

TECNOLOGÍA DE LAS SECCIONES DE PASO EN ROTACIÓN PARA LA QUEMA EFICIENTE DEL MEOLLO EN LAS CALDERAS DE BAGAZO

Abelardo Daniel Rodríguez Arias, Liz Belkis Rosabal Ponce

RESUMEN

El desmedulado o retiro de las partículas más pequeñas del bagazo es una parte esencial en el proceso de producción de los subproductos del bagazo como la pulpa y el papel. Incluir el desmedulado en las operaciones de la fábrica de azúcar vincula los beneficios económicos con los ambientales. Sin embargo, las investigaciones en cuanto a los efectos del desmedulado sobre las operaciones en las calderas de la fábrica de azúcar han sido muy limitadas. Las investigaciones realizadas hasta el momento demuestran que la quema del meollo en caldera es muy inestable debido a las bajas temperaturas, lo que trae consigo explosiones por el desprendimiento de materia volátil. Los mejores resultados se han logrado cuando se quema en mezcla con el bagazo, en proporciones aproximadas de 88% de bagazo con 11% de meollo, con una reducción en la eficiencia de caldera y un incremento en el consumo de combustible [1]

En el presente trabajo se describen los resultados de las investigaciones realizadas para lograr la combustión eficiente de las partículas de meollo en llama independiente, con una aplicación práctica de la tecnología en una caldera de bagazo de 45 t/h. El trabajo consiste en el desarrollo de un quemador y un secador, basados en un esquema aerodinámico que permite el arrastre y la retención de las pequeñas partículas en la huella turbulenta de un estabilizador rotatorio. El meollo que sale del secador con humedad entre 15 y 20%, pasa a través del estabilizador a la cámara donde se desarrolla la combustión en llama sin combustible adicional.

Palabras clave: Meollo, quemador, estabilizador.

Technology of the step sections in rotation for the efficient burning of the core in the bagasse boilers

ABSTRACT

The removal of the smallest particles of bagasse is an essential part in the production process of bagasse byproducts such as pulp and paper. Including this action in the operations of the sugar factory links the economic benefits with the environmental ones. However, the investigations regarding the effects of the removal of small particles on the operations in the boilers of the sugar factory have been very limited.

The investigations carried out until now show that the burning of the kernel in the boiler is very unstable due to the low temperatures, which brings with it explosions due to the

release of volatile matter. The best results have been achieved when burning in mixture with bagasse, in approximate proportions of 88% bagasse with 11% kernel, with a reduction in boiler efficiency and an increase in fuel consumption [1]

In the present work the results of the investigations carried out to achieve the efficient combustion of the particles of kernel in an independent flame are described, with a practical application of the technology in a bagasse boiler of 45 t / h. The work consists of the development of a burner and a dryer, based on an aerodynamic scheme that allows the drag and retention of small particles in the turbulent footprint of a rotating stabilizer. The core that comes out of the dryer with humidity between 15 and 20%, passes through the stabilizer to the chamber where flame combustion takes place without additional fuel.

Keywords: *Core, burner, stabilizer.*

Introducción

La diversificación debe convertir a la industria azucarera, en una industria más rentable y recuperativa. Las plantas de derivados ubicadas cerca de las fábricas de azúcar tienen ventajas, como el acceso al vapor barato, a la electricidad y a la materia prima (bagazo). La producción del papel y la pulpa de bagazo, adjuntas a las fábricas de azúcar pudieran reducir los altos costos del capital inicial de estas instalaciones. La operación del desmedulado afecta la cantidad del combustible disponible para enviar a la estación de calderas, por lo que se hace necesario realizar la ingeniería básica para el cambio de combustible (fuel switching), ya que el déficit de bagazo debe ser sustituido por combustibles con otras características como el meollo, la paja de la caña u otros.

Antecedentes

Durante muchos años el meollo ha sido quemado en combinación con otros combustibles como, el bagazo integral, el fuel-oil, gas natural y carbón. 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 [2].

La mayoría de las investigaciones han encontrado que el meollo tiene mayor contenido de ceniza y humedad que el bagazo integral [3, 4], 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 de este [5].

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 y fluido dinámica computacional (CFD) [6, 7]. Estas pruebas se realizaron con el objetivo de predecir los efectos del meollo y del bagazo desmedulado en cuanto a rendimiento, la quema combinada del bagazo con meollo, el consumo de combustible y el comportamiento de la combustión en calderas típicas

de una fábrica de azúcar. Muchas calderas han sido estudiadas ampliamente por muchos investigadores [8, 9, 10]. Otras pruebas más recientes 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, lo cual no es recomendado. Los mejores resultados se obtienen, 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 [1].

Desarrollo.

El bagazo que sale del último molino del tándem, contiene entre 55 y 60 % de fibra útil, la otra fracción rica en medula 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 [11, 12, 13]. El meollo está compuesto de una fina pared de células de parénquima [14] más bien cuadrada, es decir con una baja relación de aspecto, que se caracteriza por tener una longitud máxima en el orden de 520 μm . [15] y un diámetro promedio de 140 μm . [16].

Los equipos que se utilizan para separar el meollo del bagazo integral son los desmeduladores. Estos están típicamente compuestos de martillos rectos montados sobre un eje vertical que gira a velocidades entre 1000 y 1800 rpm. Los martillos golpean el bagazo integral y separan la fibra del meollo, este último sale por fuerza centrífuga, a través de una malla ubicada alrededor de los martillos. La fibra y el meollo al salir se envían a los diferentes destinos con la ayuda de bandas transportadoras. Otros diseños de desmeduladores más antiguos, como el Horkel [17] o el SPM [18] disponían de rotores horizontales.

En Cuba la mayor experiencia fue con desmeduladores de rotor horizontal, con alimentación forzada, con una capacidad instalada a nivel de país de 1200 BDMT¹/día de bagazo integral, para desmedulado húmedo y un rango de separación de 30 - 35 % [19] En la Fig. 1 se presenta el desmedulador vertical cubano, modelo S.M. Caribe – 1150, según [20], estos equipos han sido evaluados en el "Proyecto Cuba 9" con resultados satisfactorios.

El uso del meollo como combustible no ha sido lo suficientemente estudiado. 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 [2]. Esto se debe fundamentalmente a las características físicas de la partícula de meollo, su pequeño tamaño, baja densidad y el alto contenido de humedad. Para tener una idea aproximada de la composición granulométrica del meollo se presenta la

Tabla 1 [21], donde aparecen los resultados de una investigación realizada en la Universidad de Queensland sobre los riesgos ambientales que pueden provocar enfermedades profesionales por las emisiones de polvo de las operaciones de desmedulado en las fábricas de azúcar. Las mediciones fueron realizadas con un

¹ BDMT – Bone Dry Metric Ton (Tonelada métrica totalmente seca)

medidor láser de partículas, para determinar el tamaño y la distribución de la muestra de meollo, y con mallas para determinar el tamaño y la distribución de la muestra de bagazo integral. La distribución por tamaño fue determinada en base al diámetro equivalente d_{eq}^2 .

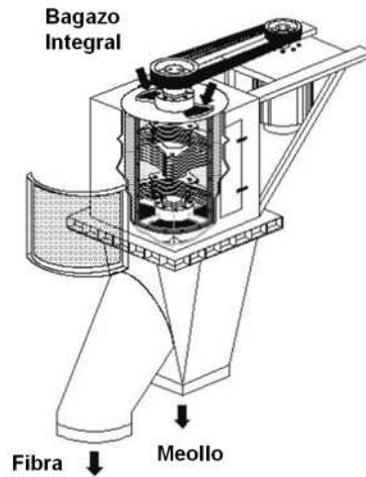


Fig. 1 Desmedulador cubano S.M. Caribe 1150. (Fuente [20])

Como se puede observar más de 50 % de las partículas de meollo alcanzan un d_{eq} entre 100 y 500 μm y solo 5 % entran en el rango de 1000 a 5000 μm , el resto tiene dimensiones inferiores.

