

# Estudio de modificaciones geométricas en boquillas de calderas piro y acuotubulares para la combustión eficiente de crudos pesados

**E. Lincheta Mesa, J. Suárez García, J. Barroso Estébanez**

Centro de Estudios de Combustión y Energía.

Universidad de Matanzas.

Km. 3 ½ Autopista a Varadero, Matanzas, Cuba.

Teléfono: (53) 52 261432 Fax: (53) 52 253101

E- mail: lincheta@quimec.umtz.edu.cu

(Ponencia recibida para ser presentada en el 2º Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica, ISPJAE, Ciudad de la Habana, Septiembre 2000)

## Resumen

Se presenta un estudio de boquillas de quemadores de calderas piro y acuotubulares. Se analizan diferentes variantes en las dimensiones, forma y posición de los conductos de atomizador que dan paso al combustible y al fluido auxiliar en el caso de quemadores con atomización por vapor.

En todos los casos se evalúa el cono de pulverización y la calidad del spray, analizando la influencia de la presión de atomización y de la configuración geométrica en la eficiencia de atomización.

Se determina la eficiencia de la combustión con varios tipos de boquillas, demostrándose la efectividad de las modificaciones introducidas cuando se queman combustibles de menor calidad.

Se concluye que es posible sustituir algunas boquillas de importación y elevar la eficiencia en la combustión de crudos pesados y sus mezclas, con un significativo efecto económico y como un paso más en el perfeccionamiento de las Centrales Eléctricas del país para el aprovechamiento del crudo nacional.

**Palabras claves: quemador, atomizador, fuel oil, caldera, generación de vapor, combustibles, combustión.**

## 1. Introducción

La combustión limpia y eficiente de petróleos pesados y sus mezclas con crudos presenta dificultades adicionales con respecto a los combustibles más ligeros. La mayoría de los problemas que se presentan se deben básicamente a la elevada viscosidad y al gran contenido de componentes de alto peso molecular que poseen estos combustibles de baja calidad. La obtención de una calidad de atomización adecuada resulta difícil debido a la mayor fuerza de inercia y viscosidad de estos combustibles, mientras que los componentes pesados dan lugar a prolongados tiempos de evaporación que incrementan el tiempo de combustión. Ambas características provocan una emisión apreciable de partículas que, debido al azufre del combustible, se convierten en hollines ácidos. Estos son problemas tradicionales en la combustión del fuel oil pesado y las centrales térmicas que lo queman sienten como aumentan las dificultades para poder cumplir la cada vez más restrictiva legislación medio ambiental y a la

vez trabajar con adecuados niveles de eficiencia en la combustión.

En la actualidad, el caso de las calderas pirotubulares que utilizan quemadores de pulverización mecánica (por la presión del combustible) es común la combustión de diferentes mezclas de fuel oil; sin tener en cuenta que en la mayoría de los casos las boquillas instaladas son para combustibles más ligeros, lo cual provoca que disminuya su vida útil, por la mayor temperatura de calentamiento previo y el mayor tiempo empleado en el proceso de combustión producido por el aumento del tamaño medio de la gota en el spray, entre otros aspectos negativos.

No obstante lo señalado, cuando se valora económicamente lo que representa para cualquier país utilizar combustibles de menor calidad y precio y a la vez poder elevar la eficiencia de la combustión, utilizando diferentes procedimientos, como las mezclas, los aditivos, las emulsiones y los quemadores especiales, se encuentra la justificación de los grandes esfuerzos de investigación desarrollados durante

décadas y se pone de manifiesto la conveniencia de perfeccionar el proceso de combustión, como camino más racional para buscar soluciones a estos problemas.

En la mayoría de los sistemas de combustión, la reducción del tamaño medio de las gotas conduce a un mejor encendido, más amplios márgenes de trabajo y más bajas emisiones de contaminantes.

Teniendo en cuenta que el proceso de atomización consiste en la desintegración de un chorro o una lámina líquida por la dinámica generada a partir de su propia energía cinética (por la exposición a un flujo gaseoso de alta velocidad), o como resultado de una energía mecánica aplicada externamente; es que se considera la elevación de la energía comunicada al chorro un factor decisivo en el proceso de desintegración en gotas, así como las condiciones de contorno en la inyección.

Por todo lo anteriormente expresado es que se han diseñado diferentes variantes geométricas de boquillas, que modifican la sección, forma y posición de las tradicionales, con vista a elevar la energía comunicada al chorro, mejorando la calidad del spray y la distribución espacial del combustible.

El objetivo de este estudio es aumentar el rendimiento y efectividad de la boquilla para la combustión del fuel oil pesado y sus mezclas con crudos.

## 2. Desarrollo

### 1. Tecnología de fabricación y modificación en las boquillas para quemadores de calderas pirotubulares y acuotubulares.

A pesar del amplio uso y el gran interés económico de los procesos de atomización, el alto grado de complejidad de estos fenómenos ha impedido el desarrollo de modelos físicos que lo describan con suficiente exactitud. Esta situación obliga, incluso en la actualidad, a recurrir a correlaciones semiempíricas contrastadas con estudios experimentales para conocer el comportamiento de una configuración concreta o estudiar el efecto de distintas variables sobre el spray. Es importante señalar que algunos trabajos recientes prometen despejar el camino hacia la comprensión del proceso de atomización en un futuro cercano [4].

Un gran número de estudios se han realizado sobre atomizadores de pequeña capacidad, inyectando agua o combustibles ligeros. Según [1, 2, 3], son escasos los trabajos en que se han utilizado boquillas de media o gran capacidad, citando a Jones en 1982 y Dodge y Biaglow en 1986, o el líquido atomizado ha sido fuel oil pesado del tipo utilizado en centrales térmicas, como en los trabajos de Jasuja en 1979 y Carvalho en 1989.

Los resultados de los estudios realizados hasta el

presente demuestran que la reducción del tamaño medio de las gotas, el mayor ángulo del cono, así como la menor inercia de las gotas, hacen posible una mayor expansión radial del spray y con ello un mejor encendido, más amplios márgenes de trabajo y menor emisión de contaminantes [1].

