

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN QUEMADOR EXPERIMENTAL DE ACPM DE ALTA PRESIÓN TIPO CAÑÓN

### RESUMEN

En el presente artículo se pretenden dar a conocer los avances del proyecto de investigación: "Diseño, construcción, control y pruebas de un quemador experimental de ACPM de alta presión tipo cañón, para el Laboratorio de Térmicas". Se muestran uno a uno los pasos que se desarrollaron para el diseño, la selección de componentes y la posterior construcción del quemador.

**PALABRAS CLAVES:** Combustión, quemadores, ACPM, boquillas.

### ABSTRACT

*This paper shows the research advances in the project: "Design, construction, control and tests of an experimental ACPM high pressure burner to the Thermal Lab". One by one are explained the development steps for the design, components selection and the burner construction.*

**KEYWORDS:** Combustion, burners, fuel-oil, sprays.

**JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ G.**  
Profesor asistente, M.Sc., I.M.  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
U.T.P.  
juantiba@utp.edu.co

**MAURICIO Y. CARMONA G.\***  
**ANDRÉS ANTONIO ACOSTA O.\***  
\* Estudiantes último semestre  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
U.T.P.

### 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación: "Diseño, construcción, control y pruebas de un quemador experimental de ACPM de alta presión tipo cañón, para el Laboratorio de Térmicas", está enmarcado dentro del grupo de investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.T.P. En este artículo se mostrarán las siguientes etapas del proyecto:

- Análisis preliminar.
- Diseño y selección de componentes del sistema de inyección de combustible.
- Diseño y selección de componentes del sistema de alimentación de aire.
- Diseño y selección de componentes del sistema de encendido del quemador.
- Ensamble de los sistemas de operación del quemador.

Un quemador experimental de ACPM de alta presión tipo cañón es un dispositivo utilizado para quemar combustibles líquidos y está compuesto por los siguientes sistemas: Sistema de combustible, Sistema de alimentación de aire, Sistema de encendido.

### 2. ANÁLISIS PRELIMINAR

Para diseñar un quemador existen dos parámetros de diseño principales, que son el tipo de combustible a quemar y la potencia calorífica. En este proyecto se decide diseñar un quemador experimental de ACPM (aceite combustible para motores) de alta presión tipo cañón o combustible diesel corriente, este es un destilado medio obtenido de la destilación atmosférica del petróleo crudo, porque es fácil de conseguir, no demanda

precalentamiento, es un combustible que aún es usado en la industria y no requiere cuidados o instalaciones especiales en el almacenamiento, aunque es conocido que existen otros combustibles líquidos, como el combustóleo No. 8, mas baratos pero que no tan comerciales y su manejo antes del proceso de combustión requiere condiciones especiales.

En el mercado, los quemadores de más baja potencia calorífica para ACPM son de 400000 BTU/h (422022 kJ/h)<sup>[1]</sup>, de esta manera se decide diseñar y construir un quemador de esta potencia. El poder calorífico promedio para el ACPM es de 45000 kJ/kg<sup>[2]</sup> y<sup>[3]</sup> y la densidad es 850 kg/m<sup>3</sup>. La masa de combustible necesaria, es entonces la relación entre la potencia calorífica solicitada, y el poder calorífico del combustible.

Donde:

$$\dot{Q} = \dot{m} * \Delta h$$

$\dot{Q}$  : Potencia calorífica en kJ / h.  
 $\dot{m}$  : Flujo másico de combustible en kg / h.  
 $\Delta h$  : Poder calorífico del combustible en kJ / kg.

Así entonces el flujo másico de combustible será:

$$\dot{m} = \frac{422022}{45000} = 9.378 \text{ kg / hr}$$

De esta forma, el caudal de combustible puede ser hallado por medio de la densidad, de la siguiente forma:

Donde:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$\dot{m}$  : Caudal de combustible en kg / hr.  
 $\dot{V}$  : Caudal de combustible en m<sup>3</sup> / hr.  
 $\rho$  : densidad del combustible en kg / m<sup>3</sup>.