Tabla 1 Fracción de masa (%) asociado con cada rango de tamaño para, bagazo integral, meollo y bagazo desmedulado. Tamaño basado en el diámetro equivalente del volumen de una esfera (d_{eq}). (Fuente [21])

Dimensión μm	Bagazo Integral	Meollo	Bagazo Desmedulado
< 10	0,65	1,43	0,19
10 - 50	2,03	3,83	0,76
50 - 100	2,64	6,56	0,95
100 - 500	25,81	55,79	7,59
500 - 1000	32,34	27,54	44,91
1000 - 5000	34,78	4,85	43,29
5000 - 10000	1,65	0,00	2,19
> 10000	0,1	0,00	0,12

Por las dimensiones del meollo, el método más apropiado para su combustión después de un secado previo sería la quema en llama del mismo, sin embargo, los dispositivos aerodinámicos actuales que se utilizan con este fin, no retienen partículas

$$d_{eq}^2 = \sqrt[3]{\frac{3}{2} d^2 l}$$

tan pequeñas y con tan baja densidad por lo que sería necesario mantener un piloto con un combustible adicional.

La composición elemental en base seca del meollo, el bagazo y los RACs se presenta en la

Tabla 2, según [4]. Como se puede observar en estas condiciones, el bagazo es el de mayor concentración de carbono y menor contenido de ceniza. Luego entre los RAC y el meollo, la mayor diferencia está dada por el contenido de ceniza, que es 12 % superior en los RAC que en meollo.

Tabla 2 Composición elemental en base seca del meollo, bagazo y los RAC.
(Fuente [4])

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

A la hora de quemarlos sin preparación previa, cada uno de ellos va a presentar un comportamiento que va a depender principalmente del contenido de humedad. En la Tabla 3 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 ó 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 4 .

Tabla 3 Análisis inmediato de la masa de trabajo del meollo, bagazo y RAC.
(Fuente [4])

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 4 Composición elemental de la masa de trabajo del meollo, bagazo y RAC. (Fuente [4])

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

En la

Tabla 5, 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 de cada uno de ellos [4].

Tabla 5 Poder calorífico y volúmenes teóricos de aire y gases durante el proceso de combustión de la masa de trabajo. (Fuente [4]).

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 (m³N/kg)					
	kcal/kg	KJ/kg	kcal/kg	KJ/kg	V_{Aire}	V_{RO2}	V_{N2}	V_{gs}	V_{H2O}	V_g
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	13160	3478	14564	3,34	2,64	3,34	0,81	4,15	3,15

Las características equivalentes de los combustibles sólidos, son la relación que existe entre la humedad y el contenido de ceniza con su poder calorífico inferior (

Tabla 6). Basado en esta relación los combustibles sólidos se pueden clasificar:

1. De acuerdo al contenido de humedad.
 - Seco, si $W^E < 0.7$ %kg/MJ
 - Alto contenido de humedad, si $W^E > 5$ %kg/MJ
2. De acuerdo al contenido de ceniza:
 - Bajo contenido de ceniza, si $A^E < 0.95$ %kg/MJ
 - Alto contenido de ceniza, si $A^E > 4$ %kg/MJ

Tabla 6 Características equivalentes del meollo. (Fuente [4])

Características equivalentes del meollo (%kg/MJ).		
Humedad de trabajo W^t	Ceniza Equivalente A^E	Humedad Equivalente W^E
0	0,311	0,000
10	0,315	0,699
15	0,317	1,119
20	0,323	1,613
25	0,326	2,174
30	0,331	2,833
35	0,336	3,623
40	0,344	4,582
45	0,353	5,769
53	0,372	8,386
55	0,378	9,244

Como se puede observar en la

Tabla 6, el meollo cuando sale del proceso de desmedulado es un combustible de bajo contenido de ceniza y alto contenido de humedad. De este modo queda claro

que, para lograr la combustión en llama del meollo, se requiere reducir el contenido de humedad hasta valores que permitan que la reacción pueda realizarse en el tiempo que dure su paso por la zona de alta temperatura de la llama.

Estabilidad o anclaje de las llamas

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 [4, 22, 23] 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. Lo anterior unido al uso de reactivos premezclados en las antecámaras, proporciona uno de los métodos más innovadores para la reducción de partículas de alto efecto invernadero, como los óxidos de nitrógeno.

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 flujo axial dividido por el radio del quemador.

$$S = \frac{\int_{r_i}^{r_o} 2\pi\rho u v r^2 dr}{r_o \int_{r_i}^{r_o} 2\pi r (p + \rho u^2) dr}$$

Dónde: u y v son las componentes axial y tangencial de la velocidad en el radio r ; p es el gradiente de presión estática y r_i y r_o , corresponden al radio interior y exterior de la corriente de aire de combustión. Sin embargo como el grado de torbellino requiere del conocimiento de los perfiles de velocidad y presión estática a la salida del quemador, para simplificar los cálculos, se utilizó el grado de torbellino alternativo S' , que se define sólo a partir de las componentes medias axial y tangencial de la velocidad [24, 25].

$$S' = \frac{\int_0^R \rho u w r^2 dr}{R \int_0^R \rho u^2 r dr}$$

Donde: u y w son las componentes axial y tangencial de la velocidad respectivamente, ρ es la densidad y R el radio de la boca del quemador. Para el cálculo se utilizarán los valores medios de las componentes axial y tangencial de la velocidad que fueron obtenidos experimentalmente. Según [26, 27] los flujos en torbellino pueden clasificarse en débiles ($S < 0.3$), medios o moderados ($0.3 < S <$

0.6) y fuertes que son 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 ($0,6 < S < 1$)

Los flujos giratorios han sido estudiados cuidadosamente en diversas aplicaciones en cámaras de combustión y quemadores [28, 29, 30, 31] haciendo énfasis en sus características tridimensionales para asegurar la estabilidad e incrementar el tiempo de residencia de las partículas activas y los productos de la combustión. Además, en los diseños modernos se trata de obtener llamas de menor temperatura para reducir las reacciones de Zeldovich y por consiguiente reducir las emisiones de NO_x térmico [32].

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 sólidos como el meollo, 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. El generador de torbellino (GT) más ampliamente utilizado en el diseño de quemadores es el axial con álabes a 45° (Fig. 2), que asegura una alta estabilidad en un amplio rango de velocidad en la corriente. Según [33] la componente axial reversa de la velocidad en estos dispositivos alcanza valores entre -8 y $-10,5$ m/s lo que es muy ventajoso para el diseño de quemadores con combustibles de densidad media y alta.

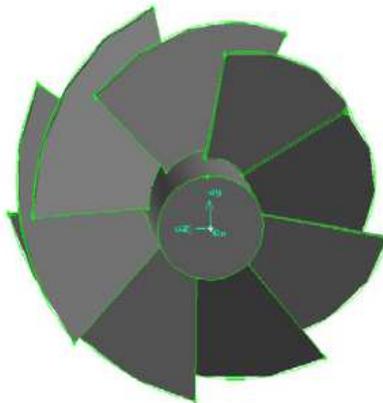


Fig. 2 Generador de torbellino axial de ocho álabes a 45° . [Fuente 33]

Tecnología de las secciones de paso en rotación

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 el meollo, sin necesidad de combustible adicional [2].

