurar la turbulencia en la zona de mezclado en estas instalaciones, conlleva al incremento de las pérdidas en los gases de salida y por consiguiente a la disminución de la eficiencia de las unidades. Una alternativa para mejorar la eficiencia en las calderas de la industria azucarera, es la sustitución de una porción de la carga base, con el uso de la quema en llama de residuos de biomasa pulverizada seca en los quemadores rotatorios desarrollados por el autor. Los residuos pueden ser provenientes de diferentes fuentes de biomasa, como el propio bagazo después de un proceso de secado y preparación de los RAC (Residuos Agrícolas Cañeros), residuos de madera, cultivos energéticos de diferentes especies o de la propia producción del derivado de bagazo como es el caso del meollo. En el trabajo se presentan los resultados de una instalación demostrativa que se montó en una caldera de bagazo húmedo que genera 45 t/h de vapor y se utilizó como combustible adicional el meollo de una fábrica de tableros.

*Palabras clave: Meollo, RAC, quemador, estabilizador.*

---

## APPLICATION OF PULVERIZED BIOMASS COMBUSTION IN BOILERS OF THE SUGAR INDUSTRY

### Abstract

The bagasse boilers of the sugar industry work with very low efficiencies, mainly due to the high moisture content in the fuel and the non-uniform distribution of the mattress of particles on the grill, which causes effects on the process of formation of the mixture of combustible air and combustion stability, especially for excess air coefficients below  $\alpha = 1.5$ .

The high values of excess air that are needed in the fixed beds, to ensure turbulence in the mixing zone in these facilities, leads to the increase of losses in the exhaust gases and consequently to the decrease in the efficiency of the units. An alternative to improve the efficiency in the boilers of the sugar industry, is the replacement of a portion of the base load, with the use of flame burning of dry powdered biomass residues in rotary burners developed by the author. The waste can be from different sources of biomass, such as bagasse itself after a drying and preparation process, the RAC (Cañeros Agricultural Waste), wood residues, energy crops of different species or from the production of the bagasse derivative itself as It is the case of the kernel. The work presents the results of a demonstration installation that was mounted in a wet bagasse boiler that generates 45 t / h of steam and the core of a panel factory was used as additional fuel.

*Keywords: Meollo, RAC, burner, stabilizer.*

---

## I. Introducción

La diversificación en la industria azucarera es un elemento importante que puede mejorar la rentabilidad del sector. En la producción de papel, pulpa de bagazo y tabletos es necesaria la separación del meollo por ser este un producto no deseado. Durante muchos años se ha intentado el uso del meollo como combustible, sin embargo solo ha sido posible quemarlo en combinación con otros combustibles tales como bagazo integral, fuel-oil, gas natural y carbón [Mann y O'hara, 2011]. Cuando el meollo se quema con fuel-oil o con gas es necesario mantener una llama piloto para garantizar la temperatura de inflamación y la estabilidad del proceso de combustión [Rodríguez, 1988].

La mayoría de las investigaciones han demostrado que el meollo tiene mayor contenido de ceniza y humedad que el bagazo integral, por lo que su poder calorífico es inferior al del bagazo integral. Sin embargo, el pequeño tamaño de las partículas de meollo hace que estas dispongan de una mayor superficie externa que el bagazo, lo que conlleva al incremento de la razón de calentamiento y secado en el bagazo integral, trayendo consigo mejoras en el comportamiento del proceso de combustión dentro del horno [Mann y O'hara, 2011; O'hara *et al.*, 2011; Atchison, 1980].

Las pruebas de combustión en las calderas de las fábricas de azúcar, han sido estudiadas utilizando herramientas de diseño que describen el comportamiento físico espacial del sistema con fluido dinámica computacional (CFD) [Boyd y Kent, 1986], para predecir los efectos del meollo, el bagazo desmedulado, el rendimiento de la quema del bagazo con meollo, el consumo de combustible y el comportamiento de la combustión en calderas típicas de una fábrica de azúcar. Diversas calderas han sido estudiadas ampliamente por muchos investigadores [Dixon, 1984; Luo, *et al.*, 1993; Woodfield *et al.*, 1997]. Otras pruebas más recientes [Mann y O'hara, 2011] demostraron que el meollo cuando se quema solo en las calderas típicas de la industria azucarera conduce a la combustión inestable con la posibilidad de explosiones. Los mejores resultados se logran cuando se quema en mezcla con el bagazo en proporciones de 88,7 % de bagazo con 11,3 % de meollo, para lo cual los modelos indican cierta reducción de la eficiencia de la caldera y un incremento del consumo de combustible [Mann y O'hara, 2011]. Un aspecto de extraordinaria importancia y actualidad relacionado con la combustión de la biomasa, es el desarrollo de una industria energética integrada a la industria azucarera, para lo cual Cuba ha elaborado un programa hasta 2030 que proyecta una sustitución de 14 % de la generación eléctrica del país.

