

## PUESTA A PUNTO DE UN QUEMADOR EXPERIMENTAL DE ACPM DE ALTA PRESIÓN TIPO CAÑÓN

### RESUMEN

Este documento presenta una descripción de las labores que se realizaron para poner a punto el quemador desarrollado en la primera etapa 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*”.

**PALABRAS CLAVES:** Quemador, ACPM, Cámara de combustión

### ABSTRACT

*This paper shows a brief description of the tasks that were carried out in order to set the performance of a burner developed in the project: “Design, construction, control and tests of an experimental diesel high pressure burner to the Thermal Lab”.*

**KEYWORDS:** Burner, Diesel, Combustion chamber.

### 1. INTRODUCCIÓN

Se presenta a continuación una descripción de las actividades de puesta a punto del quemador desarrollado en 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*”, enmarcado dentro de las labores del grupo de investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.T.P.

En el artículo: “*Diseño y construcción de un quemador experimental de ACPM de alta presión tipo cañón*” [1], publicado en la revista SCIENTIA ET TECHNICA No. 22 del año 2003, se describen las tareas realizadas para construir el quemador mencionado, así como los diferentes sistemas que lo componen.

El quemador experimental tipo cañón de alta presión (QETCAP) tiene las siguientes especificaciones básicas:

Sistema de Inyección de Combustible:

- Una sola boquilla de inyección de combustible
- Tubería de plástico.
- Bomba de engranajes que opera a 1800rpm, 150psig.
- Motor trifásico de 1/3 de caballo de potencia
- Electroválvula de cierre, 2/2.
- Filtro de Combustible.
- Tanque de combustible de 0.8 galones.

**JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ G.**

Ingeniero Mecánico, M. Sc.  
Profesor asistente  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
U.T.P.  
juantiba@utp.edu.co

**JULIÁN M. MAYA R.\***

**ANDRÉS E. MUÑOZ V.\***  
\*Estudiantes último semestre  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
U.T.P.

Sistema de alimentación de aire:

- Ventilador centrífugo:
- Sistema de regulación de aire con válvula mariposa accionada de forma manual
- Estabilizadores de llama ubicados en el extremo frontal del cañón

Acometida eléctrica:

- Control por lógica de contactos.
- Encendido con electrodos polarizados a 10000V.
- Transformador.

Después de evaluar el funcionamiento del quemador se puede observar la necesidad de implementar algunos aditamentos y de rediseñar algunos de los sistemas para mejorar su operación. Entre las características que se deben corregir se observaron las siguientes:

- La llama producida por el quemador se encuentra expuesta a la atmósfera, se hace necesario entonces diseñar y construir una cámara de combustión que permita tener un control más adecuado para los parámetros que gobiernan el proceso de combustión.
- Al inicio de operación del quemador el ventilador debe encenderse primero para hacer un barrido de los gases de combustión remanentes, pero no existe un mecanismo que asegure que la válvula de mariposa que regula el flujo de aire se encuentre completamente abierta, para que dicho barrido de gases sea efectivo.

- Al presentarse una extinción de la llama, la bomba de alimentación de combustible continúa funcionando ocasionando desperdicio de combustible y acumulación de ACPM en el cañón del quemador.
- No es posible conocer exactamente cual es la cantidad de combustible que entrega la bomba, con lo cual se podría establecer la relación aire-combustible.

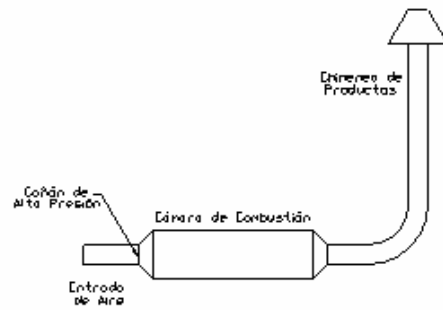


Figura 1. Esquema de la cámara de combustión

## 2. LABORES DESARROLLADAS

### 2.1 Cámara de Combustión

Una de las conclusiones al finalizar la primera etapa del proyecto fue la de construir una cámara de combustión para capturar la llama y aislarla de los factores externos. Sin la cámara es difícil regular la relación aire-combustible, ya que no se sabe que porcentaje del aire en combustión proviene del ventilador del quemador y que cantidad proviene de los alrededores del quemador.