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, 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 ZRI con características especiales. Como se ha expresado anteriormente la estructura de la corriente detrás de los quemadores determina la formación de la mezcla y la estabilidad de las llamas en las cámaras de los hornos. Los estabilizadores concéntricos con su eje, como es el caso de los conos, han sido cuidadosamente estudiados por [34, 35]. 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. La investigación isotérmica tuvo como objetivos:

- Determinar el grado de influencia del giro en la aerodinámica de la corriente.
- Estudiar la influencia que tiene el paso del aire primario a la ZRI, en el esquema aerodinámico.



Fig. 3 Dispositivo estabilizador de doble cono. (Fuente [2])

En la Fig. 4 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 $W_I = 1.09$ m/s, para una razón relativa de la velocidad de reverso equivalente a $W_r^{max.}/W_I = 2.45$, lo cual está muy por encima de los valores relativos de los estabilizadores de formas clásicas, (0.3 a 0.4) [34, 35, 36].

Luego se pudo comprobar que la rotación a 200 rad/s del ERDC, con $W_{II} = 40$ m/s (constante), incrementa la relación W_I/W_{II} de 2,7 a 5,2 %, reduciendo la razón relativa de la velocidad de reverso a valores cercanos a la unidad ($W_r^{max.}/W_I = 0.96$). Estos resultados muestran que el incremento de la velocidad del aire primario, debido a la rotación del dispositivo no provoca incrementos en la velocidad 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_I y W_{II} [2]. Como resultado de la influencia conjunta del giro con el incremento de la velocidad del aire primario, tiene lugar un incremento de las dimensiones relativas³ de la ZRI ($l_{rec}^{rel.}$ hasta 1,4 y $d_{rec}^{rel. max}$ hasta 1,8).

³ $l_{rec}^{rel.} = l_{rec.}/d$ y $d_{rec}^{rel. max.} = d_{rec.}/d$

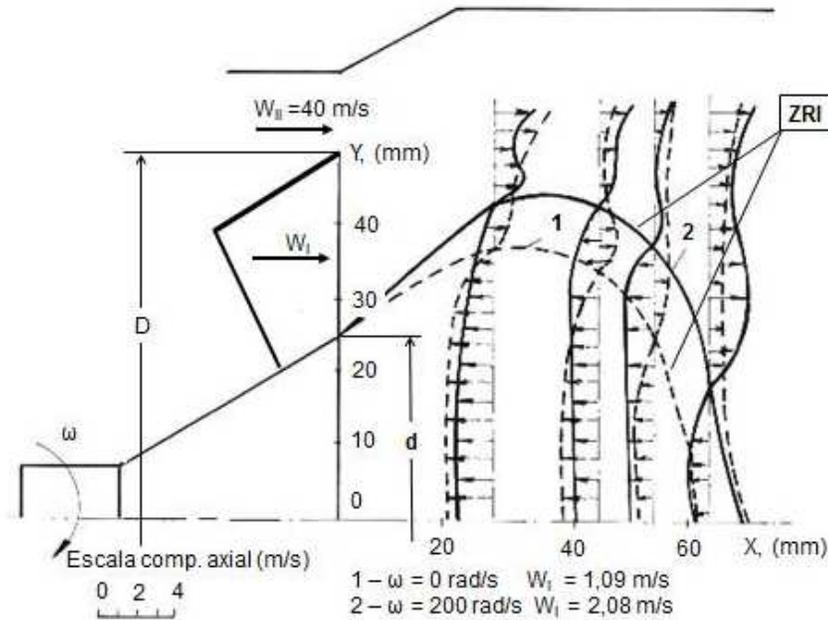


Fig. 4 Perfil de la componente axial de la velocidad detrás estabilizador rotatorio de doble cono (ERDC). (Fuente [2]).

El nuevo mecanismo aerodinámico genera un torbellino medio ($S = 0.33$) [2, 37] 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. Quedó demostrado, que la ZRI con alta estabilidad, 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.

La ZRI en la estructura del doble cono presenta un flujo másico reverso normalizado (m_r/m_0), de 0,19 [37], lo que se considera adecuado para el flujo reverso establecido y está en correspondencia con los resultados de las investigaciones de [38, 39]

El factor de caída de presión total (FCP) es un número adimensional que se define como

$$(FCP) = \frac{P_{01} - P_{02}}{\frac{1}{2} \rho U_0^2}$$

Donde P_{01} es la presión de estancamiento de entrada, que se mide en el conducto de entrada del dispositivo aerodinámico, P_{02} es la presión de estancamiento de salida, que se mide en el tramo final del conducto al salir a la atmósfera, ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 y U_0 es la velocidad media a la entrada del dispositivo (m/s). El FCP obtenido para el doble cono en las condiciones que se presentan en la Fig. 4, alcanzó un valor de 0,79.

En la Tabla 7, se presentan algunas características de los GT axiales con diferentes ángulos en los álabes y los valores de estos parámetros para el ERDC.

Tabla 7 Tabla comparativa entre el GT axial con diferentes ángulos en los álabes (Fuente [33]) y el ERDC (Fuente [2, 37])

Dispositivo estabilizador		Grado de torbellino (S)	Factor de caída de presión (FCP)	Flujo másico reverso (m_r/m_0)	$W_{rev. max.}/W_1$
Tipo	Angulo de la paleta (°)				
Axial	15	0,27	0,74	0	0
	30	0,57	2,8	0,18	0,35
	45	1	5,65	0,74	0,53
	60	1,73	15,4	0,96	0,77
ERDC	-	0,33	0,79	0,19	0,96

En las Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7, se presenta el comportamiento grafico del FCP, el flujo másico reverso y la razón relativa de la velocidad de reverso, en función del grado de torbellino para ilustrar las diferencias entre los GT axiales y el ERDC. Como se puede observar el ERDC presenta un FCP muy bajo, que lo pone en ventaja con los sistemas clásicos de estabilización de llama. Su comportamiento en cuanto al FCP es similar al axial de 15°, que como quedó demostrado en [33] no logra la formación de la ZRI.

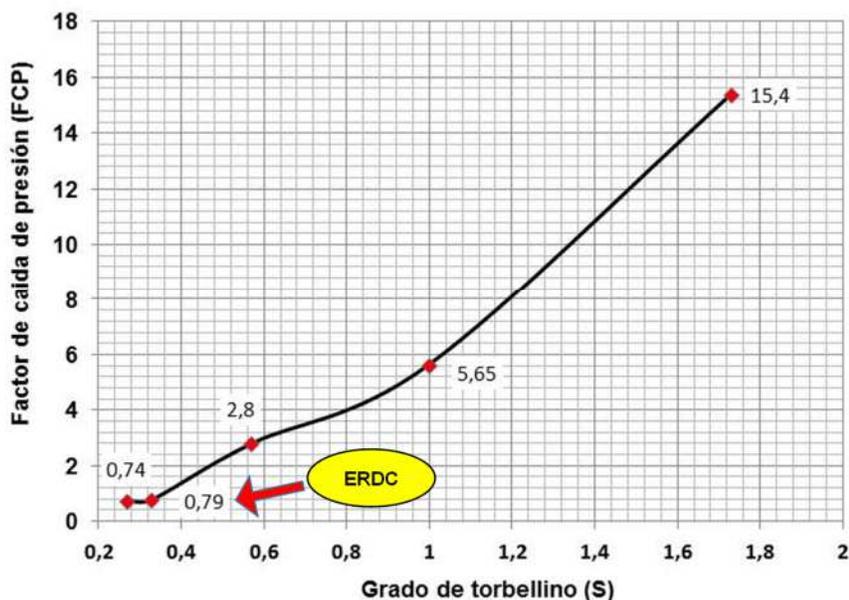


Fig. 5 Comportamiento del FCP en función de S, para los GT axiales con diferentes ángulos en el álabe, y la comparación con el ERDC.