## II. Materiales y métodos

El trabajo se ha realizado tomando como base los resultados de las investigaciones aerodinámicas de Rodríguez Arias, A. D. [Rodríguez, 1988; Rodríguez y Rosabal, 2001; Rodríguez y Ponce, 2017; Rodríguez, 1997; Rodríguez, 1995] para lograr la combustión estable de pequeñas partículas de combustible seco de baja densidad detrás de un estabilizador, método aerodinámico al que su autor denominó tecnología de las secciones de paso en rotación.

Además, para el secado de las partículas se presenta el secador dinámico desarrollado por el autor, que está basado en el mismo principio aerodinámico utilizado en los quemadores.

## III. Resultados y discusión

El bagazo que sale del último molino del tándem contiene entre 55 y 60 % de fibra útil, la otra fracción rica en médula o meollo se encuentra en el orden de 40–45 %, esta fracción final no aporta propiedades deseables al papel o al tablero e introduce dificultades en el proceso de producción [Eyerusalem *et al.*, 2016; Colectivo..., 2000; Rainey, 2009]. El meollo está compuesto de una fina pared de células de parénquima [Giertz y Varma, 1979] más bien cuadrada, es decir, con una baja relación de aspecto, que se caracteriza por tener una longitud máxima en el orden de 520  $\mu\text{m}$  [Rainey *et al.*, 2009] y un diámetro promedio de 140  $\mu\text{m}$  [Paul y Kasi, 1998].

El uso del meollo como combustible y en general la biomasa sólida seca y pulverizada no ha sido lo suficientemente estudiada. El presente trabajo está dedicado a la combustión pulverizada de los residuos sólidos de la biomasa de la producción de azúcar de caña, pulpa y/o tabletos de bagazo. En la industria que utiliza el bagazo para obtener productos derivados, el meollo es considerado como un desecho, cuya eliminación ocasiona problemas. A pesar de los esfuerzos realizados internacionalmente para utilizarlo como combustible, las tecnologías actuales no logran quemarlo con eficiencia, a menos que se utilice un combustible adicional para garantizar la estabilidad del proceso [Rodríguez, 1988]. Esto se debe fundamentalmente a las características físicas de la partícula de meollo, su pequeño tamaño, baja densidad y su alto contenido de humedad. En la Tabla 1 se presenta la composición elemental en base seca del bagazo, el meollo y de los residuos agrícolas cañeros (RAC).

Tabla 1. Composición elemental en base seca del meollo, bagazo y los RAC. (Fuente: [Rodríguez *et al.*, 2000])

Composición elemental en base seca (%) de los residuos de la producción de azúcar de caña y pulpa.						
Residuo	C	H	O	N	S	A
Meollo	45,00	6,00	43,87	0,10	0,03	5,00
Bagazo	47,00	6,00	45,84	0,13	0,04	1,00
RAC	43,70	5,75	44,32	0,22	0,06	5,95

Estos residuos, tanto agrícolas como industriales a la hora de quemarlos sin preparación previa, van a presentar un comportamiento que va a depender principalmente del contenido de humedad. En la Tabla 2 se presentan los rangos de variación de la materia volátil, el carbono fijo y la ceniza de la masa de trabajo de los tres residuos de la producción de azúcar y de pulpa (análisis aproximado o inmediato).

La composición elemental (análisis último o final), con humedad promedio de la masa de trabajo: del bagazo como sale del tándem, el meollo como sale del proceso de

desmedulado y los RAC después de cuatro días expuestos a secado natural, se resume en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se presenta el poder calorífico de la masa de trabajo de cada uno de los residuos, así como los volúmenes teóricos de aire y los gases productos de la combustión. Del análisis de las cuatro tablas presentadas se evidencia la ventaja económica que tendría para la generación de energía el uso de estos residuos energéticos, si se dispone de una tecnología que permite la combustión eficiente de los mismos y que puede ser instalada directamente en el horno donde se quema el bagazo.