La cámara de combustión es el recinto donde ocurre la reacción química, que conduce a la liberación de energía en forma de calor. Este dispositivo es necesario para mitigar las altas temperaturas existentes en los procesos de combustión. Debido que el uso de algunos materiales metálicos está restringido por consideraciones metalúrgicas, y los convenientes para este uso resultan de alto costo, las cámaras de combustión son construidas de materiales refractarios como ladrillos o cementos especiales. Después de la llama propiamente dicha, en la zona de presencia de gases producto, se utilizan metales para el aprovechamiento del calor disponible. Así, la cámara de combustión debe ser tan larga como para confinar en ella toda la llama. En otras palabras, el tiempo de reacción debe ser menor o igual a el tiempo de permanencia [2].

La geometría de las cámaras de combustión es tema de amplio desarrollo para grandes compañías, quienes han modificado las formas básicas para el mejor aprovechamiento de las condiciones aerodinámicas, especialmente en la aplicación de turbinas a gas. La forma más simple y utilizada es la que se desarrolla en este trabajo, la cual está esquematizada en la figura 1. Las mejoras consisten entre otras, en el aprovechamiento de la diferencia de densidades para la evacuación de los gases.

Las dimensiones de estas cámaras vienen dadas en catálogos de fabricantes de quemadores, o bajo normas tales como las españolas [6]. Estas dimensiones son dadas en función del caudal de combustible, y son proyectadas para obtener una reducida área de calentamiento, con el volumen más pequeño posible.

Teniendo en cuenta las dimensiones especificadas para cámaras de combustión para quemadores de ACPM, por las normas de la referencia [3], y según recomendaciones de catálogo del fabricante "Beckett" de la referencia [4], se determinan las dimensiones recomendadas para el QETCAP que tiene un requerimiento de caudal de combustible de hasta 3 gal/h.

Una dimensión importante es la longitud de la boca o garganta de la cámara. Este difusor está construido por materiales refractarios como el resto de la bóveda. De esta forma el ángulo total de apertura de la boca debe ser de unos 70°. Un ángulo mayor ocasionaría una dispersión de aire a pequeña distancia del quemador, y uno más pequeño impediría una expansión adecuada de los gases durante la combustión. [2]

Así las dimensiones principales para esta aplicación son:

- Diámetro del cañón:  $D_c = 12$  cm.
- Ángulo total de la garganta o difusor: 70°.
- Diámetro interno de la cámara:  $D_i = 40$  cm.
- Longitud de la cámara:  $L = 50$  cm.
- Diámetro de la salida de productos:  $D_p = 20$  cm.
- Ángulo total en la tobera de la cámara: 70°.

La segunda parte en el diseño de la cámara de combustión, después de tener las medidas, es escoger adecuadamente los materiales con los que se construirá. La selección de los materiales debe tener en cuenta diversos factores, como lo son la temperatura máxima de trabajo, las condiciones de operación, la minimización del calor desperdiciado por las paredes de la cámara, y la viabilidad económica.

La temperatura máxima de trabajo se relaciona intrínsecamente con la temperatura de llama adiabática, debido a que es la temperatura más alta que se puede

alcanzar, entonces, se debe diseñar con esta. Con el símbolo  $\tau$  se define la razón entre la temperatura de la superficie de caldeo, y la temperatura de llama adiabática. Para quemadores industriales esta relación no supera en ningún caso el valor de 0.6, es decir la temperatura de las superficies de caldeo, no superan el 60% de la temperatura de llama adiabática, eso si fuera posible que se presentara este caso idealizado [2].

