

Diseño y construcción de un quemador de aire inductor

*Camilo Martínez**, *Mario Cardona** y *Andrés Amell Arrieta***

(Recibido el 24 agosto de 2000)

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de una investigación realizada con el fin de obtener parámetros de diseño, construcción y operación de los quemadores de aire inductor, muy utilizados en los sistemas de combustión industriales, en diversos procesos como: fusión de metales (hornos de fundición), calentamiento de fluidos (calentadores de tubos inmersos), producción de vapor (calderas), procesos de secado, etc.

Para el logro de dichos objetivos se construyó un prototipo con una modulación de potencia térmica de 6 a 52 kW, que opera adecuadamente tanto con gas natural como con GLP. El quemador se construyó con base en el procedimiento de diseño (know how) desarrollado según los planteamientos teóricos de las diferentes referencias bibliográficas y el conocimiento del *Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas de la Universidad de Antioquia*. Sin embargo, con dicho procedimiento se dimensiona solamente el mezclador del quemador y cinco parámetros se deben seleccionar por el diseñador: potencia térmica del quemador, tasa de aireación primaria, contrapresión en la zona de combustión, presión de admisión del aire y el gas combustible por utilizar. El diseño de las cabezas se basa en las investigaciones ya realizadas por el grupo Ciencia y Tecnología del Gas: una monopuerto y una de barra (tipo flauta), con sus respectivos sistemas de estabilización de llama.

----- *Palabras clave:* coeficiente de pérdida de carga, relación aire/gas, modulación de potencia, sección eficaz, cabezas monopuerto y de barra, contrapresión en la cámara (zona) de combustión, estabilización de llama, venturi, inducción.

Design and construction of an air inductor burner

Abstract

This article presents research results performed with the purpose of obtain design parameters, construction, and air inductor burner operation, which are used in industrial combustion systems, in several processes such as: metal fusion (fusion

* Estudiantes Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. ealternativa.ingenieria@udea.edu.co, camaro75@uol.com.co.

** Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Director del Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. anamell@instru.udea.edu.co.

furnaces), fluids heating (immerse heating tubes), steam production (steam boiler), drying processes, etc.

In order to achieve such objectives, a prototype with thermal power modulation from 6 to 52 kW, was built to be either operated with natural gas or with LPG. The burner was built taking in mind the know how (design procedure) developed according to theoretical schemes of different bibliographic references and knowledge of the *Research Group in Gas Science and Technology of the University of Antioquia*. However, with such procedure only the burner mixer is dimensioned and five parameters must to be selected by the designer: burner thermal power, primary aeration ratio, counterpressure at combustion chamber, air pressure admission and gas fuel intended to use. For head design we took in mind research done before by the Group of Science and Technology in Gas Research: monoport and bar burner heads with their respective stabilization flame systems.

----- *Key words:* charge loss coefficient, air/gas volume ratio, power modulation, effective section, monoport and bar burner heads, backpressure in the combustion chamber, flame stabilization, venturi, induction.

Introducción

La realización de cualquier actividad, sea en la vida diaria o en el ámbito de la producción económica, requiere siempre de un consumo de energía determinado. Por la segunda ley de la termodinámica sabemos que es imposible realizar un trabajo sin degradar la energía, es decir, realizarlo sin pérdidas de energía, como: combustión incompleta, pérdidas de calor al ambiente, pérdidas por fricción, pérdidas en transmisión de potencia, etc.

La imposibilidad de lograr eficiencias del 100% en los procesos de conversión y transferencia de energía, hace necesario que se preste especial atención a los quemadores, en los cuales se convierten (y degradan) grandes cantidades de energía química de un combustible en calor, proceso denominado "combustión". Se observa, en los últimos años, el auge de los combustibles gaseosos, los cuales vienen desplazando a los combustibles líquidos en los sistemas de combustión, en todos los ámbitos: industrial, comercial y residencial. El uso de los gases combustibles se asocia inmediatamente con los *quemadores de inducción*, en los cuales se aprovecha la energía de presión del gas o del aire para arrastrar al otro hasta la zona de combustión por efecto venturi. El Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas se ha especializado en el estudio de los combustibles gaseosos y el diseño de sistemas de combustión. En este orden de ideas surgió la necesidad de hacer una investigación sobre los quemadores de aire inductor, ya que son muy utilizados en los equipos industriales por sus grandes ventajas sobre otros tipos de quemadores.