Tabla 2. Análisis inmediato de la masa de trabajo del meollo, bagazo y RAC (Fuente: [Rodríguez *et al.*, 2000])

Análisis inmediato de la masa de trabajo de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa(%) .				
Residuo	Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	Ceniza
Meollo	50 - 60	34 - 49	6 - 10	1,6 - 3
Bagazo	45 - 50	39 - 55	4 - 8	0,55 - 2,2
RAC	8 - 15	60 - 77	10 -16	4,6 - 6

Tabla 3 Composición elemental de la masa de trabajo del meollo, bagazo y RAC (Fuente: [Rodríguez *et al.*, 2000])

Composición elemental de la masa de trabajo (%), de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa.							
Residuo	C	H	O	N	S	A	W
Meollo	21,15	2,82	20,62	0,05	0,01	2,35	53
Bagazo	23,50	3,00	22,92	0,06	0,02	0,50	50
RAC	37,15	4,89	37,67	0,19	0,05	5,06	15

### Fundamentos teóricos de la tecnología que se presenta

La estabilidad de un proceso de combustión en llama se logra con dispositivos aerodinámicos que basan su funcionamiento en establecer corrientes inversas de flujo en una determinada zona, a la cual se le denomina zona de

recirculación interna (ZRI). Estos dispositivos se diseñan de flujos rectos y de flujos giratorios. Los que se utilizan en el diseño de quemadores de torbellino son los de flujos giratorios. Varios autores [Rodríguez *et al.*, 2000; Isserlín, 1987; Pomeransev, 1983] los clasifican en tangencial simple, tangencial de voluta, álabes axiales, álabes tangenciales y axiales tangenciales. La tecnología de los flujos giratorios ha sido utilizada durante varias décadas en la generación de energía y propulsión de aviones para lograr el anclaje o estabilidad eficiente de las llamas y la reducción de emisiones en los sistemas de combustión. El modelo de flujo que se genera detrás de estos dispositivos resulta muy complejo debido al alto nivel de turbulencia que se alcanza dentro de la corriente. La estructura aerodinámica de la zona detrás de los estabilizadores está caracterizada por el grado de torbellino  $S$ , magnitud adimensional que se define como la relación entre el momento angular del flujo axial y el momento lineal de este, dividido por el radio del quemador.

Según [Yegian y Cheng, 1996; Vanoverberghe, 2004] los flujos en torbellino pueden clasificarse en débiles ( $S < 0,3$ ), medios o moderados ( $0,3 < S < 0,6$ ) y fuertes los que se producen cuando el grado de torbellino supera su valor crítico  $S > 0,6$  y el  $Re$  del campo de flujo llega a la transición de supercrítico a subcrítico. En estas condiciones, el gradiente de presión adversa favorece la formación de la ZRI, como resultado de la ruptura brusca del vórtice del torbellino. Esto se conoce en la literatura científica como estabilización de llama por ZRI. Según los reportes de la literatura los métodos más usados para reducir la caída de presión en quemadores de torbellino, con altos niveles de estabilidad y eficiencia se basan en el uso de torbellinos fuertes

Los mecanismos de estabilización se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales, que de acuerdo a su diseño se usan en quemadores para sólidos, líquidos y gases. Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta hoy no dan solución a los combustibles como la biomasa sólida pulverizada, que por sus características de baja densidad y pequeñas dimensiones, resulta muy difícil lograr su retención para garantizar el anclaje de la llama en la ZRI.

Con las investigaciones realizadas por Rodríguez Arias A. D. y Xristich V. A. en 1988, se dieron los primeros pasos para el desarrollo de la tecnología aerodinámica de las secciones de paso en rotación [Rodríguez, 1988; Rodríguez y Ponce, 2017] que en principio se basa en una estructura de dos conos concéntricos unidos por álabes

Tabla 4 Poder calorífico y volúmenes teóricos de aire y gases durante el proceso de combustión de la masa de trabajo. (Fuente: [Rodríguez *et al.*, 2000])

Residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa.										
Residuo	Poder calorífico inferior de la masa de trabajo		Poder calorífico superior de la masa de trabajo		Volumen teórico de aire y de los gases productos de la combustión (m <sup>3</sup> N/kg)					
	kcal/kg	KJ/kg	kcal/kg	KJ/kg	V <sub>Aire</sub>	V <sub>RO2</sub>	V <sub>N2</sub>	V <sub>gs</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>g</sub>
Meollo	1567	6555	2012	8420	1,94	0,39	1,53	1,93	1,02	2,95
Bagazo	1758	7358	2196	9191	2,12	0,44	1,68	2,11	1,01	3,12
RAC	3142	13 160	3478	14 564	3,34	2,64	3,34	0,81	4,15	3,15

(Fig. 1), 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 ZRI con características especiales. Los estabilizadores concéntricos con su eje, como es el caso de los conos simples, han sido cuidadosamente estudiados [Butovski *et al.*,1982; Abramovich, 1984]. El estabilizador de doble cono, como se ha señalado, se diferencia de los clásicos o convencionales en que gira alrededor de su propio eje y desarrolla una admisión de aire en la zona de recirculación. Anterior a estas investigaciones en la literatura no aparecen informaciones sobre este tipo de estructura aerodinámica.