La fase inicial del estudio fue dirigida a las boquillas de calderas pirotubulares, a partir de la tecnología de fabricación y posibles modificaciones en las boquillas de presión pura sin retorno (para elevar la velocidad del fluido e incrementar su desintegración), similares a las de la firma DANFOSS, del tipo B semisólida de 45° y de 60°, por encontrarse entre las de mayor aplicación en el país. También se trabajó en las boquillas de presión pura con retorno, similares a las de las firmas OERTLI.

En la segunda fase se analiza la tecnología de fabricación y posibles modificaciones en las boquillas de los quemadores de la caldera acuotubular de la central termoeléctrica "Antonio Guiteras" de Matanzas.

La tecnología de fabricación partió del estudio y ensayo de los materiales necesarios, tanto para las boquillas de calderas pirotubulares, como para las empleadas en las calderas acuotubulares.

Para las boquillas de calderas pirotubulares los componentes de mayor interés son la punta y el dosificador, pues de su configuración geométrica depende la capacidad y velocidad de salida del combustible determinan su vida útil, ya que son las partes más afectadas por el desgaste erosivo producido por el paso del fluido y también por las incrustaciones derivadas de las impurezas.

Como conclusión del estudio de materiales se determinó que para la cubierta y tapón debe utilizarse el latón grado GOST L062- 1, con las características que se muestran en la Tabla I.

**Tabla I** Características del latón GOST L062-1.

componentes %			impurezas %				
Cu	Sn	Zn	P	Fe	Pb	Bi	Sb
61 a 63	0,1 a 1,1	resto	0,01	0,1	0,1	,002	,005

Aplicaciones: Barra y tubos para intercambiadores de calor y uso naval.

Teniendo en cuenta la mejor maquinabilidad [10], las posibilidades de endurecimiento por temple y el costo inferior al de los aceros inoxidable ferríticos y austeníticos, así como su resistencia en ambientes que contienen azufre a temperaturas mantenidas de hasta 500°C [17, 18], los aceros a utilizar en el dosificador y punta de las boquillas de calderas pirotubulares y en las boquillas de calderas acuotubulares, deben seleccionarse entre los siguientes (Tabla II):

**Tabla II.** Características de aceros para dosificador y boquilla [17, 18, 20].

**Primero**

AISI	UNE 36016		HEVA		DIN
416	F-3411X12CrS13		HIS		X12CrS13
Composición %					
C	Mn	Si	P	S	Cr
0,15	1,50	1,00	0,06	0,15÷0,35	12÷14

**Segundo**

AISI	Composición %				
420					
C	Mn	Si	P	S	Cr
≤0,15	≤1,0	≤1,0	≤0,04	≤0,03	11,5 a 13,5

**Tercero**

GOST	AISI	UNE		HEVA		DIN		
12x13	410	F-3401X12Cr13		HI		X10Cr13		
Composición %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti
,09 a 15	≤0,8	≤0,8	0,03	,025	12	≤0,6	0,3	≤0,2
a14								

La secuencia tecnológica de fabricación se realizó, tanto para la producción unitaria, como para una producción masiva en máquinas herramientas convencionales, así como para su posible desarrollo en máquinas automáticas con alta productividad y calidad en este tipo de trabajo, atendiendo a las recomendaciones de [14, 15, 16, 20,21, 22, 27]. Esta secuencia fue aplicada en la producción de todas las boquillas a ensayar.

En el caso de las boquillas para calderas pirotubulares de las firmas antes mencionadas se realizaron modificaciones, en relación con la geometría. Se modificó el ángulo de los orificios de la punta, se cambió la profundidad y el ángulo de las ranuras en el dosificador y en la configuración del tapón.

En las boquillas para la caldera de la central termoeléctrica "A. Guiteras" de Matanzas se realizó el estudio a partir del análisis dimensional de la boquilla de la firma francesa (tomada como patrón) y se comparó con la actual ofertada por una Empresa Mexicana y con las de producción Nacional (EMCE). Manteniendo similar sección de los orificios que dan paso a los flujos de combustible y vapor se realizaron diferentes variantes para los ensayos experimentales, entre las que se incluye un nuevo tipo de boquilla de 2 componentes (boquilla exterior o cubierta y boquilla interior), registrada como invención en la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (ver Anexo I), de cuyo modelo geométrico se desarrollaron las variantes B, D, B' y B'', que presentan las ventajas siguientes:

- Las ranuras angulares imprimen mayor velocidad y remolino para la desintegración - pulverización del combustible.
- Mayor facilidad para su limpieza por lo que su vida útil aumenta.
- Puede ser fabricada en cualquier taller de maquinado, por lo que sus características en ángulos y profundidad de las ranuras amplía la posibilidad para su estudio en diferentes combustibles.

A lo anterior, se agregan los resultados obtenidos con los ensayos experimentales realizados.

**II. Estudio experimental.**

2.1. Ensayo con las boquillas para calderas pirotubulares.

Estos ensayos fueron realizados en un banco de pruebas para quemadores de la Central Termoeléctrica "José Martí", centro perteneciente al MINBAS y ubicado en la zona industrial de la provincia de Matanzas.

El banco de referencia está compuesto por una bomba de agua capaz de suministrar una presión de 10 atm, un compresor de aire y una red técnica de vapor para la limpieza de los quemadores. Por el hecho de que la boquilla a experimentar es del tipo de pulverización mecánica (o sea, la boquilla por sí misma pulveriza el combustible sin ayuda de ningún agente externo, ya sea aire o vapor), se empleó solo una parte de la instalación para la ejecución de los ensayos: la bomba de agua con la red de tubería correspondiente.

Debido a las grandes dimensiones que poseen los quemadores de las calderas de la Central Termoeléctrica y que el banco fue diseñado exclusivamente para quemadores de tales dimensiones, fue necesario elaborar por maquinado un dispositivo de reducción o entredós (con una toma para manómetro) que permitió acoplar la boquilla en estudio al quemador que se utiliza en la industria.

Con el propósito de organizar los ensayos [8] fue concebido el siguiente plan.