1. Consideraciones teóricas

1.1 Definiciones

- **Quemador.** Es un órgano que permite realizar la reacción de combustión entre un combustible y un comburente (oxígeno del aire) de manera controlada y regulable, es decir, debe asegurar la aportación adecuada de am-

bos para obtener la potencia calórica requerida, de tal forma que se transfiera eficientemente el calor generado a la carga. Un quemador de gas, sea de aire inducido o de aire inductor consta, entre otros, de los siguientes elementos: un inyector, un venturi, una cabeza y una conexión entre estos dos últimos (portacabeza).

- **Venturi.** Es simplemente una restricción al flujo de un fluido en una tubería. Consta de un tramo convergente aguas arriba y de un tramo divergente aguas abajo. Algunos autores [1] recomiendan un cuello cilíndrico entre el convergente y el divergente. El venturi se constituye en el mezclador de un quemador de inducción, ya que la restricción al flujo aumenta la velocidad del fluido disminuyendo su presión (*principio de conservación de la energía*), fenómeno que se aprovecha para hacer la succión del gas o del aire, según el caso.
- **Quemador de aire inductor.** Es aquel en el cual el aire arrastra el gas hasta la zona de combustión por efecto venturi.
- **Sección eficaz (ficticia equivalente).** Una sección eficaz S es aquella que tiene en cuenta el coeficiente c de descarga de la sección real A : $S = cA$. Para la cabeza del quemador se tienen en cuenta también las temperaturas T_m y T_b de la mezcla en las secciones A_n y A_b , respectivamente (véase figura 1):

$$S_b = cA_b \sqrt{(T_m / T_b)} \quad (1)$$

S_b : sección eficaz de la cabeza del quemador.

c : coeficiente de descarga.

A_b : área seccional de la cabeza, (m^2).

T_b y T_m : temperaturas de la mezcla en las secciones A_b y A_n , respectivamente.

- **Coefficiente de pérdida de carga (presión).** Es una medida de la caída de presión en un elemento determinado: mezclador, tubería, portacabeza, cabeza, etc.

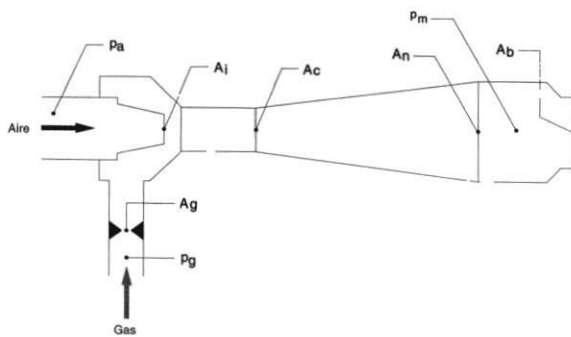


Figura 1 Mezclador de aire inductor [1]

1.2 Componentes de un quemador de aire inductor

Para la correcta operación y puesta a punto de este tipo de quemadores se requiere de los siguientes elementos: un ventilador centrífugo, un regulador de gas cero, una válvula de control del flujo de aire (mariposa), una válvula de regulación de la admisión de gas, un inyector de aire, una cámara de gas, un mezclador (venturi) y la cabeza del quemador (véase figura 2).

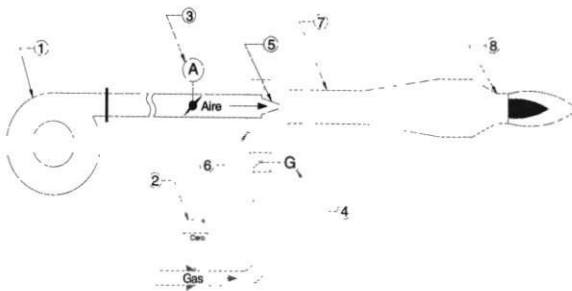


Figura 2 Componentes de un quemador de aire inductor [1]

1.2.1 Ventilador centrífugo

Su función es la de impulsar el aire requerido para la combustión. Considerando que la energía de presión del aire suministrada por el ventilador induce el flujo a través de varias resistencias y que sumadas pueden constituir una resistencia total muy grande, se utilizan también los turbosopladores, con los cuales es posible obtener valores de presión estática de hasta 207 mbar

(3 psi). Los álabes del rotor del ventilador deben ser radiales para que la presión entregada por el ventilador sea prácticamente constante al variar la demanda de caudal de aire.

1.2.2 Regulador de gas cero

En los reguladores cero, el gas se puede expandir hasta la presión atmosférica, es decir, hasta una presión relativa cero, con una precisión del orden de unos cuantos milímetros de columna de agua. Se utilizan generalmente para realizar mezclas de aire y gas o de varios gases, manteniendo una relación de caudales constante cuando el caudal total varía. La presión del gas a la entrada del regulador no puede ser muy grande y oscila entre 4 y 28 mbar. Otra aplicación del regulador cero es la de igualar las presiones de dos fluidos. La presión de accionamiento del regulador se aplica sobre la cara externa de la membrana del regulador a través del orificio de accionamiento o toma de la presión de comando.