Conociendo la temperatura de llama adiabática para el diesel, y asumiendo la temperatura máxima de trabajo de 60% de la adiabática, es posible seleccionar un ladrillo refractario o un cemento apropiado para el caso. En Colombia, los fabricantes más importantes de este tipo de productos es "ERECOS" (Empresa de refractarios colombianos S.A.) Así por medio de catálogos de esta empresa., se decide seleccionar el cemento CONCRAX 1500 , con una temperatura máxima de trabajo recomendada de 1540 °C y con un módulo de ruptura de 12 MPa.[5]

$$T_{\text{MAX TRAB}} = 0.6 * 2140 \text{ °C} = 1284 \text{ °C}.$$

La cámara diseñada y construida se muestra en la figura 2, se observa que la cámara tiene dos orificios de 1-3/8" de diámetro interior, uno de los cuales se emplea para instalar una mirilla que permite la visualización de la llama dentro de la cámara, y el otro orificio se puede utilizar para introducir en la misma, elementos como medidores de temperatura o sondas para el monitoreo de gases. Adicionalmente es diseñada y construida una estructura para permitir que la cámara de combustión pueda ser transportada y acoplada al quemador fácilmente ya que su peso es de alrededor de 400 kg.



Figura 2. Cámara de combustión y estructura que la soporta

La mirilla, que permite la visualización de la llama dentro de la cámara a través de los orificios de 1-3/8, consta de una lente de vidrio de borosilicato Pyrex® de 32 mm de diámetro. El Pyrex® puede ser utilizado sin problema hasta los 232°C, y generalmente resiste choques térmicos de hasta 120°C. Para instalarlos se utilizó como carcasa el extremo roscado de un tubo de hierro galvanizado de

2" con su respectivo tapón. El tapón se perforó y la lente se fija mediante una arandela y un retenedor.

Después de construida la cámara de combustión, se observó la necesidad de crear un sello entre el cañón y la entrada de la cámara de combustión, de forma que se pudiera minimizar el escape de gases en esta unión. Para esto se construyó un cono truncado de hoja de zinc. También se reemplazó uno de los empaques de caucho ubicados en la brida del cañón por uno de asbesto. Esto con el fin de aislar térmicamente el extremo frontal del cañón del resto del quemador.

## 2.2 Barrido de gases

El barrido de gases consiste en accionar el ventilador antes de que se encienda la llama, con el fin de hacer pasar una corriente de aire por la cámara de combustión, para evacuar los gases remanentes de combustiones anteriores. Esto con el motivo de evitar posibles explosiones. Para quemadores que consumen entre 0 y 30 kg/h se recomienda un tiempo de barrido mínimo de cinco segundos [6]. Es importante tener en cuenta que el dispositivo que regula el paso de aire a la cámara de combustión debe estar en posición completamente abierta, o por lo menos en posición de consumo suficiente para sostener la llama. El quemador cuenta originalmente con temporizadores que garantizan este tiempo de barrido.

Para garantizar que la válvula de mariposa este completamente abierta cuando se realice el barrido de gases se hace uso de un potenciómetro que sirve para conocer en todo momento en que posición se encuentra la válvula de mariposa. Dicha información es procesada por el programa computacional diseñado para el manejo del QETCAP [7], que se encarga de que al momento de iniciar la operación del quemador sea accionado un motor paso a paso, acoplado al eje de la válvula, que la abre completamente.

El potenciómetro seleccionado tiene una resistencia lineal que varía entre 0 y 100 kΩ en una vuelta, eje de 13 mm de longitud y 1/8" de diámetro. Ver figuras 3 y 4.