Usando una boquilla marca DANFOSS, modelo 60°-B y con capacidad de 18 Kg/h, se define el cono de pulverización (distancia y diámetro) y el rango de valores de presión (controlada con un manómetro cercano a la boquilla). A partir del ángulo indicado en la boquilla, se fija un diámetro y se calcula la distancia del círculo patrón. En cada una de las variantes de boquilla se realizan pruebas, variando la presión del agua en el rango de 3 a 9 atm.

Las características tecnológicas de cada boquilla se muestran en la Tabla III.

**Tabla III.** Características tecnológicas de cada variante de boquilla usada durante los ensayos.

Boquilla #	Características tecnológicas.				
	h [mm]	$\theta$ [°]	$d_0$ [mm]	Tapón #	tipo dosificador
1	0,4	15	0,7	1	ESP
2	0,3	9	0,7	1	ESA
3	0,5	9	0,7	1	ESA
4	0,2	15	0,7	1	ESA
5	0,4	15	0,7	1	ESA
6	0,4	20	0,7	1	ESA
7	0,4	15	1	1	ESP
8	0,3	9	1	1	ESA
9	0,5	9	1	1	ESA
10	0,2	15	1	1	ESA
11	0,4	15	1	1	ESA
12	0,4	20	1	1	ESA
13	0,4	15	0,7	2	ESP
14	0,3	9	0,7	2	ESA
15	0,5	9	0,7	2	ESA
16	0,2	15	0,7	2	ESA
17	0,4	15	0,7	2	ESA
18	0,4	20	0,7	2	ESA
19	0,4	15	1	2	ESP
20	0,3	9	1	2	ESA
21	0,5	9	1	2	ESA
22	0,2	15	1	2	ESA
23	0,4	15	1	2	ESA
24	0,4	20	1	2	ESA

Donde:

h -Profundidad de las ranuras del dosificador.

$\theta$ - Ángulo de inclinación de las ranuras del dosificador.

$d_0$ . Diámetro del orificio de la punta (salida de la boquilla).

tapón #1- Tapón original (diseñado por el fabricante DANFOSS).

tapón #2-Tapón elaborado en la Universidad de Matanzas.

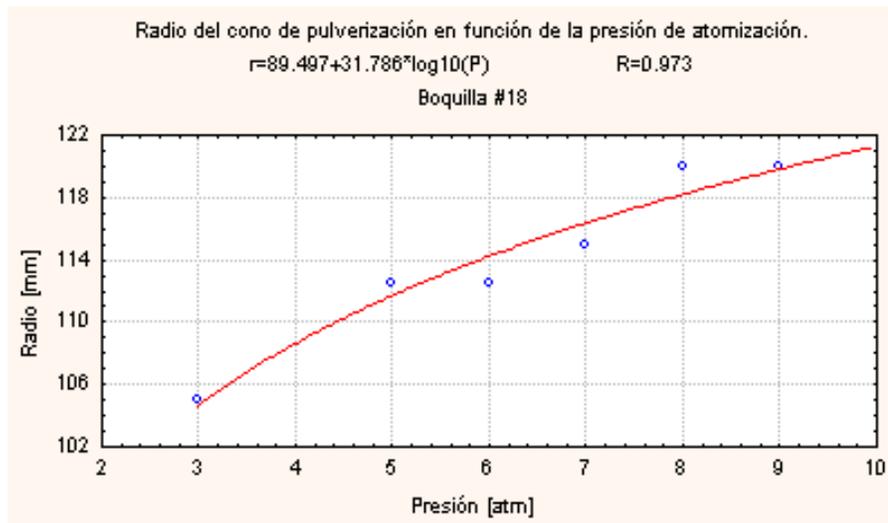
ESA- Dosificador ahuecado en su extremo superior.

ESP - Dosificador plano en su extremo superior.

### 2.1.1. Análisis de los resultados.

De los ensayos en frío para las diferentes variantes geométricas, se obtiene un resultado significativo del ángulo del cono de pulverización y del tamaño medio de las gotas en el spray, por apreciación visual y fotográfica, en las boquillas siguientes: 7,10,12,13,18 y 24.

En la Figura 1 se muestra uno de los gráficos obtenidos para la variante 18, donde se analiza la influencia de la presión del agua en el radio del cono de pulverización.



**Figura 1.** Influencia de la presión en el radio del cono. Boquilla #18

Las boquillas de mejores resultados en frío se seleccionaron para probarlas en caliente. Estos ensayos se realizaron en la caldera de la Universidad de Matanzas, la cual presenta las siguientes características:

Caldera Modelo: 79 PKM de dos pases.  
 Producción de vapor: 2500 Kg  
 Presión de trabajo nominal: 13 atm.  
 Consumo de combustible: 190 kg/h  
 Eficiencia: 88 %.

El combustible empleado es petróleo mezclado con crudo nacional con las siguientes características [5]:

$\rho = 968,98 \text{ kg/m}^3$   
 $\mu_{40^\circ\text{C}} = 585 \text{ cst}$   
 $\mu_{93^\circ\text{C}} = 90 \text{ cst}$   
 $\mu_{125^\circ\text{C}} = 17 \text{ cst}$

El combustible depositado en el tanque de almacenamiento pasa al tanque de suministro y por medio de una bomba circula a través de dos calentadores hasta llegar al quemador. El combustible llega al quemador con una temperatura de 110-120 °C y con una presión que varía entre 15 y 20 atm.

### 2.1.2 Metodología para la realización de las pruebas en la caldera.

Estas pruebas tienen su antecedente en el conocimiento del funcionamiento de las boquillas seleccionadas en la caldera. Se analiza el efecto que provocan las boquillas en el funcionamiento de la caldera y en el proceso de combustión, por lo que se medirán los siguientes parámetros:

- Rendimiento de la caldera.
- Consumo de combustible.
- Composición de los gases de escape.
- Pérdidas totales en la combustión.

Para obtener estos parámetros se realizaron mediciones con un analizador de gases continuo (Testo 360), efectuando los cálculos con un programa de computación confeccionado en Microsoft Excel.