Fig. 1. Dispositivo estabilizador de doble cono. (Fuente [Rodríguez, 1988]).

En la Fig. 2 se presenta la ZRI creada detrás del estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC), donde se puede observar como característica principal que la velocidad de reverso es muy baja, nunca superior a 2,5 m/s sobre el eje de giro del dispositivo.

Cuando el ERDC está sin girar la velocidad de aire primario alcanza un valor de  $W_1 = 1.09$  m/s, para una razón relativa de la velocidad de reverso equivalente a  $W_r^{max.}/W_1 = 2.45$ , lo cual está muy por encima de los valores relativos de los estabilizadores de formas clásicas, (0,3 a 0,4) [Butovski *et al.*,1982; Abramovich, 1984; Butovski y Jristich, 1972].

Luego se pudo comprobar que la rotación a 200 rad/s del ERDC, con  $W_{II} = 40$  m/s(constante), incrementa la relación  $W_1/W_{II}$  de 2,7 a 5,2 %, reduciendo la razón relativa de la velocidad de reverso a valores cercanos a la unidad ( $W_r^{max.}/W_1 = 0.96$ ). Estos resultados muestran que el incremento de la velocidad del aire primario, debido a la rotación del dispositivo no provoca incrementos en la velo-

cidad de reverso, y que la intensidad de la velocidad de reverso está determinada por la interacción combinada de las dos corrientes que salen del doble cono  $W_1$  y  $W_{II}$  [Rodríguez, 1988]. Como resultado de la influencia conjunta del giro con el incremento de la velocidad del aire primario, tiene lugar un incremento de las dimensiones relativas<sup>1</sup> de la ZRI y

$$(l_{rec}^{rel.} \text{ hasta } 1,4 \text{ y } d_{rec}^{rel.max.} \text{ hasta } 1,8).$$

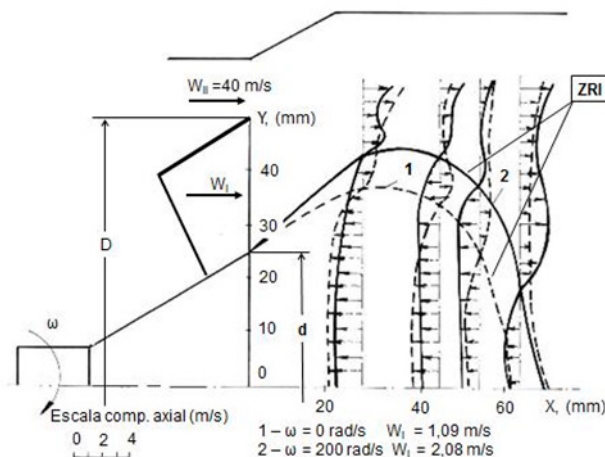


Fig. 2. Perfil de la componente axial de la velocidad detrás del estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC). (Fuente: [Rodríguez, 1988]).

El nuevo mecanismo aerodinámico genera un torbellino medio ( $S = 0,33$ ) [Rodríguez, 1988; Rosabal, 2006] 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. Como se explicó anteriormente, 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. La ZRI en la estructura del doble cono presenta un flujo mássico reverso normalizado de 0,19 [Rosabal, 2006], lo que se considera adecuado para el flujo reverso establecido y está en correspondencia con los resultados de las investigaciones de [Weber y Dugue, 1992; Vanoverberghe *et al.*,2001].

En la Fig. 3 se presenta el esquema del quemador que fue diseñado como resultado de las investigaciones aerodinámicas antes expuestas. En el esquema se puede observar el mecanismo de auto-alimentación del combustible, basado en el enrarecimiento que tiene lugar en el espacio anular denominado difusor, por donde pasa la corriente principal de aire primario. El volumen de aire primario total es la suma del aire que pasa a través del difusor, más el aire de arrastre.

$$l_{rec}^{rel.} = l_{rec.}/d \text{ y } d_{rec}^{rel.max.} = d_{rec.}/d$$

La precámara del quemador rotatorio de doble cono es el espacio donde tiene lugar el desarrollo del proceso de combustión, jugando un importante rol en el mezclado y en el proceso de estabilización de la reacción.