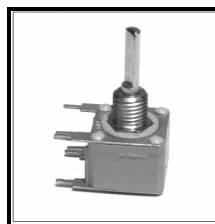


Figura 3. Potenciómetro sin instalar

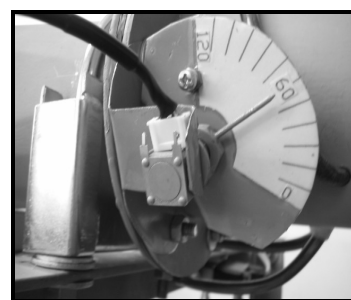


Figura 4. Potenciómetro instalado

### 2.3 Implementación del sensor de llama

Con el objetivo de solucionar el inconveniente presentado cuando la llama se extingue y la bomba continúa en operación ocasionando un desperdicio de combustible, se decide instalar un sensor de llama que se encargará de informar al programa computacional que gobierna el QETCAP si hay o no llama para que, si es el caso, apague la bomba de alimentación de combustible y el ventilador.

Para el quemador se ha seleccionado el detector de llama C554A de Honeywell (Ver Figuras 5 y 6) el cual consta de una fotocelda de sulfuro de cadmio y de unos electrodos que se adhieren a esta para transmitir una señal eléctrica al control primario que opera al quemador. En la oscuridad el sulfuro de cadmio tiene una alta resistencia eléctrica, lo que impide el paso de la corriente. A la luz visible, la celda tiene una baja resistencia a la corriente, permitiendo el paso de esta. Así que cuando la llama se extingue cesa el paso de la corriente, generando una señal eléctrica que se encarga de detener el quemador.

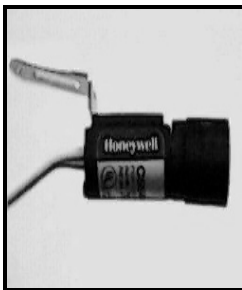


Figura 5. Sensor de llama sin instalar

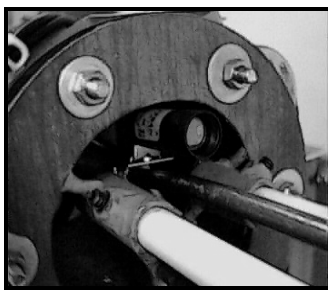


Figura 6. Sensor de llama instalado en el quemador

### 2.4 Implementación de los medidores de caudal y presión para el flujo de combustible.

Las siguientes condiciones de operación se tuvieron en cuenta para la selección del medidor de flujo:

- Presión. La presión a la que se recomienda operar las boquillas del quemador es de 100 psig. Con esta presión se garantiza el consumo que se especifica en la boquilla. Sin embargo, es posible ajustar el regulador de presión de la bomba hasta permitir una presión máxima de 150 psig.
- Temperatura. La tubería y el combustible permanecen a temperatura ambiente, por lo tanto, el flujómetro no tendrá que soportar elevadas temperaturas.
- Caudal. El rango de operación del quemador está determinado por las boquillas que se instalen. La boquilla de menor caudal es de 1 GPH (galones por hora) y la de mayor caudal es de 3 GPH. Es posible obtener 0.285GPH con la boquilla de 1 GPH

nominal si se ajusta la presión en la bomba a 75psig, y hasta 3.7 GPH al aumentar la presión hasta 150psig con la boquilla de 3 GPH nominales.

- Viscosidad. Para el ACPM es de 3.6 centiStokes[1].
- Grado de opacidad. El ACPM es un líquido traslucido.
- Material particulado. El ACPM es un líquido libre de material particulado.

Se seleccionó el medidor de flujo modelo DPM de marca Kobold (Ver figuras 7 y 8). Este utiliza el principio de la rueda de Pelton para medir el caudal de agua y otros fluidos de baja viscosidad. El fluido pasa por una tobera a la entrada del cuerpo del medidor y es redireccionado de forma precisa hacia los alabes de la turbina Pelton.

Esto hace que la turbina gire a una velocidad angular que es proporcional al caudal. El movimiento de la turbina es detectado mediante un sensor óptico. La señal que sale del sensor óptico es procesada, ya sea como un pulso amplificado, o como una señal de 4-20mA, cualquiera de ellos proporcional al caudal. Adicionalmente a su diseño de tamaño compacto, dado que el flujo a la entrada es redireccionado mediante una tobera, no se requieren tramos de tubería largos antes o después del medidor, además de que puede ser instalado en cualquier orientación.