1.2.3 Válvula de regulación de la admisión de gas

Es una válvula tipo bola, con el diámetro de su agujero interior calibrado y mucho más pequeño que el correspondiente a una válvula de bola común para el mismo diámetro de tubería. El diámetro de la válvula debe calcularse para obtener la relación aire/gas de diseño, pero al igual que una válvula de bola común la válvula de regulación de la admisión de gas se usa sólo como válvula on-off, es decir, totalmente abierta o totalmente cerrada para encender o apagar rápidamente el quemador. Para variar la relación aire/gas, se recomienda usar una válvula de aguja en el circuito de gas, después del regulador cero y antes de la válvula de regulación de la admisión de gas.

1.2.4 Válvula de control del flujo de aire: mariposa

Con esta válvula se regula la potencia térmica del quemador, ya que al aumentar o disminuir el flujo de aire aumenta o disminuye la intensidad del

efecto venturi, variando el caudal de gas admitido al mezclador, caudal que determina la potencia del quemador. La válvula mariposa es muy utilizada en los sistemas industriales debido a que:

- Se obtiene un control fino del caudal de fluido (aire en este caso).
- Su cierre se hace rápidamente con tan sólo un giro de 90° de la manija.
- No tiene sello hermético en ninguna posición. Esto es para hacer un barrido del gas remanente dentro del sistema cuando el quemador se apaga. Así, se previene una posible explosión dentro de dicho sistema sin mayor riesgo de que ocurra por fuera del mismo, ya que la mezcla aire/gas se diluye rápidamente en la atmósfera.

1.2.5 Inyector de aire

Como su nombre lo indica, su función es la de inyectar el aire requerido para la combustión en el mezclador. Considerando que el caudal de aire alimentado a un quemador, sea de aire inducido o de aire inductor, siempre es mucho mayor que el caudal de gas (para cualquier gas combustible), es obvio que el inyector de un quemador de aire inductor es mucho más grande que el correspondiente a un quemador de gas inductor de la misma potencia (véase figura 3).

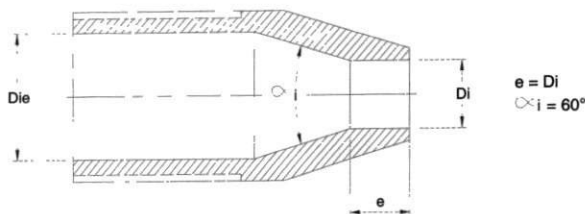


Figura 3 Configuración interna del inyector de quemador [1]

Donde:

- De: diámetro mayor del inyector
- e: profundidad del segmento o de menor diámetro
- Di: diámetro interno del inyector
- α : ángulo de ataque del flujo

1.2.6 Cámara de gas

Va concéntrica al inyector para dirigir el flujo de gas hacia el chorro de aire que se descarga dentro del mezclador.

1.2.7 Mezclador o venturi

Es simplemente una restricción al flujo de un fluido en una tubería como se describió antes.

1.2.8 Cabeza

Es la parte del quemador constituida por una serie de orificios (puertos) a donde llega la mezcla aire/gas para su correspondiente combustión, de tal forma que cada puerto sostenga una llama. Su forma, tamaño y configuración depende de la aplicación; las cabezas circulares, de barra (tipo flauta) y las monopuerto, son las más comunes (véase figura 4).

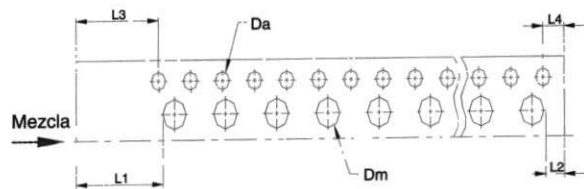


Figura 4 Disposición de los puertos a lo largo de la cabeza de barra del quemador [1]

Donde:

- L₄: distancia al borde de la barra del último puerto auxiliar
- L₁: distancia al mezclador del primer puerto principal
- L₃: distancia al mezclador del primer puerto auxiliar de estabilización de llama
- L₂: distancia al borde de la barra del último puerto principal

1.3 Configuración y funcionamiento de un mezclador de aire inductor

1.3.1 Descripción

Los quemadores de aire inductor utilizan la energía de presión del aire, generalmente suministrada por un ventilador (soplador), para arrastrar al gas hasta la zona de combustión y suministrar, a uno o varios quemadores, una mezcla homogénea aire-combustible a una presión que puede ser elevada. Los quemadores de aire inductor son utilizados frecuentemente en los sistemas de com-

bustión industriales, debido a su relativa simplicidad, a sus buenas características de regulación de potencia con tasas de aireación constantes y a la facilidad para alimentar quemadores de alta potencia.