Fecha de Recibo: 22 Agosto de 2003

Fecha de Aceptación: 20 Octubre de 2003

Así entonces el caudal de combustible para la potencia calorífica solicitada será:

$$\dot{V} = \frac{9.378}{850} = 1.103 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{hr.}$$

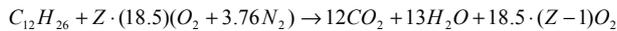
En la industria aún son utilizadas para el caudal de combustible las unidades inglesas galones por hora.

Entonces es posible expresar que:  $\dot{V} = 2.914 \text{ GPH}$

Para modelar químicamente la reacción de combustión, los combustibles se simplifican como si fuesen un solo hidrocarburo, aunque en la realidad estos son mezclas complejas de hidrocarburos e impurezas, que dependen de la fuente de petróleo crudo y de la refinería.

Para simplificar el estudio de la reacción química de la combustión, en la práctica los combustibles hidrocarburos se modelan así:  $C_xH_y$ , en este proyecto se adopta esta aproximación y por lo tanto el diesel se considera como  $C_{12}H_{26}$ .<sup>[4] y [5]</sup>

De esta manera para un proceso de combustión completa de diesel, con exceso de aire y en una base de aire seco la ecuación de reacción química es:



Donde Z es el aire teórico. Y 18.5 es el coeficiente estequiométrico para el aire teórico.

### 3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE.

#### 3.1 Bomba

Para la selección de la bomba es necesario conocer la aplicación que tendrá (Fluido a bombear), caudal, presión a manejar, así como las condiciones de instalación y funcionamiento. Estos mismos requerimientos se deben establecer para la correcta selección, de los demás dispositivos en el sistema de inyección de combustible. Para este caso la aplicación es el manejo, transporte y en gran medida la atomización de combustible diesel corriente de especificaciones colombianas. Se requiere una presión entre 100 psig y 150 psig por las condiciones del combustible y un caudal de 3 GPH como se mostró anteriormente. De esta forma la bomba seleccionada es una bomba de desplazamiento positivo, rotatoria, de engranajes internos con partición o media luna. El dispositivo que cumple con las especificaciones deseadas es el siguiente:

- Marca: SUNTEC
- Modelo: A1VA-7112
- Velocidad de giro del rotor: 1725 RPM
- Presión: 100- 150 psig



Figura 1 Bomba del quemador

El motor para suministrar potencia a la bomba debe ser seleccionado según la energía a transmitir al fluido. Este requisito se determina según la ecuación de potencia para máquinas hidráulicas<sup>[6]</sup>:

$$\dot{W} = \dot{V} \cdot \Delta P$$

Donde:

$\dot{W}$ : potencia absorbida por el fluido.

$\Delta P$ : diferencia de presión suministrado por la máquina.

En otros términos para utilizar unidades no homogéneas:

$$\dot{W} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta P}{1714 \cdot \eta_{bomba}} : [HP]$$

Con  $\dot{V}$  en galones por minuto,  $\Delta P$  en psi y  $\eta_{Bomba}$  en decimales.

Para un caudal de 3 GPH, tomando un  $\Delta P$  de 120 psi para que supla todas las necesidades de pérdidas en accesorios y tuberías, además futuras instalaciones en el dispositivo, tales como aumento en la longitud de la tubería ó cabeza de succión negativa, y teniendo en cuenta que la boquilla inyectora siempre se le deberá suministrar una presión de 100 psig nominales. En esta clase de bomba la eficiencia se encuentra en valores entre el 70% y 80%, se asume una  $\eta_{Bomba}$  del 70%. Entonces:

$$\dot{W} = \frac{0.05 \cdot 120}{1714 \cdot 0.7} = 5e-3 \text{ HP}$$

Con las condiciones necesarias de potencia y de velocidad de giro se escoge el siguiente motor:

- Marca: Siemens
- Modelo: 1LA7 070-4Y
- Frecuencia: 60 Hz
- Potencia: 0.4 HP (300 W)
- Velocidad de giro: 1640 RPM
- Factor de potencia: 0.77
- Voltaje: 220 V, trifásico.