Figura 7. Medidor de caudal seleccionado

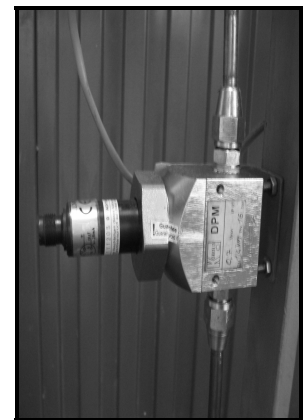


Figura 8. Medidor de caudal montado

Las siguientes condiciones de operación se tuvieron en cuenta para la selección del medidor de presión:

- Presión: La presión de trabajo para todas las boquillas del quemador es de 100 psig.
- Temperatura. La tubería y el combustible permanecen a temperatura ambiente. Este factor es importante tenerlo en cuenta ya que en particular la exactitud se ve afectada por el nivel de temperatura al cual esta sujeto el medidor.
- Vibraciones: El medidor de presión no va estar sujeto a vibraciones.

- Características del fluido de trabajo: El ACPM es un combustible traslucido, poco viscoso, no abrasivo y no corrosivo, por lo tanto el medidor seleccionado no requerirá de ninguna protección.

El medidor seleccionado es el sensor de presión marca KOBOLD SEN-3296 (Ver figuras 9 y 10), él cual utiliza la tecnología de diafragma interno, ideal para las más altas exigencias de la industria. Su diseño compacto reduce los costos de instalación y facilita el montaje del sensor. Debido a su diseño en acero inoxidable es perfecto para mediciones en fluidos corrosivos, además de soportar muy bien altas cargas mecánicas.

Datos técnicos:

- Tecnología: Membrana interna.
- Tipo de Presión: Manométrica.
- Cuerpo : Acero inoxidable 1.4301
- Sensor: Película delgada.
- Temperatura de trabajo: 40 a 85 °C
- Presión : 0 hasta 16 bar
- Rango de Medición de 0 hasta 16 bar.
- Señal de salida: 4 a 20mA.
- Conexión eléctrica DIN 43650 con caja de conectores



Figura 9. Medidor de presión seleccionado



Figura 10. Medidor de presión montado

## 2.5 Rediseño del sistema de tuberías de combustible

El diseño original consta de tubería de aire en Nylon. El diseño que se propone tiene las tuberías en cobre, y los racores son de tipo bocín (o flare). La principal desventaja que tiene es la poca maniobrabilidad. Como ventajas presenta:

- Sirve para ayudar a sostener los elementos que van en la línea, como sensores y válvulas.
- La confiabilidad que se tiene con los racores tipo flare en la tubería de cobre, dado que son acoples que se pueden desarmar muchas veces sin que se deterioren y que además tienen un sello muy confiable, si se instalan correctamente, lo que reduce la probabilidad de fugas de combustible.

El sistema de tubería de combustible original consta de una sola boquilla a la salida, se decidió que si se usan dos boquillas pueden tenerse tres diferentes puntos de operación del quemador, usando una de las boquillas o usando las dos simultáneamente. Es así como se tendrán tres caudales diferentes, manteniendo una presión de 100 psig en el sistema. El circuito original tiene una electroválvula de dos vías y dos posiciones. Adicionando otra electroválvula del mismo tipo se tiene la posibilidad de instalar la otra boquilla. Así, el caudal de combustible se puede utilizar en cuatro posiciones: alto, medio, bajo, y apagado (a diferencia del sistema on-off original). Esto se logra, respectivamente, con: dos válvulas abiertas alimentando las dos boquillas, solo una válvula abierta alimentando la boquilla de mayor caudal, solo una válvula abierta alimentando la boquilla de menor caudal, y ambas válvulas cerradas. En las figuras 11 y 12 aparecen las electroválvulas y las boquillas montadas.