1.3.2 Ecuaciones que rigen el funcionamiento de los quemadores de aire inductor

Ecuación fundamental. Nótese, en primer lugar, que en los mezcladores de aire inductor los fluidos (aire, gas, mezcla) siempre se pueden considerar como incompresibles, dadas las velocidades de flujo y pérdidas de presión relativamente pequeñas. La base para el estudio del funcionamiento de los mezcladores de aire inductor se expone detalladamente en la referencia [1], donde se establece la ecuación fundamental, válida en unidades coherentes (SI por ejemplo):

$$\frac{q_m^2}{\rho_m A_c} = \frac{2(I - A_c \cdot \Delta p)}{1 + \xi} \quad (2)$$

q_m : flujo másico de mezcla aire/gas (kg/s).

ρ_m : densidad de la mezcla aire/gas (kg/m³).

A_c : área seccional del cuello (m²).

I : impulso del chorro de aire descargado a través del inyector (Newtons).

Δp : diferencia de presiones entre la admisión de gas y la zona de combustión (Pascuales).

ξ : coeficiente global de pérdidas de carga (adimensional).

Partiendo de esta ecuación se pueden extraer expresiones en las cuales estén explícitas las diferentes variables de interés. Definiendo la relación $\omega = (p_g - p_s)/(p_a - p_s)$ y haciendo algunas simplificaciones, la ecuación general se convierte en:

$$R \approx \sqrt{d} \frac{A_c / S_g}{\sqrt{\frac{2A_c(1+1.8\omega)}{A_i} - (1.2+5\omega) - (1-\omega)\left(\frac{A_c}{S_b}\right)^2}} \quad (3)$$

R : relación aire/gas: $R = Qa(n)/Qg(n.)$

d : densidad relativa de un gas combustible.

A_c : área seccional del cuello (m²).

S_g : sección eficaz de la válvula de regulación de la admisión de gas.

ω : relación de presiones, $\omega = (p_g - p_s)/(p_a - p_s)$.

A_i : área seccional del inyector (m²).

S_b : sección eficaz de la cabeza del quemador.

1.3.3 Configuración de presiones

Se verá continuación que algunos valores de ω confieren al mezclador de aire inductor ciertas propiedades interesantes, que se obtienen con la ayuda de un regulador cero instalado en la admisión de gas.

1.3.3.1 Presiones del gas y del aire proporcionales ($p_g \propto p_a$). Las presiones del aire y del gas se mantienen en una relación constante por medio del montaje de la figura 5. Si $p_s \neq 0$, la relación ω es constante, pero si $p_s = 0$ o despreciable comparada con p_a y p_g , se suprime la línea de conexión de la cámara de combustión a la admisión de gas y la abertura S_2 desemboca directamente a la atmósfera (véase figura 5).

$$\omega = \frac{p_g}{p_a} = \frac{1}{1 + (s_2 / s_1)^2} \quad (4)$$

ω : relación de presiones, $\omega = (p_g - p_s)/(p_a - p_s)$.

p_a, p_g : presiones de admisión del aire y del gas (Pascuales)

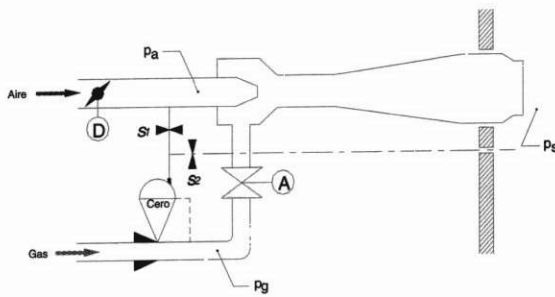


Figura 5 Mezclador de aire inductor con $p_g \propto p_a$ [1]

Características de funcionamiento. Para un sistema mezclador-quemador determinado, el valor de ω influye notablemente en las características de arrastre de gas. Si ω es constante, la relación aire/gas es independiente de las presiones del aire y del gas, por consiguiente del caudal y de la contrapresión p_s .

1.3.3.2 Gas expandido hasta la presión en la zona de combustión ($p_g = p_s$). El regulador cero hace $p_g = p_s$, de donde $\omega = 0$. Si p_s es nula o despreciable, se suprime la línea de conexión de la cámara de combustión a la admisión de gas, dejando la membrana del regulador cero expuesta a la atmósfera (véase figura 6). Al hacer algunas simplificaciones en la ecuación (3), se obtiene para esta configuración la ecuación (5).

$$R \approx 1,8\sqrt{d} \frac{A_c / S_g}{\frac{A_c}{A_i} + 0,7} \quad (5)$$

R : relación aire/gas: $R = Qa(n)/Qg(n)$.

d : densidad relativa de un gas combustible.