Para el acople del motor y la bomba se usa un acople tipo dentado con manguito de polietileno, el conjunto es montado en una estructura de lámina de acero HR de 3/16". El montaje realizado se muestra en la figura No 2.

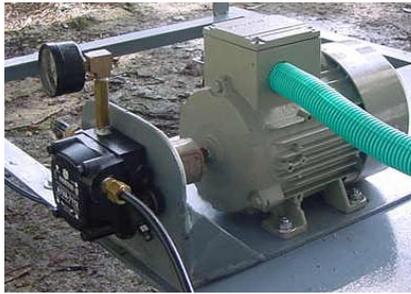


Figura 2 Montaje motor y bomba

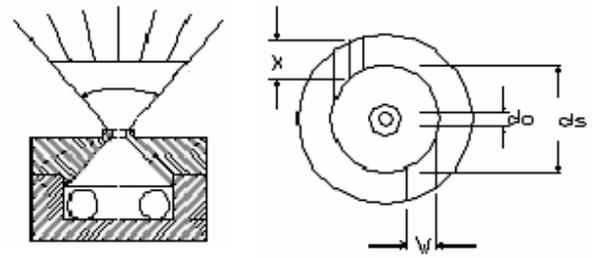


Figura 3 Boquilla de tipo remolino.

### 3.2 Boquilla de inyección

Los métodos de desintegración o atomización varían con la presión de inyección y el tipo de atomizador. En general, en términos cualitativos el mecanismo de desintegración puede ser caracterizado por [7]:

- Estiramiento del combustible en láminas.
- Aparición de ondulaciones y protuberancias.
- Formación de orificios en las láminas.
- Desprendimiento de los orificios de las láminas.
- Desintegración debido a la vibración de las gotas.
- Aglomeración o desprendimiento desde las gotas grandes.

Los diferentes tipos de boquilla usados en la atomización del combustible presentan una gran variedad en rangos de caudales y principios de funcionamiento. El inyector más simple es el de orificio llano con un agujero de longitud  $L$ , y diámetro  $d_0$ . El ángulo de cono de rocío queda entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$  y es afectado más por la viscosidad fluida y tensión superficial que por  $d_0$  o  $L/d_0$ . El uso de tales boquillas simples está limitado debido a su ángulo del cono estrecho y la dispersión típicamente pobre. [9]

Una mejora considerable se logra en comparación al orificio llano por el inyector simplex o pulverizador de remolino mostrado en la figura No. 3. El fluido es obligado a arremolinarse por aberturas tangenciales u otros medios similares. La velocidad alta causa un vórtice del centro aéreo, así, surge el fluido en forma de un cono hueco desde el orificio. El ángulo de rocío puede ser hasta de  $90^\circ$ . Las pérdidas de fricción son una consideración en el diseño de los pulverizadores del remolino. La proporción de  $d_s/d_0$  (ver figura No. 3) debe ser tal que permita obtener el mejor coeficiente de la descarga, los fabricantes realizan pruebas variando estas dimensiones para lograr este objetivo, y proporcionan las condiciones de presión a la entrada para un caudal determinado. El  $L/d_0$  del orificio final debe ser tan pequeño como sea posible, pero en la práctica las consideraciones lo limitan al rango 0.2-0.5. [7]

La escogencia de los ángulos de atomización viene marcada por las condiciones en la instalación, de esta forma, si se desean llamas más cortas y anchas, se deberá escoger un ángulo grande. Las boquillas usadas en los quemadores de cañón de alta presión son comúnmente las de tipo remolino, debido a su economía, y principalmente porque no requieren de otros medios para efectuar la atomización. De esta forma se usarán boquillas comerciales tipo remolino, probando distintos caudales a diferentes ángulos.