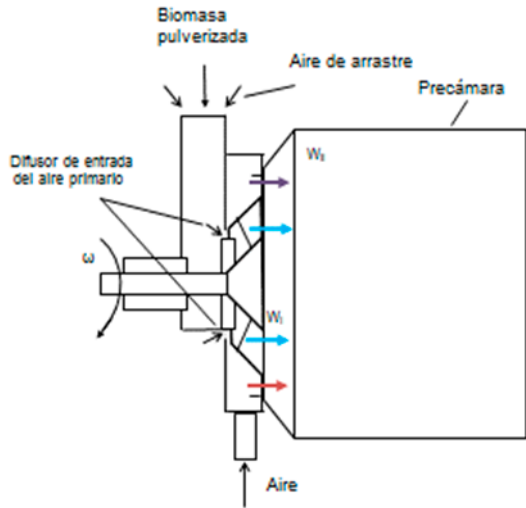


Fig. 3. Esquema del quemador desarrollado a partir del ERDC. (Fuente: [Rodríguez, 1988; Rodríguez *et al.*, 2000]).

La primera aplicación del trabajo se realizó en la fábrica de tableros de bagazo del municipio de Cruces, en Cienfuegos en 1987 (Fig. 4) y la instalación fue diseñada para quemar todo el meollo que se generaba en la producción; hay que destacar que en esta instalación la humedad del meollo alcanzaba valores entre 4 y 6 %. En la Fig. 5A aparece una vista del interior del quemador con el ERDC y la precámara, y en la Fig. 5B una imagen en la que se puede observar la definición que alcanza la llama durante el proceso de combustión del meollo pulverizado y seco sin combustible adicional.

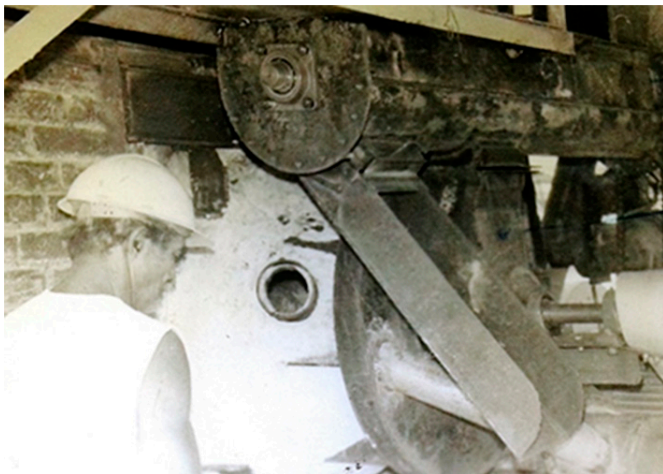


Fig. 4. Primer quemador rotatorio para meollo. Fábrica de tableros de bagazo de Cruces. (Fuente: [Rodríguez, 1988; Rodríguez 1995]).

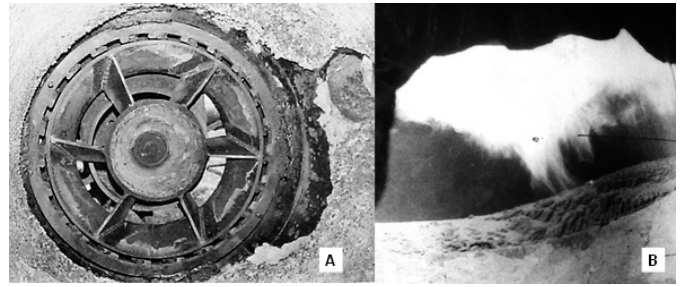


Fig. 5. Vista del ERDC y la precámara (A); llama de meollo, definición y dimensiones (B).

El meollo al salir del proceso de separación del bagazo lleva un alto contenido de humedad (aprox. 53 %), por lo que para poder utilizar esta biomasa como combustible fue necesario desarrollar un secador que está basado en el mismo principio, las secciones de paso en rotación. Al nuevo equipo se le denominó secador dinámico por ser una rueda con un doble cono que gira y permite el secado de la biomasa en pequeñas partículas. En la Fig. 6 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 del fluido de trabajo y la segunda que consta de un cono central con paletas inclinadas en su parte exterior. 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 modelo de alrededor de 5 m de largo, fue diseñado para secar 12 t/h de meollo, que entran con una humedad aproximada entre 53 y 55 % y salen con humedades entre 15 y 18 %.