Las investigaciones realizadas por [37], demostraron la existencia de un flujo inverso que penetra dentro de la ZRI, con gradientes relativamente fuertes en su frontera, que tienden a ser más débiles hacia el centro. Esta distribución revela un esquema

aerodinámico con baja penetración del flujo en el centro y una fuerte corriente periférica, que evidencia el escalonamiento aerodinámico que desarrolla el ERDC debido a su configuración y principio de funcionamiento. La razón máxima del flujo másico reverso, obtenida mediante el análisis de regresión poligonal, indicó el establecimiento de una región de flujo reverso de alta intensidad, demostrando que 19 % del flujo total regresa al sistema, lo cual como se expresó anteriormente coincide con los valores obtenidos por otros investigadores (Fig. 6). En la Fig. 7, se puede ver la gran diferencia que existe entre los valores de la razón relativa de la velocidad de reverso en el ERDC, con el valor relativo de los sistemas convencionales, sin embargo el valor absoluto de la velocidad de reverso del ERDC es muy inferior al de cualquier dispositivo convencional, siendo esta una de las importantes ventajas de esta tecnología aerodinámica.

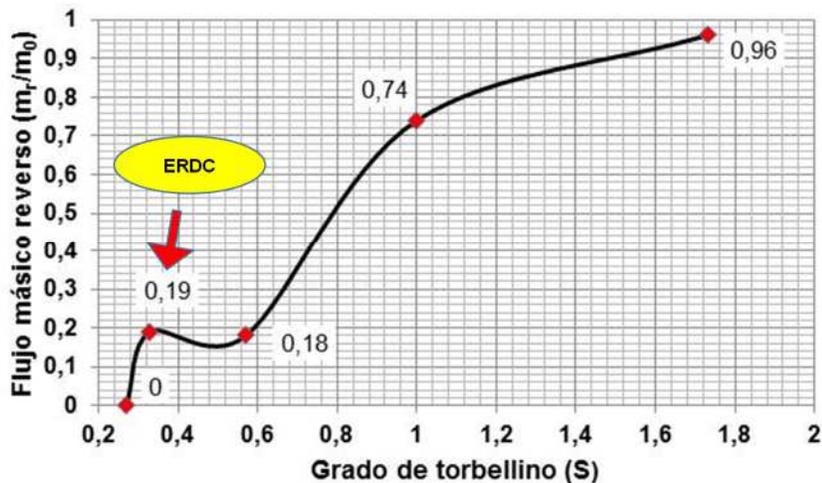


Fig. 6 Comportamiento del flujo másico reverso en función de S, para los GT axiales con diferentes ángulos en el álabe y la comparación con el ERDC.

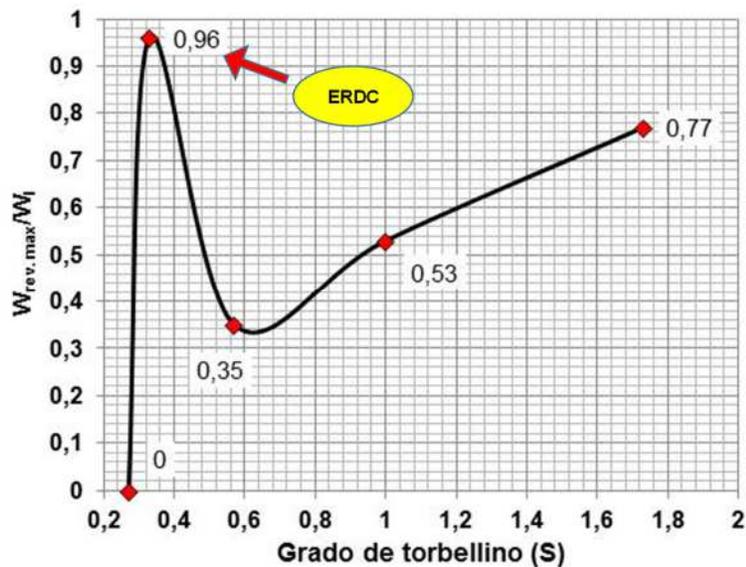


Fig. 7 Valor relativo de la velocidad de reverso en función de S, para los GT axiales con diferentes ángulos en el álabe y la comparación con el ERDC.

En la Fig. 8 se presenta un esquema del quemador donde 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.

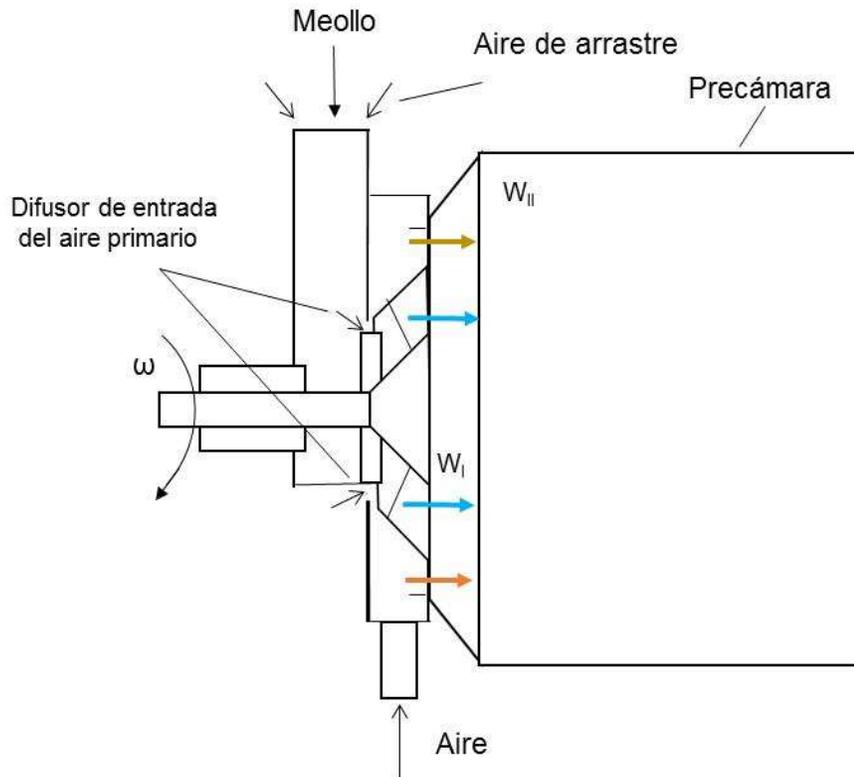


Fig. 8 Esquema del quemador desarrollado a partir del ERDC. (Fuente [2, 4])

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

El rendimiento del proceso de combustión y el estudio de emisiones de NOx fue realizado por [2], y luego corroborado y ampliado en diferentes modelos por [37] (Fig. 9, Fig. 10). El rendimiento para potencias térmicas superiores a 50 % estuvo siempre por encima de 99 %, alcanzando 99,8 % para la potencia nominal. Con respecto a los NOx se alcanzaron valores mínimos para condiciones de operación cercanas a la potencia nominal. No obstante, en todo el diapasón de regulabilidad, las concentraciones estuvieron por debajo de las normadas para quemadores de igual potencia térmica (300 mg/m³N con 3 % de O₂).