**Tabla IV.** Resultados obtenidos en las pruebas en caliente.

Parámetro	Unidad	Boquilla Original	# 13	# 18
O <sub>2</sub>	%	7,5	10,0	5,0
CO <sub>2</sub>	%	10,2	8,3	12,0
CO	ppm	5054,0	10,0	17,0
NO <sub>x</sub>	ppm	206,0	237,0	279,0
SO <sub>2</sub>	ppm	1186,0	826,0	1217,0
$\alpha$	-	1,5	1,9	1,3
q <sub>3</sub>	%	2,3	0,008	0,007
q <sub>2</sub>	%	11,93	17,36	11,62

Las mediciones se realizaron para cada una de las boquillas con la caldera funcionando en el modo alto fuego.

En la Tabla IV se muestra un resumen de los valores obtenidos en tres de las variantes estudiadas.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento del coeficiente de exceso de aire en los gases de escape ( $\alpha$ ) y el monóxido de carbono para la boquilla original en el tiempo.

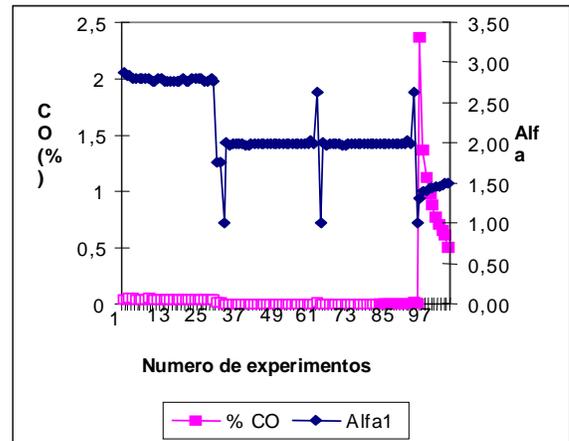


Figura 2. Comportamiento de  $\alpha$  y el CO. Boquilla original.

Como se puede apreciar la boquilla No. 18 posee un comportamiento superior a las otras dos. Esta boquilla se mantuvo en la caldera en fase de pruebas por seis meses.

### 2.2 Ensayos con las variantes de boquilla para Calderas Acuotubulares.

Los ensayos fueron realizados en una caldera que trabaja con 16 quemadores a carga máxima (330,3 MW), distribuidos en 4 pisos. Cada quemador admite un flujo de 4,5 T/h de combustible. La presión de trabajo del fuel oil oscila en el rango de (10 – 14,5 bar) y la presión del vapor de atomización es de 5 bar.

En el rango de cargas desde 280 a 330 MW trabajan todos los quemadores. Por debajo de 280 MW es necesario comenzar a apagar quemadores. Este proceso se realiza según la demanda del sistema, con el fin de garantizar la presión óptima para una correcta atomización del combustible. Los quemadores trabajan en un rango de viscosidad que está entre (2,5 – 4) °E, siendo el valor óptimo de 2,5 °E [25, 26].

Flujo de combustible en los quemadores según la presión de atomización:

Para presión de 10 bar el flujo es de 3500 L/h.

Para presión 13,5 bar el flujo es de 4260 L/h.

Para presión 14,5 bar el flujo es de 4460 L/h.

Para el desarrollo del plan de experimentos se parte de las características del banco de pruebas disponibles

para verificar los parámetros establecidos en las boquillas de la firma francesa, en la que los parámetros de prueba que se recomiendan son [6, 7]:

Presión de agua – 13,5 bar

Presión de aire – 5 bar

La boquilla se considera con funcionamiento correcto, cuando la caída de presión por descarga de la boquilla oscila entre 488 y 550 mbar, lo que representa en su valor medio un flujo de 5000 L/h de combustible.

Teniendo en cuenta que al cambiar el fluido de prueba por uno de mayor viscosidad y fuerza de inercia, el cono de pulverización y el tamaño de gota sufren a su vez, modificaciones que pueden cambiar los parámetros de presión para estas boquillas, es que se establece el estudio experimental, tanto con la variación de presiones, como con la variación de la geometría de la boquilla [12, 13, 23, 24].

Las variantes de boquilla estudiadas se identifican con el número de orden siguiente:

**Tabla V.** Identificación de boquillas estudiadas

No de boquillas	Variante
1	Francia
2	México
3	Cuba
4	Universidad
5	A (Universidad)
6	B (Universidad)
7	D (Universidad)

Además existen dos variantes desarrolladas por la Universidad, la B' y la B'' que no se estudian con agua y se conservan para las pruebas con aceite, por lo que serán evaluadas en una segunda etapa del estudio.

Los parámetros del spray que se estudian en este trabajo son:

Ángulo del Cono ( $2\theta$ ): El cual se determina con la distancia  $x$  constante y la medición del diámetro de impacto de los bordes del spray con una escala graduada, calculándose por la siguiente ecuación:

$$\tan\theta = \frac{\Phi/2}{x} \quad (1)$$

También el ángulo del cono se analiza por medición en fotografía y video.

Nota: La cámara de video se sitúa perpendicular al eje del spray y en posición fija para todas las variantes. Se debe destacar que las características de estas boquillas difieren de las de una sola salida; pues en las primeras por cada orificio surge un cono pulverizado que se entrecruza y se mezcla con el que surge de los agujeros vecinos, para la formación final del cono pulverizado. Mediante la comparación por fotografía y video pueden apreciarse las diferencias entre las variantes.

Distribución del tamaño de gota: Por fotografía y video comparativo y apreciación visual.

Flujo de agua: Por lectura del manómetro diferencial y cálculo por tabla del flujo.

Estos parámetros se analizan en relación con las variables: presión de agua y presión de aire para cada tipo de boquilla por separado y finalmente se comparan gráficamente unas con otras.

El método experimental que se aplica en este caso para cada variante de boquilla se ejemplifica a continuación:

PRESIÓN DE AGUA 1 (11,5 BAR)	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Presión aire 1} \\ \text{Presión aire 2} \\ \text{Presión aire 3} \end{array} \right.$
PRESIÓN DE AGUA 2 (13,5 BAR)	
PRESIÓN DE AGUA 3 (15,5 BAR)	

Cuando sea implementado el sistema diseñado para la prueba con aceite, lo cual está programado a partir de octubre del 2000, se deberán repetir los experimentos con iguales parámetros de presión y variantes de boquillas.