A_c : área seccional del cuello (m^2).

S_g : sección eficaz de la válvula de regulación de la admisión de gas.

A_i : área seccional del inyector (m^2).

Características de funcionamiento. La relación aire/gas varía con la sección equivalente del quemador si la condición: $A_c / S_g \leq 0,18 (A_c / A_i + 1)$ no se cumple. Dicha relación también varía con la temperatura de la mezcla. Para una relación

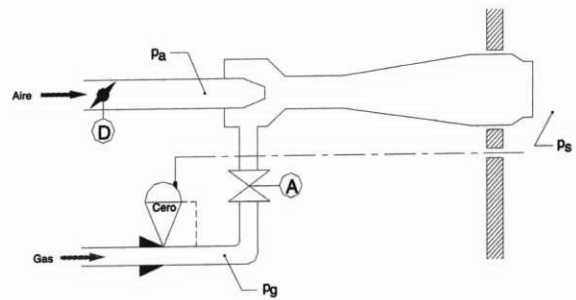


Figura 6 Mezclador de aire inductor con $p_s = p_a$ [1]

aire/gas dada, esta variación será menos sensible en la medida en que la relación A_c / A_i sea grande. Si se ha realizado el montaje suponiendo injustificadamente p_s despreciable, entonces ω y por consiguiente la relación aire/gas variarán con las presiones del aire y del gas (por tanto con el caudal).

1.3.3.3 Presión del gas igual a la del aire ($p_g = p_a$).

En esta configuración:

$$\omega = \frac{p_g - p_s}{p_a - p_s} = 1$$

y la relación aire/gas puede expresarse con la ecuación empírica (véase figura 7).

$$R \approx 0,8\sqrt{d} \frac{A_c / S_g}{\frac{A_c}{A_i} - 0,3} \quad (6)$$

R : relación aire/gas: $R = Qa(n)/Qg(n)$.

d : densidad relativa de un gas combustible.

A_c : área seccional del cuello (m^2).

S_g : sección eficaz de la válvula de regulación de la admisión de gas.

A_i : área seccional del inyector (m^2).

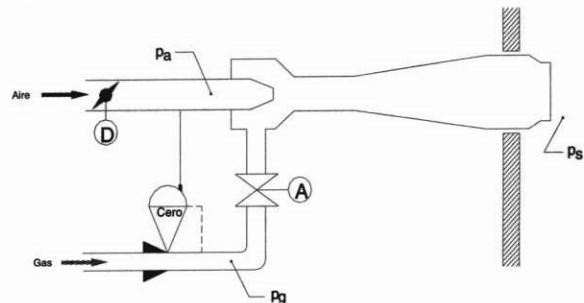


Figura 7 Mezclador de aire inductor con $p_g = p_a$ [1]

Características de funcionamiento. La relación aire/gas es independiente del caudal de aire, de la contrapresión p_s , así como del valor de la sección equivalente del quemador (por consiguiente de su sección real) y de la temperatura de la mezcla, pudiendo aumentar con la operación normal del quemador. Para realizar este control es necesario disponer, naturalmente, de una presión de admisión del gas algo superior a la presión máxima del aire a la entrada del mezclador.

1.3.3.4 Presión del gas igual a la presión de la mezcla ($p_g = p_m$). Partiendo de la ecuación (3) y haciendo algunas simplificaciones obtenidas de la práctica, se tiene la expresión (7) para esta configuración: (véase figura 8).

$$R \approx 1,7\sqrt{d} \frac{A_c / S_g}{\frac{A_c}{A_i} + 0,55} \quad (7)$$

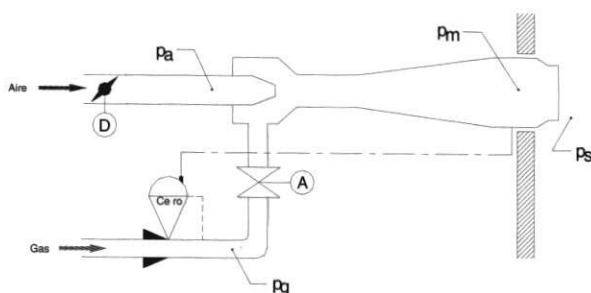


Figura 8 Mezclador de aire inductor con $p_g = p_m$ [1]

Características de funcionamiento. La relación aire/gas es independiente de los caudales, de la contrapresión p_s , así como de la sección eficaz del quemador (por consiguiente de su sección real) y de la temperatura de la mezcla, pudiendo aumentar con el calentamiento normal del quemador durante su funcionamiento. Una presión del gas algo superior a la presión máxima de la mezcla, es suficiente para alimentar el quemador.