| Boquilla No. | Caudal [GPH] | Ángulo [°] | Marca   |
|--------------|--------------|------------|---------|
| 1            | 1            | 80         | Devalan |
| 2            | 1            | 45         | SH      |
| 3            | 1.75         | 30         | HAGO    |
| 4            | 2            | 30         | HAGO    |
| 5            | 2.25         | 45         | HAGO    |
| 6            | 3            | 45         | HAGO    |
| 7            | 3            | 60         | HAGO    |

Tabla 1 Boquillas utilizadas

### 3.3 Diseño del circuito de inyección de combustible

Como se mencionó anteriormente el circuito para la inyección de combustible constará de un depósito de combustible, filtro, bomba de combustible, válvulas de cierre, válvula reguladora de presión, tobera de atomización y tuberías. Adicionalmente se instala un manómetro para propósitos de medición.

Se utiliza un tanque de suministro de combustible, el cual a su vez hará de tanque de almacenamiento.

Debido a que el diesel tiene una conformación muy variable, presentando algunas veces impurezas, y a los factores nombrados anteriormente, es indispensable no poner en funcionamiento el quemador sin un sistema de filtración. El sistema de filtración comprende generalmente de un filtro conectado justo antes de la bomba, Aunque este dispositivo de seguridad se instalará a la entrada de la bomba de combustible, su principal función es proteger la boquilla de suciedades, que puedan obstruir el orificio o impedir la atomización de combustible y causar una sobrepresión en la bomba.

Se construyen muchos tipos de filtros para ACPM. El más sencillo y seleccionado para este quemador es el llamado "de cestilla", el cual es un dispositivo económico

de fácil adquisición y que muestra buen funcionamiento. (Ver figura No. 4) Consiste en que en el interior de un cuerpo cilíndrico va colocada una armadura también cilíndrica, que contiene una red filtrante; el aceite escapa de dicha red y la atraviesa, dejando las suciedades en la malla. Todo el cuerpo va provisto de una envuelta atornillada para la inspección, mantenimiento y conservación del elemento filtrante.

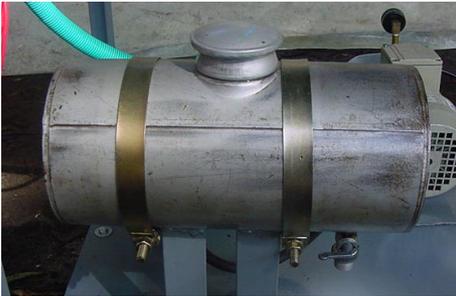


Figura 4 Tanque de suministro y almacenamiento

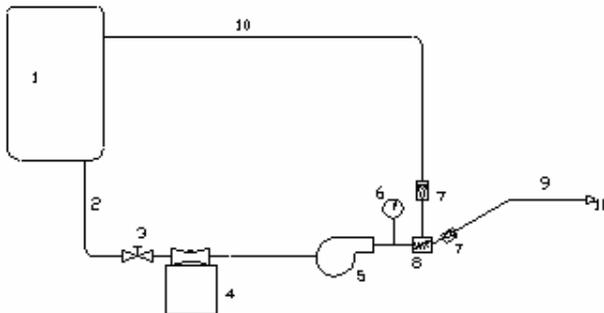


Figura 5 Diagrama del sistema de inyección de combustible

| Número | Accesorio                     |
|--------|-------------------------------|
| 1      | Depósito de combustible       |
| 2      | Línea de succión              |
| 3      | Válvulas de cierre            |
| 4      | Filtro de combustible         |
| 5      | Bomba de combustible          |
| 6      | Manómetro                     |
| 7      | Válvula cheque                |
| 8      | Válvula reguladora de presión |
| 9      | Línea de descarga             |
| 10     | Línea de retorno              |
| 11     | Boquilla de inyección         |

Tabla 2 Elementos del sistema de inyección de combustible

#### 4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AIRE.

##### 4.1 Ventilador

Para el diseño ó selección de un ventilador es necesario entonces conocer la aplicación, el caudal ( $\dot{V}$ ) y la presión de trabajo (cabeza estática SP) [8]. Para el propósito buscado la aplicación específica es quemado de combustible ACPM en un quemador alta presión tipo

cañón, y es la tendencia es utilizar ventiladores centrífugos en estos dispositivos.