### 2.2.1. Resultados obtenidos.

El plan de experimentos se realiza acorde con lo programado, no obstante en la práctica se reflejan algunas características que obligan a modificar algunos aspectos, tales como el valor de las presiones del aire y parámetros para la evaluación cualitativa del spray.

En relación con la presión de aire, que como se conoce sustituye al vapor usado como fluido auxiliar en la caldera, se presentó la situación siguiente. En las variantes de similar geometría que la francesa, abriendo toda la válvula, la presión no sobrepasa los 5 bar, sin embargo en las variantes A, B y D, con una menor abertura de la válvula (o lo que es lo mismo menor flujo), la presión del aire alcanza valores de hasta 7 bar con excelente atomización. Este aspecto es muy importante pues estas variantes de boquilla atomizan bien con menor cantidad de vapor lo que garantiza un efecto económico muy positivo, debido al menor consumo de vapor y a la menor cantidad de agua en los gases de combustión que reduce los procesos de corrosión.

Es por lo anterior que, las variables de presión de aire, en las boquillas francesas, mexicanas, cubana y la de la universidad fueron 1, 3 y 5 bar; en la variante A fue de

2, 4 y 6, así como en las variantes B y D fue de 3, 5 y 7 bar.

La calidad del spray se evalúa por apreciación visual directa y también por comparación fotográfica. La calidad de pulverización del spray se determina según la escala cualitativa siguiente:

	Valor
El de mejor pulverización (gotas más finas)	MB
Se pulveriza, pero menos	B
Líneas de fluido, combinadas con gotas	R
No se pulveriza y se ven líneas de fluido	M

Para la determinación del diámetro del cono de pulverización se consideró el posible desplazamiento de la línea de eje del spray y por tanto los valores recogidos

en la tabla son los radios a la izquierda y a la derecha, con línea cero en el eje del círculo patrón. Para la medición de estos radios se colocó una escala graduada en posición horizontal, fija en el círculo patrón, anotándose como límite del radio la zona de mayor impacto de las gotas. Además se realizaron observaciones referentes a un posible segundo cono, el más próximo al del impacto, en el límite radial exterior.

Los resultados reflejados en las Tablas VI - XII son el promedio de 10 repeticiones de cada parámetro, lo que garantiza la fiabilidad de los mismos.

En el Anexo II se muestra un gráfico del comportamiento de las diferentes variantes en función de las presiones del agua y del aire.

Asimismo se agregan varias fotos que muestran el spray y los componentes de las boquillas estudiadas.

**Tabla VI.** Resumen de resultados Boquilla No 1 (Francia)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	1				3				5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	114,6	450	5,20	R	108,3	385	4,804	B	108,3	375	4,74	B
13,5	114,6	525	5,61	R	110,5	475	5,34	B	114,6	450	5,20	MB
15,5	111	600	6,00	M	108,3	565	5,818	R	116,5	500	5,48	MB

Leyenda:

**A:** 2θ      **B:** Caída de presión (mbar)      **C:** Flujo (m<sup>3</sup>/h)      **D:** Calidad del spray

**Tabla VII.** Resumen de resultados Boquilla No 2 (México)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	1				3				5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	110,5	345	4,548	M	109,8	330	4,452	R	103,2	320	4,384	B
13,5	109,8	410	4,96	M	109	390	4,836	R	106,8	385	4,804	B
15,5	109	460	5,256	R	104,7	458	5,244	B	109	470	5,312	MB

**Tabla VIII.** Resumen de resultados Boquilla No 3 (Cubana)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	1				3				5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	121	480	5,368	M	117,5	455	5,228	R	113,2	425	5,05	B
13,5	120,5	545	5,714	M	117,5	530	5,636	R	114,6	510	5,532	B
15,5	129	590	5,948	M	121	580	5,896	R	114,6	570	5,844	B

**Tabla IX.** Resumen de resultados Boquilla No 4 (Universidad)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	1				3				5			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	118,8	430	5,08	R	123	410	4,96	B	113,2	360	4,644	MB
13,5	113,2	500	5,48	R	114,6	485	5,396	B	112,6	430	5,08	MB
15,5	114,6	560	5,792	R	114,6	550	5,74	B	112,6	520	5,584	MB

**Tabla X.** Resumen de resultados Boquilla N 5 ( Variante A)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	2				4				6			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	114,6	460	5,256	M	112,6	435	5,11	B	109	355	4,612	MB
13,5	114,6	540	5,688	R	119,4	530	5,636	B	119,4	460	5,256	MB
15,5	121	600	6,00	M	121	600	6,0	B	120,5	575	5,87	MB

**Tabla XI.** Resumen de resultados Boquilla No 6 (Variante B)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	3				5				7			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	97,5	425	5,05	B	92,3	415	4,99	MB	97,5	390	4,836	MB
13,5	106,9	500	5,48	B	95,6	485	5,396	MB	95,6	470	5,312	MB
15,5	102,7	570	5,844	R	98,8	555	5,766	MB	92,3	539	5,683	MB

**Tabla XII.** Resumen de resultados Boquilla No 7 (Variante D)

Presión de agua (bar)	PRESIÓN DE AIRE (BAR)											
	3				5				7			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11,5	106,1	475	5,34	R	115,4	430	5,08	B	111,1	370	4,708	MB
13,5	114	535	5,662	B	111,1	520	5,58	MB	111,1	460	5,256	MB
15,5	-	-	-	-	111,1	600	6,00	B	111,1	565	5,818	MB

### 2.2.2. Análisis de los resultados.

Del análisis de los diferentes gráficos de resultados (ver Anexo II) y las Tablas resumen por boquillas (VI a XII), en las que se reflejan los parámetros principales de su funcionamiento, unido al estudio de las fotografías (vídeo), así como a la relación existente entre la calidad del spray, el ángulo del cono y el flujo de descarga, se llega a las consideraciones siguientes:

Se comprueba que los parámetros de presión de combustible (agua) 13,5 bar y presión de vapor (aire) 5 bar, normados para la boquilla francesa, son los que logran mejor calidad de spray (MB), con un valor de flujo medio de 5 200 l/h de agua y un ángulo del cono de 114,6°. Aunque los experimentos reflejan que con una presión del combustible mayor (15,5 bar) el spray también es MB, pero el flujo de descarga en este caso es

mayor (5 480 l/h) que el necesario a plena carga de la caldera.