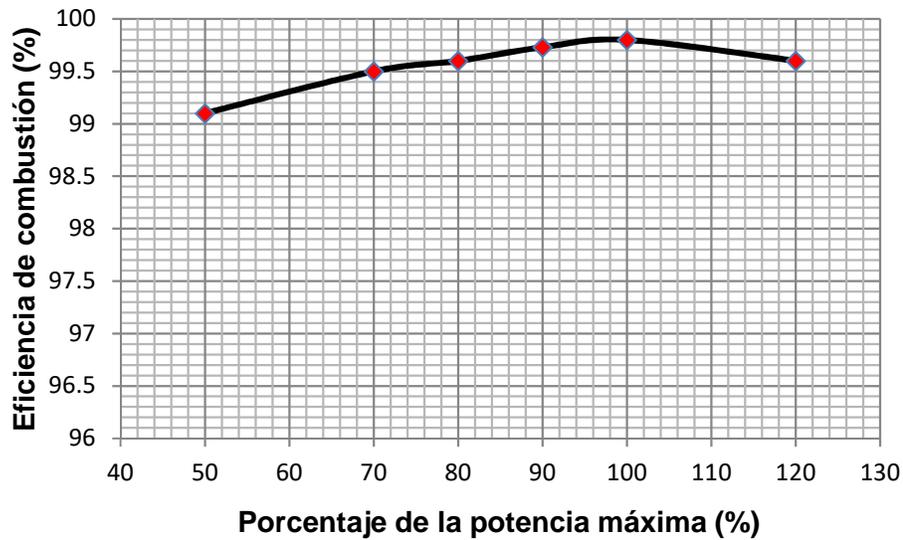


Fig. 9 Eficiencia del proceso de combustión para diferente porcentaje de la potencia nominal. (Fuente [37])

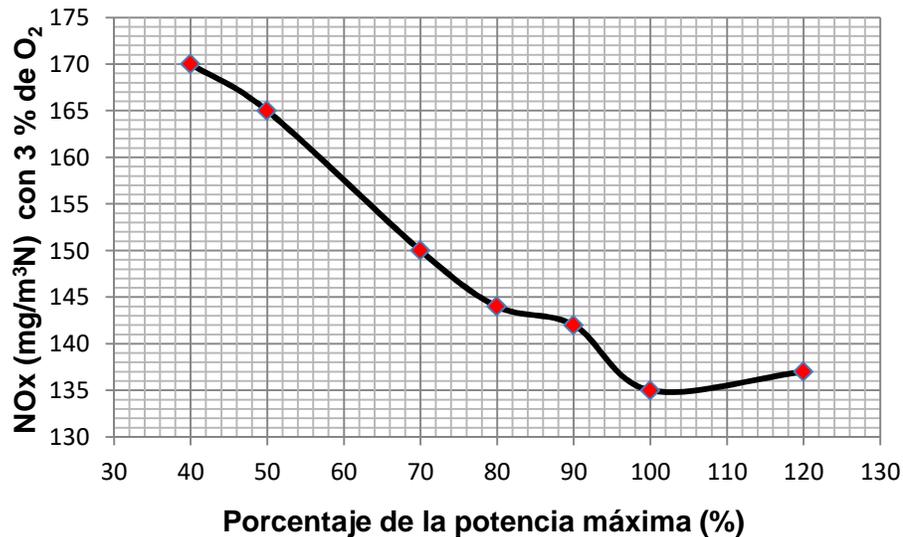


Fig. 10 Comportamiento de las emisiones de NOx para diferente porcentaje de la potencia nominal. (Fuente [37]).

La primera aplicación del trabajo, se realizó en la fábrica de tableros de bagazo del municipio de Cruces en Cienfuegos (Fig. 11), 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 10 %. En la Fig. 12A aparece una vista del interior del quemador con el ERDC y la precámara y en la Fig. 12B una imagen en la que se puede observar la definición que alcanza la llama durante el proceso de combustión del meollo sin combustible adicional.

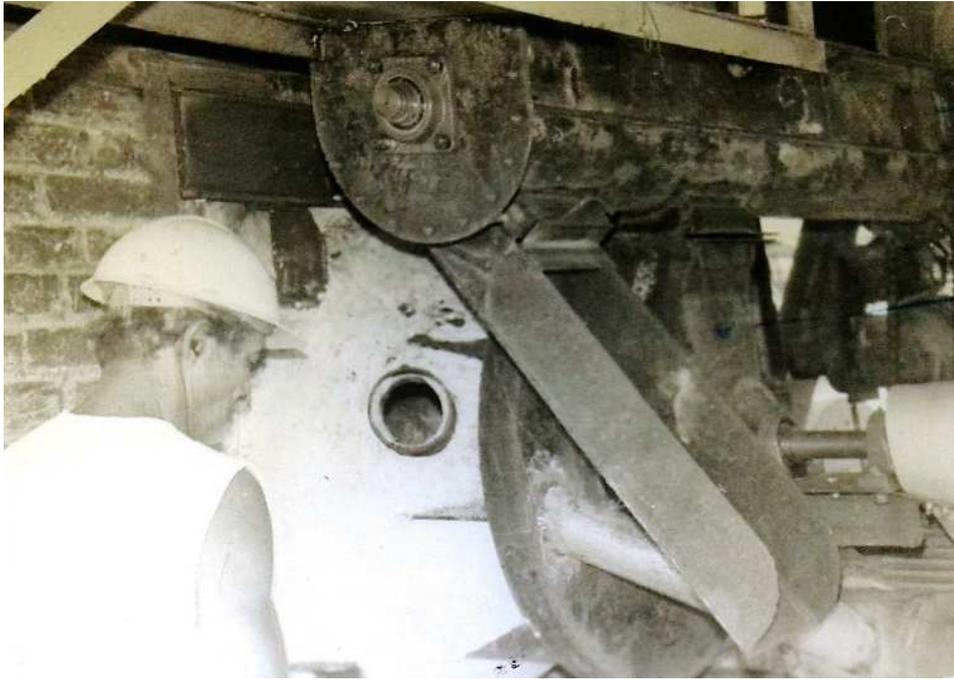


Fig. 11 Primer quemador rotatorio para meollo. Fábrica de tableros de bagazo de Cruces. Fuente [2, 40, 41].

Inicialmente el meollo se quemaba en un horno que le denominaban bazuca (Fig. 13A) y constantemente se producían explosiones, que lanzaban llama y meollo sin quemar al medio ambiente, provocando una intensa contaminación en las zonas aledañas a la fábrica.

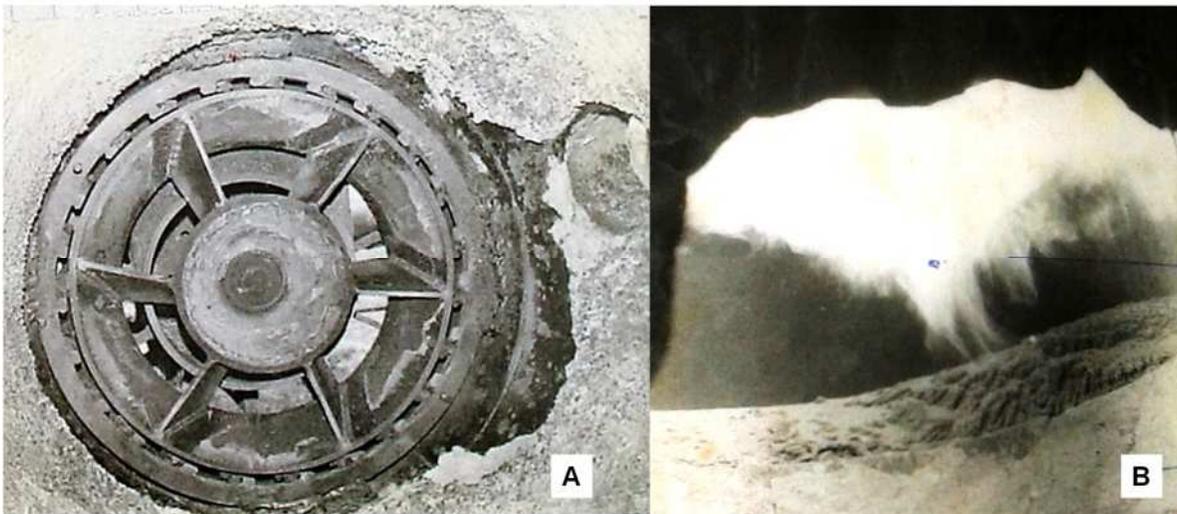


Fig. 12 Vista del ERDC y la precámara (A); llama de meollo, definición y dimensiones (B).