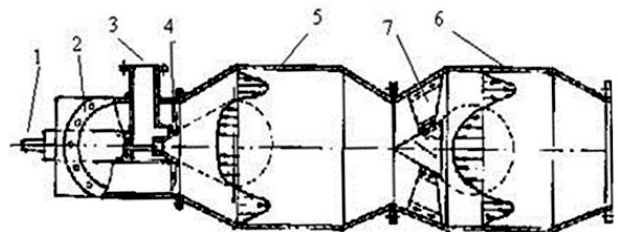


Fig. 6 Secador dinámico. (Fuente [Rodríguez y Rosabal, 2000; Rodríguez, 1997]).

1. Sistema motriz; 2. Entrada de gases; 3. Conducto de entrada del meollo; 4. ERDC especial para el secado; 5. Cámara primaria; 6. Cámara secundaria; 7. Dispositivo de retención.

En la Fig. 7 se presenta un esquema de la instalación que fue montada de forma demostrativa en una fábrica de azúcar, en una caldera de «Combustión» con una capacidad de 45 t/h de vapor [Rodríguez y Rosabal, 2017]. La caldera originalmente consumía 22 t/h de bagazo integral con 50 % de humedad y una eficiencia de 70 %.

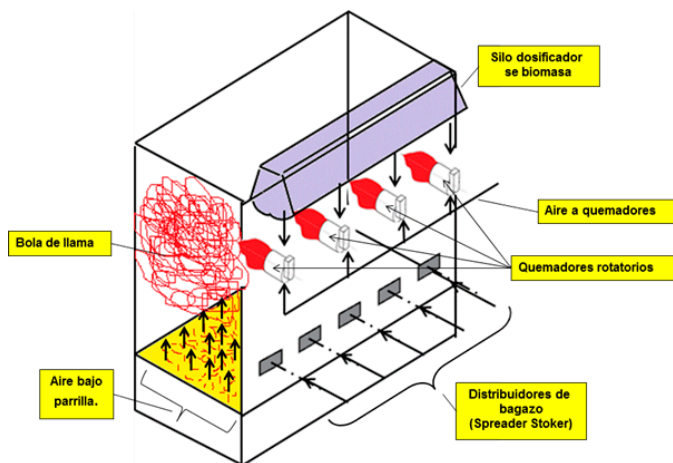


Fig. 7. Esquema de la instalación demostrativa montada en una caldera de 45 t/h de vapor.

En la parte superior del horno se instalaron cuatro quemadores de meollo de 3,5 MW<sub>t</sub> cada uno, lo que equivale a una sustitución de 31 % de la energía requerida por la caldera, la diferencia era suministrada por el bagazo con el sistema de quema en parrilla con lanzador.

El consumo de combustible fue de 3,43 t/h de meollo con 17 % de humedad y 13,5 t/h de bagazo con 50 % de humedad. La eficiencia de la caldera se elevó 7 %, y el consumo aproximado de bagazo integral, disminuyó en 8,4 t/h, lo cual se corresponde con una sustitución de bagazo por meollo equivalente a 6,4 t/h, y 2 t/h de reducción de consumo por concepto de elevación de la eficiencia de la caldera.

La eficiencia de la caldera se incrementa debido a varios factores; primero, el coeficiente global de exceso de aire disminuye, ya que los quemadores trabajan con un coeficiente muy bajo (1,10–1,16) con respecto al requerido por el lecho fijo para bagazo (de 1,8 a 2,0). Por otra parte, en el caso del meollo una porción de los gases es recirculada para agotar una parte de la energía disponible en los mismos en el sistema de secado, con una marcada influencia en el incremento del poder calorífico del combustible adicional, lo que propicia estabilidad y eficiencia en la organización del proceso de combustión de los dos combustibles dentro del horno.

Esta nueva organización que se logra en el proceso de combustión en el horno, además de disminuir las pérdidas en los gases de salida, reduce los inquemados, por el cierre de las llamas en la parte superior del horno, lo que da lugar a un alto agotamiento de los elementos combustibles contenidos en los gases productos de la combustión del bagazo. Cuando el sistema combinado de quema está en operación es posible reducir el exceso de aire en la parrilla hasta los valores mínimos que limitan la estabilidad en este tipo de calderas ( $\alpha=1,4-1,5$ ).

El sistema de parrilla está diseñado para asegurar la combustión de la masa de combustible requerida para alcanzar la carga máxima de la caldera, que en este caso equivale aproximadamente a 22 t/h de bagazo, con una velocidad en la entrada de aire por la parrilla que asegura la combustión estable del mismo. Al reducir el suministro de combustible a 13 o 14 t/h, aunque se regule el exceso de

aire, hay un sobredimensionamiento de la parrilla para las nuevas condiciones que puede ser mejorado si se realizan modificaciones en el diseño.