La boquilla mexicana, actualmente en fase de prueba en caliente, refleja que para alcanzar la calidad de spray MB, es necesario aumentar la presión del combustible hasta 15,5; sin embargo el ángulo del cono es inferior (109°) y el flujo de 5 312 l/h es superior al de la francesa.

La boquilla cubana, suministrada por la EMCE, como se aprecia no alcanza la calidad del spray de las anteriores y aunque el ángulo del cono es similar a la francesa (114,6°), a presión del fluido de 13,5 bar, el flujo es de 5 532 l/h, valor superior a los dos anteriores, lo que unido a su menor vida útil (50% de la vida de la boquilla francesa), obliga a mejorar su calidad constructiva y con ello evitar los efectos económicos negativos.

La boquilla desarrollada en la Universidad demuestra la posibilidad de que con esta geometría se puede lograr una calidad similar a la de la firma francesa, pues en los tres valores de presión del fluido, con la presión del aire de 5 bar, se logró un spray MB. Además con un ángulo del cono de  $112,6^{\circ}$ , y un flujo de 5 080 l/h; ligeramente inferior al de la francesa.

Las variantes A, B y D diseñadas y construidas en la Universidad, con modificación de su geometría para las futuras pruebas en aceite, reflejaron en las pruebas con agua características de gran importancia en relación con las anteriormente explicadas, pues con menor abertura de la válvula del aire (vapor) se alcanzan presiones superiores y una calidad del spray MB. Los principales análisis realizados son:

La variante A tiene una reducción en el número de orificios para el paso del combustible y el vapor, con un incremento de su diámetro para mantener en el mismo valor el área de flujo. Esta boquilla en las pruebas alcanzó hasta 6 bar de presión en el aire, con calidad MB del spray para las tres presiones del combustible. Como se puede ver en la tabla resumen con la presión standard de 13,5 bar en el agua (combustible) y 6 bar de aire (vapor) el ángulo fue de  $119,4^{\circ}$  con un flujo de 5 256 l/h, lo que induce a pensar que cuando se use un fluido de mayor fuerza de inercia y viscosidad, los resultados serán positivos.

Las variantes B y D de geometría novedosa, pues están formadas por dos componentes y poseen características constructivas que elevan la velocidad del fluido y las posibilidades de desintegración, han alcanzado en las pruebas resultados satisfactorios, pues con sólo media vuelta en la válvula del aire se alcanzó la presión máxima posible (7 bar), lo que implica que el flujo de vapor que entra en la caldera es menor que en las boquillas anteriores, logrando una calidad de spray MB en ambas variantes con las tres presiones del combustible (agua).

En la D se logra con esta presión de aire un ángulo de  $111,12^{\circ}$  y un flujo de agua de 5 256 l/h; por lo que si se compara con la francesa, donde para lograr un valor similar se requieren 4 o más vueltas de la válvula de entrada de aire (vapor) para obtener 5 bar de presión, se puede afirmar que esta variante es superior.

Algo similar ocurre con la variante B, pero en este caso el ángulo del cono es más reducido  $95,6^{\circ}$  con un flujo de 5 312 l/h.

Otro aspecto de gran importancia es que aunque se ha clasificado el spray como MB en la apreciación visual, la realidad es que en las variantes B y D los pequeños conos pulverizados que salen por los orificios impactan unos con otros a una distancia inferior que en la francesa, lográndose un tamaño de gota menor, pues la niebla de pulverización así lo indica.

### 2.2.3. Análisis económico.

El estudio realizado responde a una necesidad económica fundamental para el país y en especial para el MINBAS, en relación con el ahorro de combustibles y en el perfeccionamiento de las instalaciones para alcanzar mayor eficiencia en las CTE.

La CTE "Antonio Guiteras" requiere en la producción de los 330 MW de energía eléctrica un consumo de combustible de 72 toneladas por hora, por lo que en el año consume 556 416 Toneladas de combustible.

El precio actual de la tonelada de fuel oil es \$165,34, por lo que en el año la CTE invierte en el pago del combustible 91 997 821,00 MN.

Por esta causa la Dirección del MINBAS ha orientado el perfeccionamiento en las CTE del país, para el consumo de las mezclas de crudo nacional; con un precio de 127,70 pesos la tonelada, lo que representa, teniendo en cuenta el incremento del consumo de combustible por su menor valor calórico, un costo de 74 960 141,00 pesos al año.

Por concepto de cambio de combustible la CTE "Antonio Guiteras", ahorraría 17 037 680,00 pesos al año.

Un aspecto que se ha hecho referencia en el presente trabajo es que para la mezcla del crudo nacional es indispensable elevar la temperatura a niveles superiores a los habituales para el fuel oil y por tanto el estudio que se realiza, motivado por los datos económicos expuestos, esta dirigido a resolver este problema mediante el ensayo en el banco de pruebas de diferentes variantes de boquillas con vista a seleccionar las mejores para su posterior prueba en caliente.

## 3. Conclusiones

Todas las variantes de boquillas de quemadores pueden ser fabricadas en los talleres de maquinado del país con un mínimo de inversión.

Los aceros inoxidable que aportan mejores resultados en la fabricación de las boquillas son el AISI 410 o el 416 (GOST 12 x 13).

El incremento del ángulo en la ranura del dosificador de las boquillas pirotubulares reflejó un resultado superior en las pruebas en frío (mejor calidad del spray) y en caliente (mayor eficiencia de la combustión).

Las variantes de boquillas B y D aportan resultados superiores que los de la firma francesa; por lo que su prueba en caliente permitirá precisar la calidad de la combustión y con ello la magnitud del efecto económico de las mismas con el combustible actual (fuel oil pesado de alto vanadio).