Antes de la bazuca se realizaron otros intentos para eliminar el meollo y se construyó un horno para la quema de este, que durante su puesta en marcha, tuvo lugar una explosión de tal magnitud que abrió las esquinas del horno y se decidió su eliminación. El quemador rotatorio fue instalado precisamente en ese mismo horno abandonado (Fig. 13B). Como se puede observar la chimenea durante el

funcionamiento del quemador se mantiene totalmente limpia y sin explosiones ni arrastres de partículas al medio ambiente. Con el quemador se logró la estabilidad del proceso de combustión y se redujo significativamente el impacto al medio ambiente.

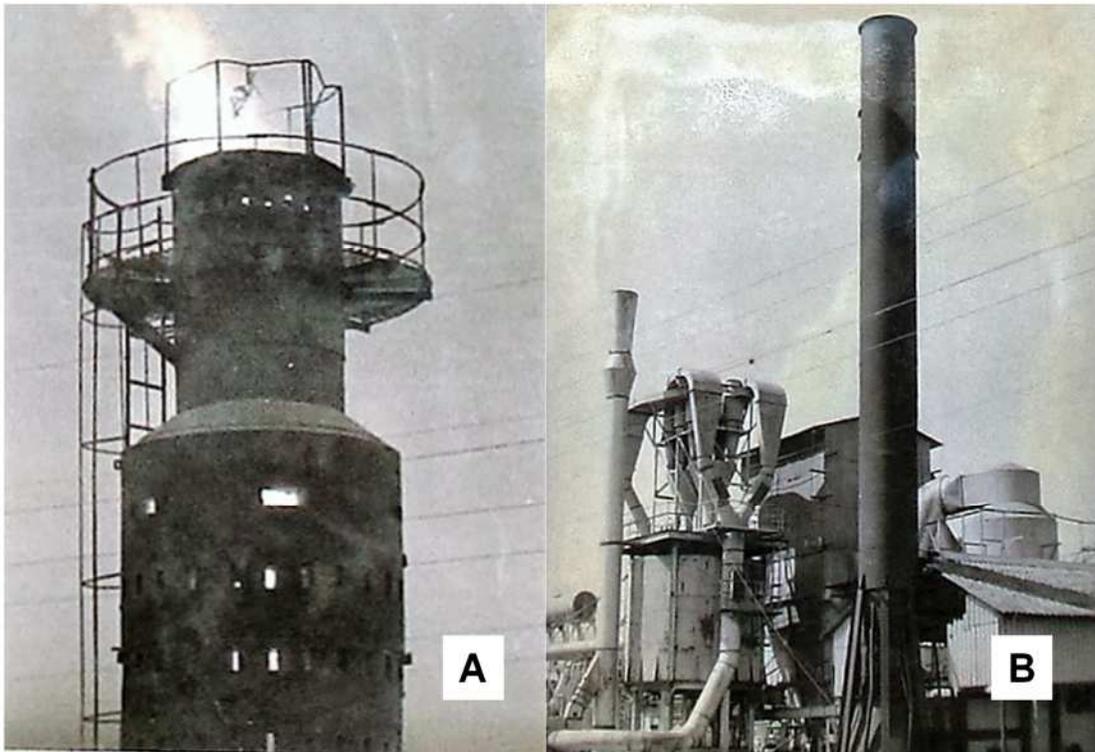


Fig. 13 Chimenea del horno (bazuca) donde se quemaba el meollo (A); Chimenea del horno donde se instaló el quemador (B). (Fuente [2])

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. 14, 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 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 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 20 %.

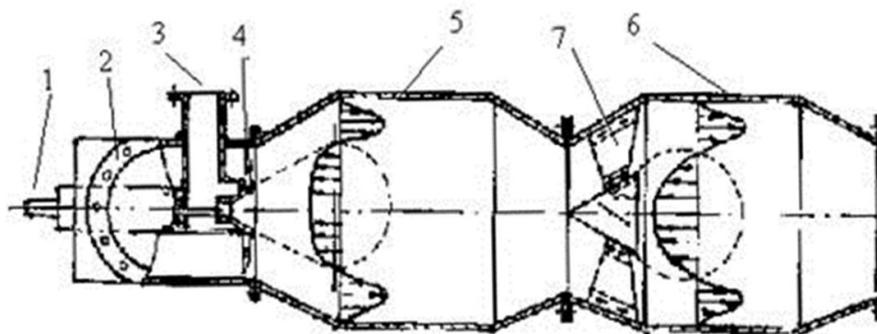


Fig. 14 Secador dinámico. (Fuente [4, 42]).

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. 15 se presenta un esquema de la instalación de la tecnología de las secciones de paso en rotación que fue montada en una caldera de 45 t/h de vapor de una fábrica de azúcar. La caldera originalmente consumía 22 t/h de bagazo integral con 50 % de humedad con una eficiencia de 70 %.

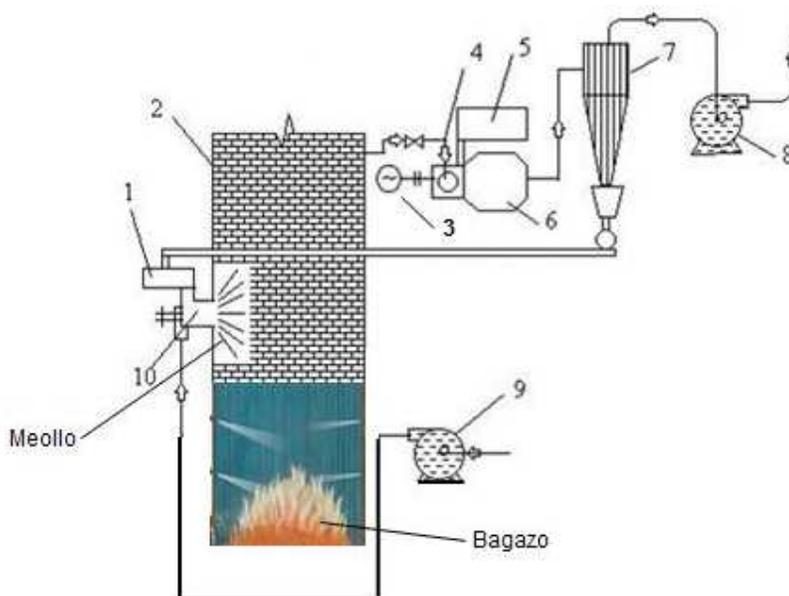


Fig. 15 Tecnología de las secciones de paso en rotación para la quema del meollo en una caldera de bagazo de 45 t/h. (Fuente [4])

1 – 5 Alimentadores de meollo seco y húmedo respectivamente [43]; 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.

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 de 32 % 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: 3,8 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 %, lo que propició una reducción del consumo de 8,5 t/h de bagazo integral con 50 % de humedad (204 t/d).

La tecnología ha sido aplicada además para la quema de combustibles líquidos y gaseosos, con el desarrollo de quemadores para diversas aplicaciones industriales. Un ejemplo de ello son los quemadores combinados (Fig. 16), utilizados, durante varios años en la producción de cerámica roja, entre otras aplicaciones.