Estudios teóricos recientes [Carrasco *et al.*,2018] para evaluar la aplicación de esta tecnología a una caldera Retal de 45 t/h de vapor, durante su operación con bagazo integral en la parrilla y RAC pulverizado (en quemadores rotatorios), revelan las ventajas que ofrece la nueva tecnología. En este estudio solo se evaluó el incremento de eficiencia por concepto de reducción del exceso de aire cuando se utilizan quemadores. En la Fig. 8 se puede observar la reducción que experimenta la temperatura de los gases de salida, a medida que se incrementa la sustitución de la energía base por el combustible adicional, lo que a su vez conduce al incremento de la eficiencia.

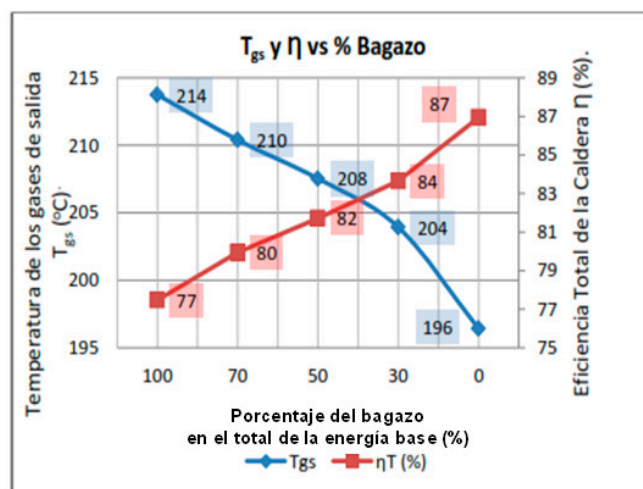


Fig. 8. Comportamiento de la eficiencia de la caldera para diferentes porcentajes de la energía base, utilizando RAC como combustible adicional (15 % W), para coeficientes de exceso de aire: en los quemadores  $\alpha = 1,10$  y en la parrilla  $\alpha = 1,8$  (Fuente: [Carrasco *et al.*,2018]).

Una fase superior de aplicación de la tecnología pudiera ser en la producción de electricidad en las nuevas bioeléctricas que se proyectan en el país, con la sustitución parcial o total del bagazo integral por bagazo pulverizado seco y la incorporación de otras biomásas sólidas disponibles en el país para el periodo de no zafra, siempre con preparación previa (molida, secado y compactación para su transportación eficiente).

#### IV. Conclusiones

El uso de quemadores en las calderas de bagazo, sustituyendo un porcentaje de la energía base, permitiría un incremento significativo de los niveles de eficiencia de estas instalaciones y sería el primer paso para la sustitución de los lechos fijos, por sistemas de combustibles pulverizados, utilizando como combustible diferentes biomásas con preparación previa.

La combustión pulverizada en la industria azucarera permitiría el diseño de calderas más compactas y eficientes que las existentes en la actualidad.

Los sistemas de combustión pulverizada son una opción promisoriosa para el futuro de la producción de electricidad con biomasa sólida.

## V. Recomendaciones

Continuar el desarrollo de la tecnología y su implementación industrial.