El caudal en un ventilador se calcula según la aplicación, así, para los quemadores de combustible, el caudal debe ser determinado según el balance químico de la composición del combustible a quemar, ó la relación aire combustible descritas anteriormente. Así la máxima cantidad de combustible que se quema son 3 GPH, y según los resultados mostrados en la tabla No. 3 para quemar completamente con el 100% de aire teórico esta cantidad de combustible son necesarios alrededor de 85 CFM (pies cúbicos por minuto) de aire. Cabe anotar que la combinación de unidades no es producto del capricho de los autores, simplemente cuando se solicita información a los proveedores y constructores de ventiladores, estos especifican el caudal generado por el en CFM; y para las bombas los caudales generalmente son expresados en GPH.

Se desean hacer pruebas hasta con un 200% del aire teórico, entonces se diseña un ventilador que entregue hasta 200 CFM.

La cabeza estática (SP) es debida a la presión de compresión existente en el fluido y sirve para asegurar que el flujo venza todas las resistencias que tenga a su paso, ya sea por la fricción en el ducto ó por la resistencia de otros elementos involucrados en el sistema de ventilación.<sup>[9]</sup> La cabeza estática se expresa generalmente en milímetros ó pulgadas columna de agua.

Para el cálculo de la cabeza estática del ventilador hace uso de la siguiente expresión:

$$SP = \sum_{i=1}^n SP_i$$

Donde n igual al número de tramos del ducto y  $SP_i$  igual a la perdida i. Esta expresión tiene en cuenta cada factor, elemento y accesorio donde existirán caídas de presión.

Analizando las diferentes posibles disposiciones que tiene el quemador y teniendo en cuenta que para quemadores de caudales por debajo de 100 kg/h de combustible las pérdidas de presión en estos dispositivos no excede de 5 mm.c.a.<sup>[10]</sup>, teniendo en cuenta que el ducto que presenta mayores pérdidas es el redondo con diámetro interno 10 cm y un SP de 0.114 in.c.a, el SP para el ventilador será de 0.114 pul.c.a. mas 0.2 pul.c.a, es decir, 0.32 pul.c.a, que corresponde a la suma de las pérdidas del ducto con mayores pérdidas. Por esta razón y teniendo en cuenta un sobredimensionamiento para futuras innovaciones en el diseño y experimentos, se diseña un ventilador de 0.5 pul.c.a. de SP.

Así con lo parámetros del ventilador establecidos, se diseña el ventilador utilizando la metodología propuesta en las referencias [8] y [11]. Dicha metodología de

diseño es sistematizada por los autores del presente artículo, usando una hoja de cálculo, los resultados obtenidos al correr la hoja de cálculo para el ventilador solicitado, entre otros, son los siguientes:

| DIMENSIONES:                  |            |                |
|-------------------------------|------------|----------------|
| Ancho del rotor succión b1 =  | 7.0329     | Cm             |
| Ancho del rotor descarga b2 = | 6.5306     | Cm             |
| Lado A de la descarga =       | 18.0045399 | Cm             |
| Lado B de la descarga =       | 16.3264198 | Cm             |
| Rmax =                        | 18.3842745 | Cm             |
| Rd = D1/D2 =                  | 0.65       |                |
| Área de descarga: As =        | 0.02939497 | m <sup>2</sup> |

Tabla 3 Algunos parámetros de diseño del ventilador

Después de analizar las dos alternativas: construir o comprar el ventilador, se decide comprarlo de acuerdo a los parámetros obtenidos al aplicar la metodología de diseño. Es comprado un ventilador con las siguientes características:

- Marca: Niche Fans
- Potencia nominal: 135 W, suministrados por un motor eléctrico incorporado.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Velocidad de giro: 1350 RPM
- Caudal: 0 - 266 CFM
- Cabeza estática (SP): 0 – 0.8 pul c.a



Figura 6 Ventilador

**4.2 Ducto de alimentación de aire**

El ducto de alimentación de aire escogido es un tubo de acero HR de 5", como la boca de descarga del ventilador es de sección rectangular se diseña y construye la transición que acoplará ambas secciones. (Ver figura 7)



Figura 7 Transición

**4.2 Regulación del caudal de aire**

Para regular la cantidad de aire que entra al proceso de combustión existen dos alternativas: Variar la velocidad de giro del ventilador, situación que también afecta la cabeza estática o construir un dispositivo o válvula que controle este flujo. Se toma la decisión de diseñar y construir una válvula tipo mariposa que se dispone en el interior del tubo o cañón por donde pasa el aire de combustión. Esta válvula se cierra o abre usando un mecanismo sencillo de rueda dentada y tornillo sin fin. Ver figura No. 8.

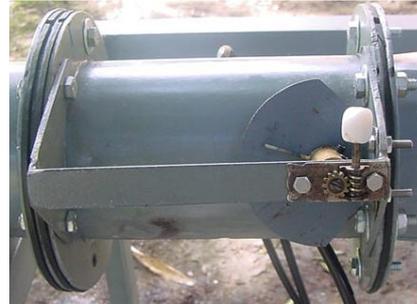


Figura 8 Mecanismo de control del flujo de aire

**5. DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE ENCENDIDO DEL QUEMADOR.**

Para el sistema de encendido es necesario generar un arco eléctrico, de alrededor de 10000 V, en la mezcla de aire y combustible durante un tiempo suficiente para que el proceso de combustión se autosostenga. Este arco es generado usando un par de electrodos, marca Westwood de 9/16"X6", los cuales son alimentados por un transformador de que eleva el voltaje de 120V a 10000V. En la figura No. 9 Pueden observarse los electrodos, además de una de las boquillas de combustible.

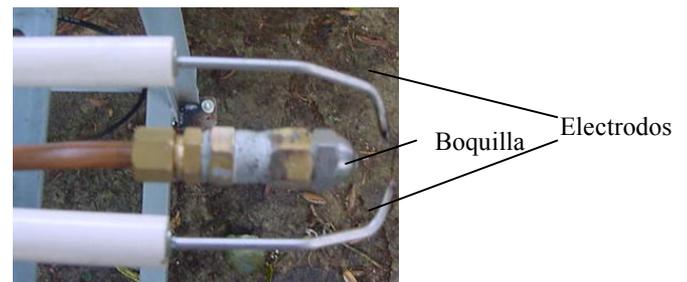


Figura 9 Electrodos y boquilla de combustible

**6. ENSAMBLE LOS SISTEMAS DE OPERACIÓN DEL QUEMADOR.**

Para ensamblar el quemador se diseñó y construyó una estructura en acero estructural A-36 con ángulos de 1.5"x3/16" y láminas de 1/8" de espesor. Para diseñar la estructura se tiene en cuenta el peso de los elementos que se montan y un peso adicional que corresponde a equipos que podrían montarse posteriormente sin necesidad de realizar cambios en la configuración estructural.

Adicionalmente como el dispositivo diseñado y construido tiene propósitos experimentales se montan ruedas para que pueda ser transportado sin ningún inconveniente, estas ruedas se seleccionan de acuerdo al peso total del quemador.

Para el control del quemador se usa lógica de contactos. Al activar el pulsador de inicio, arranca el ventilador durante un tiempo que es definido por el usuario manipulando un temporizador, después de este tiempo arranca a funcionar la bomba de combustible y los electrodos. Los electrodos se mantienen encendidos durante un tiempo determinado por el usuario que asegure que la llama se autosostenga, mediante otro temporizador, al finalizar este tiempo se apagan los electrodos y quedan encendidos ventilador y bomba. Para apagar el quemador se activa el pulsador de parada y todos los sistemas salen de operación. Ver figura No.10.