El método experimental aplicado deberá repetirse con el aceite, para completar el estudio y preparar las condiciones para optimizar la variante a emplear con las mezclas de crudo nacional.

#### 4. Bibliografía

1. Ballester Castañer, Javier M. "Estudio experimental de la influencia de las características del spray sobre la combustión del fuel oil pesado". Tesis Doctoral presentada en la CPS de la Universidad de Zaragoza, Junio, 1992.
2. Ballester J.M., Dopazo C y Vidal P.J. "Ensayos de combustión de fuel oil pesado y sus emulsiones con agua + aditivos" Térmicas del Besos S.A. España 1992.
3. Ballester, J. M., Dopazo C y Vidal P.J. "Estudio y ensayos para la optimización de la combustión en sistemas de alta presión de fuel oil pesado con atomización mecánica". Fase I: Ensayos de atomización, 1988. Fase II Ensayos de combustión, 1991.
4. Barreras Toledo, F. M. "Estudio experimental de la rotura y atomización de una lámina líquida. "Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Zaragoza, Octubre, 1998.
5. Catálogo de especificaciones de producto terminados (Combustibles) Laboratorio CUPET Matanzas.
6. Catálogo de especificaciones de productos terminados (Lubricantes) Laboratorio CUPET Matanzas.
7. Catálogo para la selección de Bombas Oleohidráulicas del MINAZ. Matanzas.
8. Conferencias- 1<sup>er</sup> Encuentro Nacional de Eficiencia en la combustión. Comisión Nacional de Energía, Ciudad de la Habana, Junio, 1990.
9. Documentación y planos técnicos del registro de archivos de la CTE "Antonio Guiteras".
10. El Mecanizado Moderno – Manual Práctico – SANDVIK Coromant 1994.
11. Falcón López, Alain I. "Evaluación del efecto de las modificaciones en las boquillas para calderas pirotubulares". Trabajo de Diploma presentado en la Universidad de Matanzas, Julio, 1999.
12. Fox, Robert W. Introducción a la mecánica de los fluidos. Cuarta Edición. México, 1995.
13. Gerhart, P.; Gross, Richard y otros. Fundamentos de Mecánica de los fluidos 2 Edición. Addison-Wesky Iberoamericana, S.A. Wilmington, EUA, 1995.
14. González González. Jesús. Regímenes de corte para la elaboración por arranque de virutas. Tomo I y II Editorial Pueblo y Educación. 1990.
15. Herramientas para torneado. Firma: AB SANDVIK Coromant Dic- 1995 "Catálogo Industrial".
16. Herramientas rotativas. Firma A.B. SANDVIK Coromant. 1995 (Catálogo Industrial).
17. Manual de Aceros – S.A. Echeverría. Bilbao. 1991.
18. Manual de aceros y sus laminados. Tomo II CEN, Abril, 1985.
19. Márquez Martínez, M. "Combustión y Quemadores" Marcombo, S.A. 1989.
20. Martínez Pérez, F. y Gordon Cintra, J. Teoría y tecnología del tratamiento térmico. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1990.
21. Metrología – Intercambiabilidad. Facultad de Construcción de Maquinarias. ISPJAE. MES. 1986.
22. Micaelovich Petrosian, Robert. Guía Metodológica para proyectos de tecnología en construcción de Maquinarias. Editorial Pueblo y Educación. Matanzas, 1987.
23. Oleohidráulica. Catálogo Industrial. Diplomatic. S.A. 1992.
24. Ramos Paéz, N. Bombas, ventiladores y compresores. Editora ISPJAE- Ciudad de la Habana- 1989.
25. Registro de datos de Control del Departamento de Explotación de la CTE "Antonio Guiteras".
26. Registro de datos del laboratorio de la CTE "Antonio Guiteras".
27. Rodríguez, N. y Bregio Bejerano, J. L. "Estudio para la fabricación nacional de boquillas para quemadores de calderas pirotubulares". Trabajo de Diploma presentado en la Universidad "Camilo Cienfuegos" Matanzas. Junio, 1998.

---

## Study of geometric modifications in pyro and aquatubular mouthpieces of boilers for the efficient combustion of heavy oils.

### Abstract :

It is presented a study of mouthpieces of pyro and aquatubular burners of boilers. Different variants are analyzed in dimensions, forms and position of the atomizer conduits that open the way to the fuel and auxiliary fluid in case of burners with steam atomization.

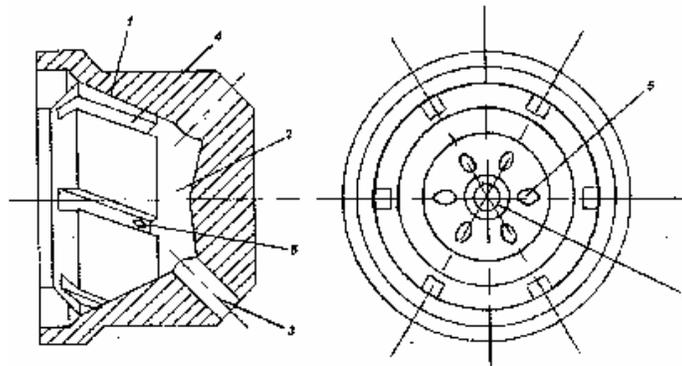
In all cases, it is evaluated the pulverization cone and the quality of spray, analyzing the influence of atomization pressure and geometric configuration in the atomization efficiency.

The efficiency of combustion is determined with several types of mouthpieces. The effectiveness of the introduced modifications in connection with the import mouthpieces is demonstrated when fuels of smaller quality burns.