## VI. Bibliografía

- ABRAMOVICH, L. S. (1984). *Teoría de las corrientes turbulentas*. M.: Ciencia 1984. 716 pág.
- ATCHISON, J. E. (1980). «The fuel value of bagasse pith and developments in pith burning at leading bagasse pulp and paper mills and/or sugar mills». *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 17, 2515-2532
- ATCHISON, J. E. (1971). «Review of modern methods of bagasse depithing». *Proceed. ISSCT*, 14: 1202-1217.
- BOYD, R. K., J. H. KENT (1986). «Three-dimensional furnace computer modelling». *Proceedings of the Combustion Institute* 21, 265-274.
- BUTOVSKI L. S., J. RISTICH V. A., Y OTROS (1982). «Algunas particularidades de la combustión en la ZRI detrás del estabilizador». *IsvestiaVusov. Serie Energética* 1982. No 1 – pag.105 – 109.
- BUTOVSKI L. S.; V. A. J. RISTICH (1972). «Estructura de la zona de mezcla y caracterización de la quema de gas en la llama, detrás del estabilizador. Teoría y práctica de la quema de gas». L Nedra, 1972. 76 – 82.
- CARRASCO GARCÍA, SERGIO YANIEL, A. D. RODRÍGUEZ ARIAS, EDUARDO BASTIDA LÓPEZ, REINIER JIMÉNEZ BORGES (2018). «Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomasa a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal». Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Cienfuegos, 2018.
- COLECTIVO DE AUTORES BAJO LA DIRECCIÓN DE LUIS O. GÁLVEZ TAUPIER (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. ICIDCA 2000. 458 pág.
- DIXON, T. F. (1984). «Preliminary measurements in the flame region of a bagasse fired Boiler». *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 6, 165-171.
- EYERUSALEM BIRRU, ANDREW MARTIN; CATERINA ERLICH (2016). «Sugar cane industry overview, and Energy Efficiency Considerations. KTH School of Industrial Engineering and Management». Department of Energy Technology. Division of Heat and Power Technology. SE – 100 44 Stockholm 2016, p 61.
- GIERTZ H. W.; R. S. VARMA (1979). «Studies on the pulping of bagasse and the influence of pith on paper properties». In 'Non-wood plant fiber pulping progress report'. pp. 53-69. (Tappi Press: Atlanta).
- ISSERLÍN, A. S. (1987). *Fundamentos de la combustión de los combustibles gaseosos*. Leningrado. Editorial Nedra.
- LOIS, J. A.; R. SUÁREZ Y O.L. GARCÍA (1980). «Some aspects of depithing and storage of Bagasse in Cuba». *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 2462-2471.
- LUO, M.; B. R. STANMORE, T. F. DIXON (1993). «A thermal survey of a bagasse fired boiler». *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 15, 108-118.
- MANN, A. P.; I. M. O'HARA (2012). «Predicting the effects of bagasse depithing operations on boiler combustion performance». Queensland University of Technology 2012.
- O'HARA I. M.; A. P. MANN, T. J. RAINEY, C. M. BAKIR, P. A. HOBSON, T. W. FARRELL (2011). «Reducing the economic and environmental risks of large scale bagasse storage through depithing». SRDC final report QUT039.
- PATURAU, J. M. (1989). *By-Products of Sugar Cane Industry*, 3rd ed., Elsevier, Amsterdam, 1989.
- PAUL, S. K. AND K. S. KASI VISWANATHAN (1998). «Influence of pith on bagasse pulp, paper and black liquor properties». *IPPTA Journal*. 10, 1-8 (1998).
- POMERANSEV, V. V. (1983). *Manual de problemas de teoría de la combustión*. Leningrado: Editorial Energoatomizdat.
- RAINEY, T. J. (2009). «A study into the permeability and compressibility properties of Australian bagasse pulp». PhD Thesis. Queensland University of Technology, Faculty of Built Environment and Engineering, Brisbane.
- RAINEY, T. J.; DOHERTY WOS, R. J. BROWN, D. M. MARTINEZ Y N. A. KELSON (2009). «An experimental study of Australian sugarcane bagasse pulp permeability». *Appita Journal* 62, 4 296-302.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. (1988). «Quemador Rotatorio con autosucción del aire primario para la quema de meollo». Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Kiev 1988 – 142 pág.
- 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 1995.
- 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 1997.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D. Y OTROS (1994). «Siló dosificador para sólidos pulverizados». Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22488 Cuba 1994.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D.; L. B. ROSABAL PONCE (2001). «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.; L. B. ROSABAL PONCE (2017). «Tecnología de las Secciones de Paso en Rotación para la Quema Eficiente del Meollo en las Calderas de Bagazo». *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. Vol. 7, No. 3, Año 2017.
- RODRÍGUEZ ARIAS, A. D.; L. B. ROSABAL PONCE Y P. B. MARTÍNEZ DE VILLIER (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*. La Habana: Ed. Academia, 453 pág.
- 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 de Cienfuegos.
- VANOVERBERGHE, K. (2004). «Flow, turbulence and combustion of premixed swirling jet flames». In *Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven Belgium*.
- VANOVERBERGHE, K.P.; E. V. VAN DEN BULCK, W. A. HUBNER AND M. J. TUMMERS (2001). «Multi-Flame Patterns in Swirl Driven Partially Premixed Natural Gas Combustion». ASME, FACT Division International Joint Power Generation Conference, JPG-C2001=FACT-19055, pp. 1–8, New Orleans, LA, 4–7 June.
- WEBER, R. and J. DUGUE (1992). «Combustion accelerated swirling flows in high confinements». *Prog. Energy Combust. Sci.*, 18, 349–367.
- WOODFIELD, P. L.; J. H. KENT, T. F. DIXON (1997). «Temperature measurements in a bagasse fired furnace-experimental and numerical results». *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 19, 473-478.
- YEGIAN, D.T. and R.K. CHENG (1996). «Development of a vane-swirler for use in a low NOx weak-swirl burner». Energy and Environment Division. Lawrence Berkeley National Laboratory: USA.