2. Cálculos del quemador

Parámetros seleccionados por el diseñador

- Potencia térmica del quemador: 20 kW con base en el PCI del combustible.

- PCI: poder calorífico de un combustible [MJ/m³(n)].
- Gas combustible por utilizar: gas natural de la Guajira.
- Tasa de aireación primaria: 1,1.
- Presión de admisión del aire: 15 mbar.
- Contrapresión en la zona de combustión: 2,5 mbar.
- Configuración de presiones: $p_g = p_s$.

Especificaciones básicas

- Propiedades del gas natural de la Guajira:
- $d = 0,567 \text{ PCI} = 35,43 \text{ MJ/m}^3(\text{n})$.
 $V_a = 9,439 \text{ m}^3(\text{n})\text{aire} / \text{m}^3(\text{n})\text{gas}$.
- V_a : volumen estequiométrico de aire del gas combustible.
- Condiciones atmosféricas promedio (Medellín): 852 mbar, 24 °C.

Caudales de gas y de aire para la configuración escogida ($p_g = p_s$)

- En el estado de referencia normal (0 °C, 1.013 mbar):
- $Q_g = 2,03 \text{ m}^3(\text{n}) \text{ gas/h}$.
 $Q_a = 21,08 \text{ m}^3(\text{n}) \text{ aire/h}$.
 $R = Q_a(n)/Q_g(n) = 10,4$.
- A las condiciones atmosféricas del sitio (Medellín):
- $Q_g = 2,62 \text{ m}^3 \text{ gas/h}$.
 $Q_a = 26,80 \text{ m}^3 \text{ aire/h}$.
 $\rho_a = 1,017 \text{ kg/m}^3$.
- Q_a, Q_g : caudales de aire y de gas, respectivamente (m³/h).
- ρ_a : densidad del aire (kg/m³).

Cálculo de los coeficientes de pérdida de carga

- En el mezclador:
 $\xi_{m/c} = 0,074 + 0,096 + 0,108 = 0,278$
(convergente, cuello y divergente).

- En el inyector: $\xi'_{a/c} = 1,644$.
- En la cabeza de barra:
 $\xi_{b/c} = 0,154 + 1,991 = 2,145$
 (tramo recto y puertos).
- En el portacabeza de la cabeza de barra (la cabeza monopuerto no requiere portacabeza):
 $\xi_{v/c} = 0,038$.
- En la válvula de admisión de gas: $\xi'_{g/c} = 212,4$.

Dimensionamiento del quemador

- Mezclador:
 $D_c = 20,3$ mm. $D_e = 2D_c = 40,6$ mm.
 $\alpha_{cv} = 60^\circ$.
 $L_c = 3D_c = 60,9$ mm.
 $D_n = 2,1D_c = 42,6$ mm.
 $\alpha_{dv} = 7^\circ$.
- Inyector y tubería de admisión del aire:
 $D_i = 14,4$ mm.
 $D_{ie} = 26,9$ mm.
 $\alpha_i = 30^\circ$.
 $e = D_i = 14,4$ mm.
 $D_a = 32,3$ mm.
- Cabeza de barra:
 $D_M = 5/32$ pulg.
 $D_A = 1/16$ pulg.
 $N_M = 72$ puertos.
 $N_A = 112$ puertos.
 $D_b = 26,5$ mm.
 $L_b = 490$ mm.
 $C_M = 12,3$ mm.
 $C_A = 7,9$ mm.

α_{cv} : ángulo del tramo convergente.

α_{dv} : ángulo del tramo divergente.

α_i : ángulo del cono interior del inyector.

C_A, C_M : distancia entre centros de los puertos auxiliares y principales, respectivamente.

$D_a, D_b, D_c, D_e, D_i, D_{ie}, D_A, D_M$: diámetros de: interior de la tubería de admisión de aire, interior de la cabeza, cuello, interior de la cámara de gas, inyector en la descarga, inyector a la entrada, los puertos auxiliares de la cabeza de barra, los puertos principales respectivamente.

L_b, L_c : longitud de la barra y del cuello, respectivamente.

N_A, N_M : número de puertos auxiliares y principales de la cabeza de barra.

- Diámetro interior de la válvula de regulación de la admisión de gas (tipo bola): 5,0 mm.