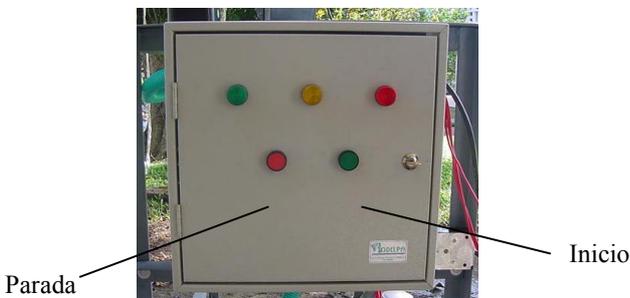


Figura 10 Tablero de control

La configuración final del dispositivo diseñado y construido se muestra en la figura No. 11.

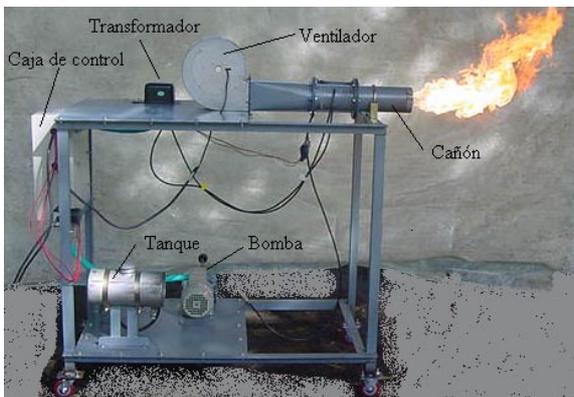


Figura 11 Quemador experimental de ACPM tipo cañón de alta presión.

## 7. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un quemador experimental de ACPM tipo cañón de alta presión que posee entre otras las siguientes especificaciones:

- Flujo de combustible: 0 – 3 GPH
- Flujo de aire: 0 – 250 CFM
- Presión del combustible: 100 – 150 psig

Este dispositivo abre la puerta para que en la Universidad Tecnológica de Pereira y específicamente en el grupo de investigación en Sistemas Térmicos y potencia Mecánica se sigan desarrollando proyectos que involucren la combustión y obviamente la calidad del aire.

Los autores desean expresar sus agradecimientos a los profesores: Carlos Alberto Orozco, José Ignacio Huertas, Juan Carlos Burbano y Alexander Díaz quienes han realizado valiosos aportes como co-investigadores en este proyecto.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Instruction manual Model SF: Oil Burner. R.W. BECKETT Corporation.
- [2]. BATHIE, William W. *Fundamentals of gas turbines*. Second edition. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [3]. ECOJETROL. Empresa Colombiana de Petróleos. Disponible en internet: [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co)
- [4]. KUO, Kenneth K. *Principles of combustion*. First edition. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [5]. VAN WYLEN, Gordon, Claus Borgnakke and Richard Sonntag. *Fundamentals of Thermodynamics*. Fifth edition. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [6]. WARRING, R.H. Selección de bombas, Sistemas y aplicaciones. España: Editorial Labor. 1977
- [7]. BORMAN, Gary and Kenneth Ragland. *Combustion Engineering*. First edition. Singapore: McGraw Hill. 1998.
- [8]. OROZCO, C; TIBAQUIRÁ, Juan y DÍAZ, A. *Determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrífugo a partir de datos de catálogo y de laboratorio* SCIENTIA ET TECHNICA. Septiembre 2001 No. 16. Páginas 113 a 118.
- [9]. DIAZ, A.; Sánchez R. "Diseño construcción y pruebas de un ventilador centrífugo". Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. 1995.
- [10]. SALVI, G. *La combustión, teoría y aplicaciones*. 2ª edición. Madrid: Editorial Dossat. 1975.
- [11]. OROZCO, C.A. "Conceptos acerca del diseño de ventiladores centrífugos". SCIENTIA ET TECHNICA. Año 1, No 1, pp. 60-70. 1995.