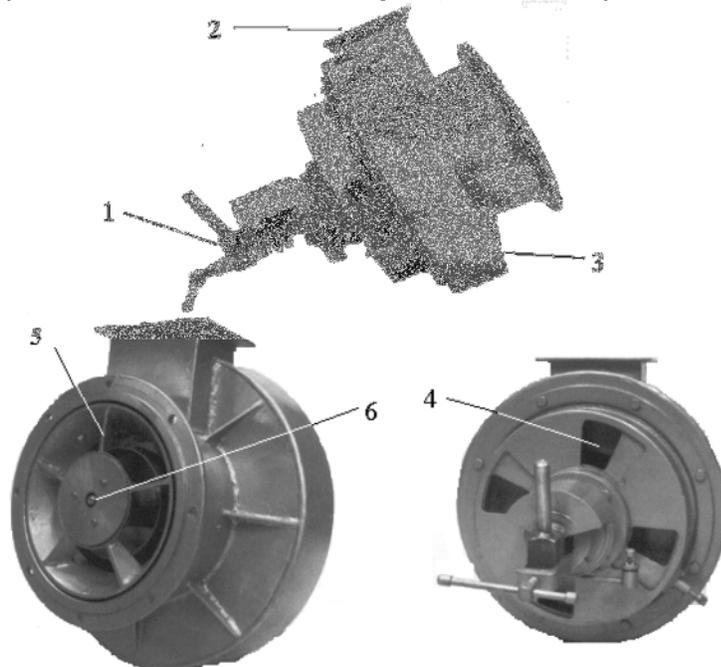


Fig. 16 Quemador rotatorio combinado de 1 MW_t para líquidos y sólidos pulverizados [44].
1 – Caña de combustible líquido; 2 – Conducto de entrada de combustible sólido; 3 – Cuerpo del ventilador; 4 – Válvula de aire; 5 – ERDC; 6 – Atomizador.

Estos quemadores disponen de un eje hueco, donde se les ha instalado un atomizador para combustibles líquidos y sobre el eje, un impelente para el autoabastecimiento del aire de la combustión. También han sido diseñados quemadores que pueden quemar además del sólido pulverizado, combustibles residuales (Fig. 17). Hay que señalar que las diferentes aplicaciones de los ERDC y en general los equipos que conforman la tecnología de la secciones de paso en rotación, utilizada para la quema del meollo, han sido debidamente protegidos con certificados de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, y sus detalles aparecen en la bibliografía del presente artículo [40....45].

En la Fig. 18 se presenta de forma esquemática el quemador monobloque abisagrado que se diseñó para ser utilizado en un horno rotatorio de 12 t/h de sal, donde durante tres años aseguró los niveles de producción y cumplió con los requisitos de calidad que se requieren para este tipo de industria.

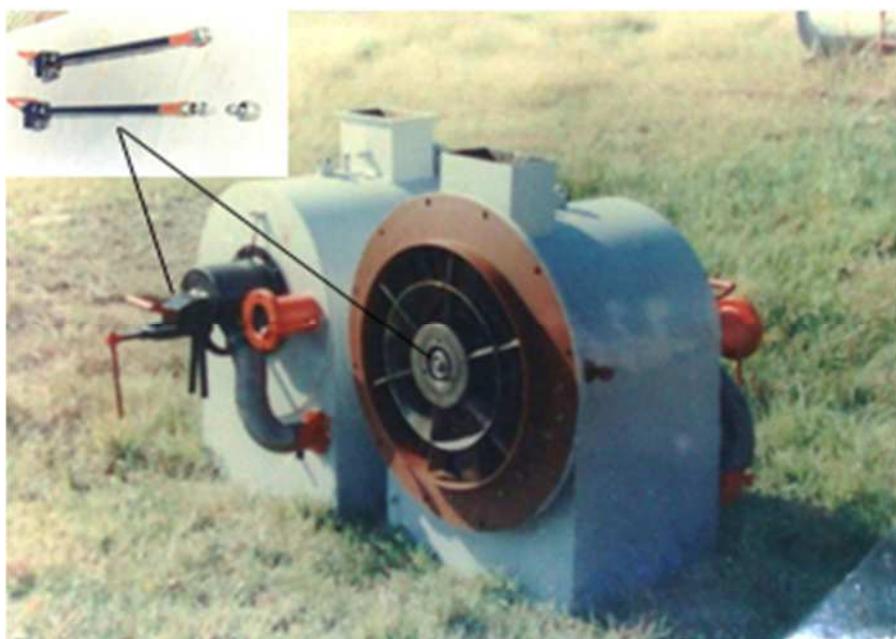


Fig. 17 Quemador rotatorio combinado de 17 MW_t para combustibles líquidos y residuos biomásicos pulverizados. Fuente [41, 44]

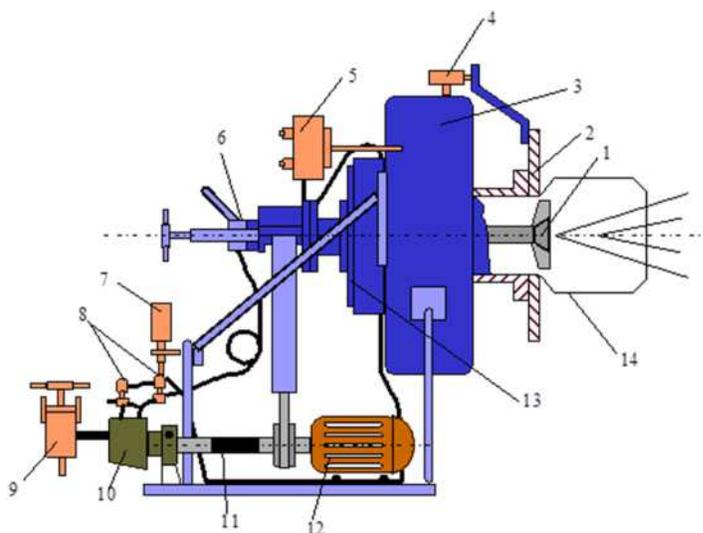


Fig. 18 Quemador tipo monobloque abisagrado para la quema de fuel # 2, de 2 MW_t.
(Fuente [45]).

- 1 – Estabilizador rotatorio de cono simple; 2 – Unión abisagrada; 3 – Cuerpo del ventilador; 4 – Micro de seguridad; 5 – Pizarra eléctrica; 6 – Caña de combustible; 7 – Manómetro; 8 – Solenoides; 9 – Filtro; 10 – Bomba de combustible; 11 – Acoplamiento flexible; 12 – Motor eléctrico; 13 – Válvula de aire; 14 – Punta de llama.

Conclusiones

1. Los ERDC representan un nuevo método de estabilizar las llamas en torbellino, con un mecanismo aerodinámico que se diferencia de los sistemas clásicos y que se caracteriza por la combinación del efecto de una ZRI central, bien establecida y de alta intensidad, (controlada por las velocidades de las corrientes de aire primaria y secundaria al pasar por los bordes de los conos truncados, que actúa como un mecanismo primario de estabilización de llama) con un torbellino de intensidad media inducido por sus características geométricas y principio de funcionamiento, cuya función es incrementar el mezclado turbulento en la frontera de la ZRI y en la corriente periférica, actuando como un mecanismo secundario de estabilización, que aporta ventajas al desarrollo de la reacción.
2. La tecnología de las secciones de paso en rotación, y los estabilizadores desarrollados, se imponen como una nueva forma de estabilizar llama en los procesos de combustión de combustibles sólidos pulverizados, líquidos y gases.
3. Los ERDC permiten quemar y secar con eficiencia y estabilidad, el meollo de la industria de los derivados del bagazo, lo que abre una nueva etapa en el aprovechamiento energético de este recurso renovable.
4. Los quemadores desarrollados con la tecnología de las secciones de paso en rotación aseguran muy bajas caídas de presión y una mínima formación de emisiones de NOx.
5. 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.