Cálculo del diámetro de cuello usando GLP en lugar de gas natural

Siguiendo los mismos pasos para el cálculo del diámetro de cuello anterior (para gas natural), se obtuvo el valor: $D_c = 19,6$ mm. Esto quiere decir que el diámetro de cuello requerido para GLP es menor que para gas natural en sólo 3,4%. En los anexos 1 y 2 se muestran los planos de montaje del quemador de barra y del quemador unipuerto.

3. Evaluación del quemador

3.1 Ensayo 1: Influencia del caudal de aire sobre el desempeño del quemador unipuerto con la configuración $p_g = p_m$

Mediciones realizadas: caudales de aire, de mezcla y de gas en la admisión, % en volumen de oxígeno en la mezcla, potencia térmica y tasa de aireación (véase figura 9).

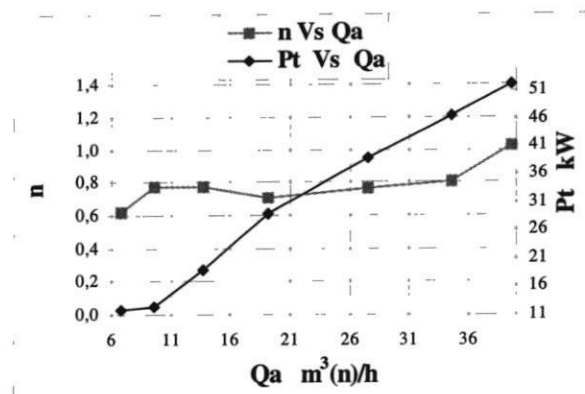


Figura 9 Influencia del caudal de aire sobre la tasa de aireación y la potencia del quemador unipuerto con la configuración $p_g = p_m$

Análisis de resultados

- Se observó que para valores de potencia entre 12,45 y 46,48 kW, la relación aire/gas permanece prácticamente constante.
- La presión del gas en la línea de alimentación debe ser algo superior a la presión máxima en el regulador cero, para tener en cuenta la pérdida de presión en éste.
- La presión de la mezcla es, en promedio, el 27% de la presión del aire suministrada por el ventilador, obteniéndose una presión máxima pm de 3,6 mbar.

3.2 Ensayo 2: Influencia del caudal de aire sobre el desempeño del quemador unipuerto con la configuración $p_g = p_a$

Mediciones realizadas: las mismas del ensayo 1 (véase figura 10).

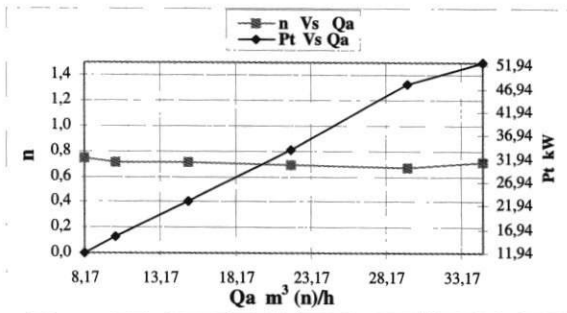


Figura 10 Influencia del caudal de aire sobre la tasa de aireación y la potencia del quemador unipuerto con la configuración $p_g = p_a$

Análisis de resultados

- La relación aire/gas permaneció prácticamente constante durante todo el ensayo.
- La presión de la mezcla es, en promedio, el 31% de la presión de admisión del aire.
- La potencia térmica (P_t) aumenta directamente con el caudal de aire, obteniéndose con esta configuración la máxima potencia del quemador: 52,62 kW, habiendo sido diseñado para obtener una potencia de 20 kW.

- Esta configuración requiere una presión de alimentación del gas algo superior a la del aire.

3.3 Ensayo 3: Influencia del caudal de aire sobre el desempeño del quemador unipuerto con la configuración $p_g = p_s$

Mediciones realizadas: las mismas de los dos ensayos anteriores (véase figura 11).

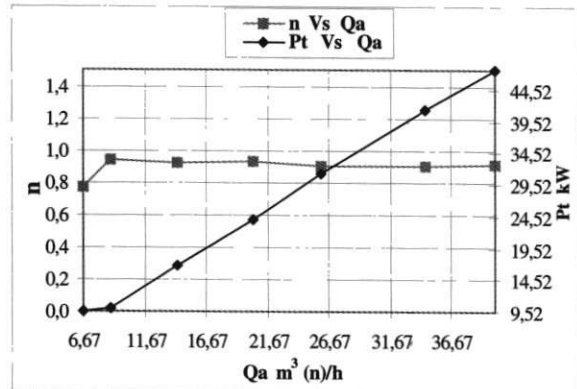


Figura 11 Influencia del caudal de aire sobre la potencia del quemador unipuerto y la tasa de aireación con la configuración $p_g = p_s$

Análisis de resultados

- Con una presión en la zona de combustión p_s despreciable, la relación aire/gas no varía con el caudal de aire (y por tanto con la presión) operando con potencias mayores de 10 kW.
- La presión de la mezcla es en promedio, el 23% de la presión de admisión del aire.