Figura 11. Dos electroválvulas instaladas

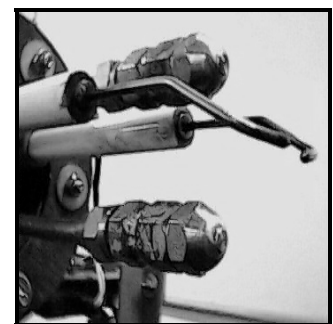


Figura 12. Dos boquillas

## 2.6 Rediseño del marco del QETCAP

En el diseño original el cañón está apoyado en la carcasa del ventilador y en un ángulo que une los dos lados de la estructura. Sobre este ángulo se atornilla una abrazadera que sujeta la punta del cañón. Esta configuración no es conveniente dado que, cada vez que se desmonta la punta del cañón, el resto del cañón queda mal apoyado, corriendo el riesgo de dañar la carcasa del ventilador y otros elementos. La punta del cañón es una pieza que se tiene que desmontar con frecuencia, cada vez que se quiere cambiar una boquilla, ajustar la posición de los electrodos, acceder a la válvula mariposa y otros. Se propone correr el ángulo de apoyo para que la abrazadera sujete el cañón en la parte que está adyacente al ventilador de tal forma se trasladó este ángulo y también se recortó la longitud de la estructura del quemador de forma que las ruedas delanteras también se trasladaron la misma distancia que el ángulo que soporta el cañón. Esta medida también hace que la punta del cañón pueda entrar una mayor distancia dentro de la cámara de combustión, dado que evita que la estructura del quemador choque con la estructura que soporta la cámara de combustión.



Figura 13. QETCAP después de modificaciones

En la figura 13 se muestra el QETCAP después de las modificaciones realizadas, puede apreciarse el computador desde donde se realizan operaciones de control, el quemador como tal y la cámara de combustión.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Después de la implementación de la cámara de combustión es posible utilizar todo el rango del caudal de aire disponible.
- La cámara de combustión garantiza que el aire que hace parte de la reacción química es efectivamente el entregado por el ventilador y además permite medir la temperatura y composición de los gases de combustión que salen de ella.
- La utilización del sensor de llama asegura que no haya desperdicio de combustible cuando por alguna circunstancia la llama se extinga.
- La selección y montaje de los sensores de presión y caudal garantiza que las mediciones de los parámetros del combustible sean confiables y puedan utilizarse en el estudio del proceso de combustión.
- Es de anotar que en esta etapa del proyecto también se diseñó e implementó un programa computacional, que se comunica con el QETCAP usando una tarjeta de adquisición de datos y una interfase desarrollada en LabView para el registro de los mismos. Dicha labor fue desarrollada por los estudiantes Jorge Humberto Alzate Q. y Héctor Manuel Calvo Mejía como proyecto de grado, dirigidos por el profesor Germán Andrés Holguín L. quienes pertenecen a la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la U.T.P.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] TIBAQUIRÁ, Juan; Carmona, Mauricio, Acosta Andrés. Diseño y construcción de un quemador experimental de ACPM de alta presión tipo cañón. SCIENTIA ET TECHNICA No. 22 del año 2003
- [1] GIULIANO, Salvi. La combustión, teoría y aplicaciones. Madrid: Dossat 1975.
- [1] Grupo combustión industrial del Perú. Disponible en Internet:  
[www.combustionindustrial.com/combustibles.html](http://www.combustionindustrial.com/combustibles.html)
- [1] Instruction manual model: Oil Burner. R.W. BECKETT Corporation.
- [1] ERECO S.A. Empresa de refractarios colombianos S.A. Disponible en Internet: [www.erecos.com](http://www.erecos.com)
- [1] REGLAMENTO DE HOMOLOGACIÓN DE QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN INSTALACIONES FIJAS. España. 1975. Numeral 4.2.3.4.1. Disponible en Internet:  
<http://www.caloryfrio.com/normas.pdf>
- [1] ALZATE, Jorge; Calvo, Héctor. Automatización de un quemador experimental tipo cañón de alta presión de ACPM para uso didáctico. Proyecto de grado. F.I.E. – U.T.P. 2004.