Recomendaciones

1. Dirigir los esfuerzos a la optimización de los modelos físicos de los ERDC desarrollados en estas investigaciones, teniendo en cuenta las características constructivas que ejercen mayor influencia en la aerodinámica y el consumo de energía para la estabilización, incluyendo en el análisis nuevas variables como el perfil de los álabes y la relaciones de diámetros de los conos con la cámara de combustión.
2. Generalizar el uso de la tecnología de las secciones de paso en rotación en la industria del derivado y en general en la industria azucarera y en las futuras bioeléctricas, con vista a elevar los niveles de eficiencia de los sistemas generadores de potencia.

Bibliografía

1. A. P. Mann, I M O'Hara. Predicting the effects of bagasse depithing operations on boiler combustion performance. Queensland University of Technology 2012.
2. Rodríguez Arias A. D. 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 pag.
3. Atchison JE (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
4. Rodríguez Arias A. D., Rosabal Ponce L. B, Martínez de Villier P. B. 2000. Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión. Editorial Academia 453 pag.
5. O'Hara IM, Mann AP, Rainey TJ, Bakir CM, Hobson PA, Farrell TW (2011) Reducing the economic and environmental risks of large scale bagasse storage through depithing. SRDC final report QUT039.
6. Boyd RK, Kent JH (1986) Three-dimensional furnace computer modelling. Proceedings of the Combustion Institute 21, 265-274.
7. Luo M, Stanmore BR, Dixon TF (1993) A thermal survey of a bagasse fired boiler. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 15, 108-118.
8. Dixon TF (1984) Preliminary measurements in the flame region of a bagasse fired boiler. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 6, 165-171.
9. Luo M, Stanmore BR, Dixon TF (1997) Modelling combustion in corner-fired sugar mill boilers. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 19, 466-472.
10. Woodfield PL, Kent JH, Dixon TF (1997) Temperature measurements in a bagasse fired furnace - experimental and numerical results. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 19, 473-478.
11. Eyerusalem Birru, Andrew Martin, Caterina Erlich. 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..
12. Colectivo de autores bajo la dirección de Luis O. Gálvez Taupier, Manual de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA 2000. 458 pag.
13. Rainey TJ (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.
14. Giertz HW, Varma RS (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).
15. Rainey TJ, Doherty WOS, Brown RJ, Martinez DM, Kelson NA (2009) An experimental study of Australian sugarcane bagasse pulp permeability. *Appita Journal* 62, 4 296-302.
16. Paul, S. K. and Kasi Viswanathan, K. S. Influence of pith on bagasse pulp, paper and black liquor properties. *IPPTA Journal*. 10, 1-8 (1998).
17. Paturau J.M. By-Products of Sugar Cane Industry, 3rd ed., Elsevier, Amsterdam, 1989.
18. Atchison, J.E. (1971). Review of modern methods of bagasse depithing. *Proceed. ISSCT*, 14: 1202-121 7.
19. Lois J. A, Suarez R, Garcia OL (1980). Some aspects of depithing and storage of Bagasse in Cuba. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, 2462-2471.
20. Lois-Correa J. A. Depithers for efficient preparation of sugar cane bagasse. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIII (número 4), octubre – diciembre 2012: 417 – 424 ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

21. T J Rainey, A P Mann, C H Bakir, I M O'Hara 2012 A preliminary study into the environmental and economic consequences of a sugar Factory depithing operation. Queensland University of Technology, Brisbane
22. Isserlín, A. S., (1987) Fundamentos de la combustión de los combustibles gaseosos. Leningrado. Editorial Nedra.
23. Pomeransev, V. V., (1983) Manual de problemas de teoría de la combustión. Leningrado: Editorial Energoatomoizdat.
24. Vanoverberghe, K., *Flow, turbulence and combustion of premixed swirling jet flames.*, in *Faculteit Toegepaste Wetenschappen*. 2004, Katholieke Universiteit Leuven Belgium.
25. Warchol, J., Particulate characterization and ultra low-Nox burner for the control of NOx and PM2.5 for coal fired boiler. 2001, McDermott Technology Inc. Combustion & Clean Air Systems Section: Ohio. USA. p. 90.
26. 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.
27. Vanoverberghe, K., (2004) Flow, turbulence and combustion of premixed swirling jet flames., in *Faculteit Toegepaste Wetenschappen.*, Katholieke Universiteit Leuven Belgium.
28. Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Visualization of Isothermal Large Coherent Structures in a Swirl Burner. *Combustion and Flame*, 156: 1723–1734, 2009.
29. . Claypole T., Syred N. Integration of Swirl Burners with Furnaces for the Combustion of Low Calorific Value Gases. International Conference on Combustion in Engineering, I. Mech. E. *Conference Publications*, 2:139–145, 1981. [[Links](#)]
30. Gupta A.K., Lilley D.J., Syred N. *Swirl Flows*. Abacus Press, Tunbridge Wells, United Kingdom, 1984. [[Links](#)]
31. Mathieu Legrand Estudio y caracterización de un quemador establecido por giro. Tesis doctoral Universidad Carlos III de Madrid 2008
32. Rodríguez Arias A. D., Rosabal Ponce L. B., Martínez de Villiers P. B. Introducción a la ingeniería de los combustibles líquidos 2006. 93 pags. Escuela Nacional del Ministerio de Energía y Minas.
33. R. Thundil Karuppa Raj, V. Ganesan. Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers. *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 1204 - 1225
34. Butovski L. S., Jristich V. A., y otros. Algunas particularidades de la combustión en la ZRI detrás del estabilizador. *Isvestia Vusov. Serie Energética* 1982. N°1 – pag.105 – 109.
35. Abramovich L. S. Teoría de las corrientes turbulentas. M.: Ciencia 1984. 716 pag.
36. Butovski L. S., Jristich V. A. 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.
37. Rosabal Ponce L. B. 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. UC 2006.
38. Weber, R. and Dugue´ , J. (1992) Combustion accelerated swirling flows in high confinements. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 18, 349–367.
39. Vanoverberghe, K.P., Van den Bulck, E.V., Hu" bner, W.A., and Tummers, M.J. (2001) Multi-Flame Patterns in Swirl Driven Partially Premixed Natural Gas Combustion. ASME, FACT Division International Joint Power Generation Conference, JPGC2001=FACT-19055, pp. 1–8, New Orleans, LA, 4–7 June.
40. Rodríguez Arias A. D., Jristich V. A., Pliusnova L. P. Quemador para el quemado de combustibles en polvo. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 21752 . Cuba 1987.

41. Rodríguez Arias A. D., Jristich V. A. Quemador universal para el quemado de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 21753 Cuba 1987.
42. Rodríguez Arias A. D. Secador de sólidos pulverizados. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22485. Cuba 1997.
43. Rodríguez Arias A. D. y otros. Silo dosificador para sólidos pulverizados. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22488 Cuba 1994.
44. Rodríguez Arias A. D. 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.
45. Rosabal Ponce L. B., Rodríguez Arias A. D. Dispositivo rotatorio para la estabilización de la llama. Certificado de autor de invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). CU 22752.

Autoresç

Abelardo Daniel Rodríguez Arias

Laboratorio de Combustión INEL, Cuba.

Email: abelardo@cfq.minem.cu

Liz Belkis Rosabal Ponce

Laboratorio de Combustión INEL, Cuba.

Email: lizbelkis@cfq.minem.cu

Presentado: 4 de enero de 2018

Aprobado para publicación: 24 de marzo de 2018