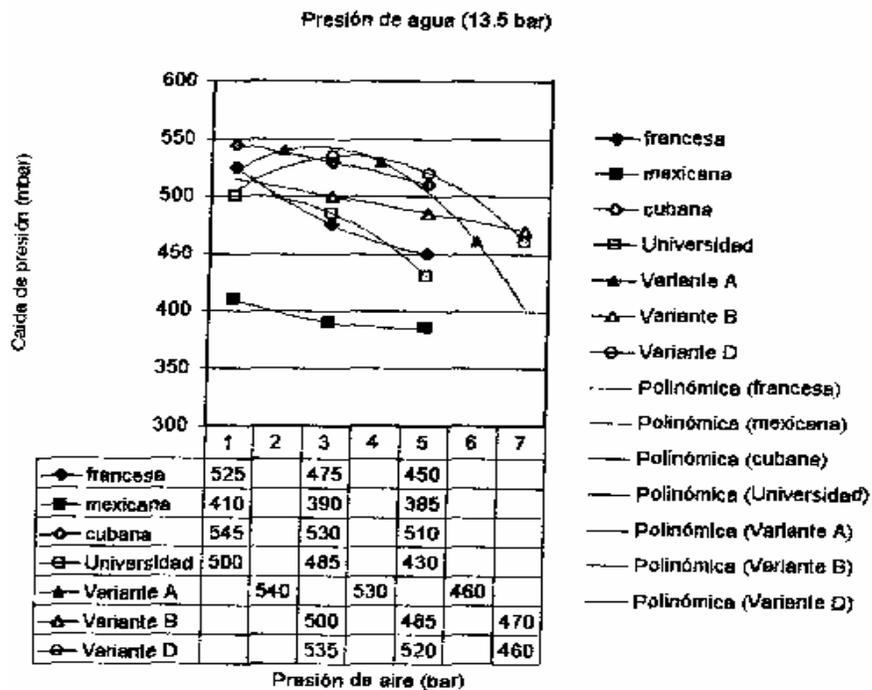
It is stated that it is possible to substitute some import mouthpieces and to increase the efficiency in the combustion of raw heavy oils and their mixtures, with a significant economic effect.

**Key words: burner, atomizer, fuel oil, boiler, generation of steam, fuels, combustion.**

**ANEXO I Croquis de la boquilla variante B**



**ANEXO II Gráfico comparativo de los diferentes tipos de boquillas.**

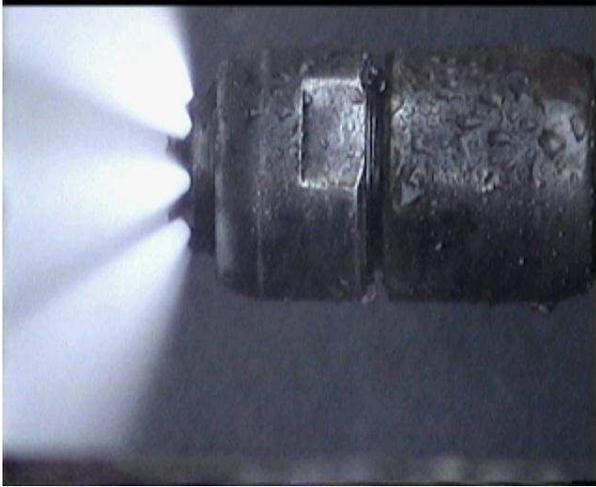


**ANEXO III****Boquilla de la firma francesa**

Presión de agua (fuel-oil) 13,5 bar

Presión de aire (vapor) 5 bar

Válvula de paso del aire : Abierta completamente.

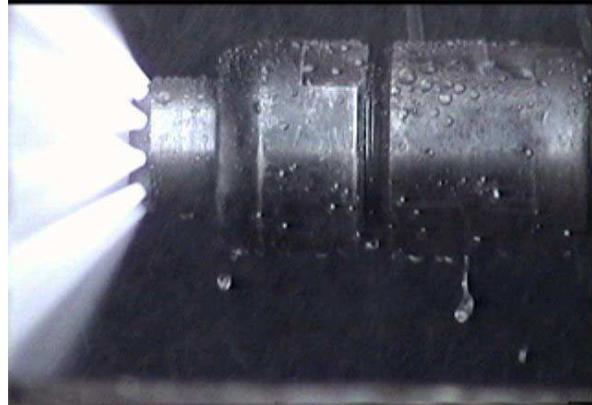
**ANEXO V****Boquilla variante B fabricada en la Universidad**

Presión de agua (fuel-oil) 13,5 bar

Presión de aire (vapor) 7 bar

Válvula de paso del aire : Abierta (½ vuelta)

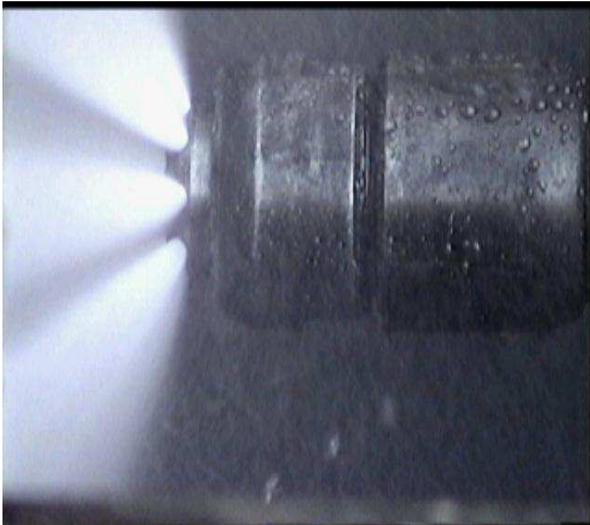
Nota: Con menor entrada de vapor (aire) se alcanza mayor presión para el pulverizado del combustible (agua) que en las de geometría similar a la francesa.

**ANEXO IV****Boquilla de igual geometría que la francesa fabricada en la Universidad**

Presión de agua (fuel-oil) 13,5 bar

Presión de aire (vapor) 5 bar

Válvula de paso del aire : Abierta completamente

**ANEXO VI**

Componentes de la punta del quemador con la boquilla de geometría tradicional (francesa, mexicana y cubana)

De izquierda a derecha: casquillo de ajuste a la caña, dosificador, boquilla y casquillo de ajuste en la punta.

**ANEXO VI**

Componentes de la punta del quemador con la boquilla fabricada en la Universidad, variante B

De izquierda a derecha: casquillo de ajuste a la caña, dosificador, boquilla interior, boquilla exterior y casquillo de ajuste en la punta.