3.4 Ensayo 4: Influencia del caudal de aire sobre el desempeño del quemador unipuerto con la configuración $p_g \propto p_a$

Mediciones realizadas: las mismas de los ensayos anteriores (véase figura 12).

Análisis de resultados

- Con esta configuración se obtuvieron valores de la relación aire/gas muy bajos. Los valores aceptables se obtuvieron sólo a partir de un caudal de aire de 26 m³(n)/h hasta 31 m³(n)/h, correspondiente a una potencia de 46 kW.

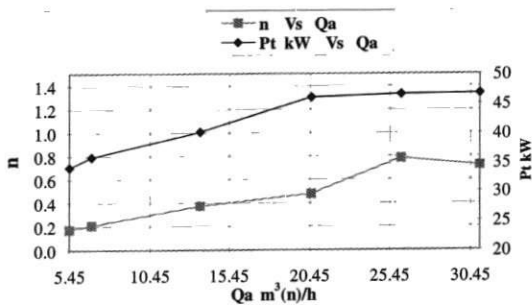


Figura 12 Influencia del caudal de aire sobre la potencia del quemador unipuerto y la tasa de aireación con la configuración $p_g \propto p_a$

Luego, el rango de operación del quemador es muy estrecho comparado con los rangos de operación de las otras configuraciones.

- La presión de la mezcla es, en promedio, el 18% de la presión de admisión del aire.
- La presión del gas en la línea de suministro debe ser mayor que la máxima presión del aire suministrado por el ventilador.

3.5 Ensayo 5: Influencia del caudal de gas sobre el desempeño del quemador unipuerto, fijando el caudal de aire en $28 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ con la configuración $p_g = p_s$

Se observó que el caudal de aire para un óptimo funcionamiento del quemador era de $28 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ correspondiente a un ángulo de apertura de la válvula mariposa $\phi = 20^\circ$. Mediciones realizadas: las mismas de los ensayos anteriores (véase figura 13).

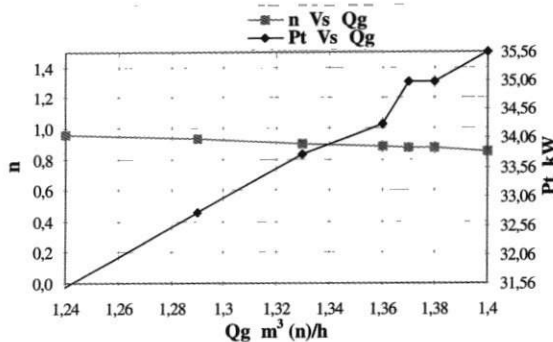


Figura 13 Influencia del caudal de gas sobre la potencia del quemador y la tasa de aireación, fijado el caudal de aire en $\phi = 20^\circ$ con la configuración $p_g = p_s$

Análisis de resultados

- Con la obturación de la admisión de gas, se obtuvo un rango de operación del quemador de 31 a 35 KW.
- La tasa de aireación disminuye a medida que aumenta el caudal de gas, pero se mantiene dentro de un rango aceptable y la estructura de la llama fue buena (llama azul) durante todo el ensayo.
- La presión del aire y de la mezcla se mantienen constantes para cualquier valor de caudal de gas obteniéndose, en promedio, una presión de la mezcla del 40% de la presión de admisión del aire.

3.6 Ensayo 6: Modulación de potencia del quemador unipuerto con cada configuración de presiones

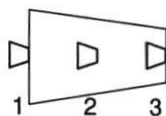
Para obtener la potencia mínima del quemador en cada configuración, se cerró la válvula mariposa hasta la posición de 0° , que corresponde al caudal mínimo de aire, ya que este tipo de válvulas no tienen sello hermético en ninguna posición. Luego se reguló la presión del gas en la línea de alimentación, según la configuración de presiones analizada y, finalmente, se eliminaron las puntas amarillas regulando la relación aire/gas con la válvula de aguja.

La tabla 1 muestra la amplia modulación de potencia que tienen los quemadores de aire inductor: de 1 a 8,30 máximo. Los quemadores de gas inductor tienen una modulación de potencia de apenas 1 a 3 máximo.

Tabla 1 Modulación de potencia del quemador unipuerto con cada configuración de presiones

Configuración	$P_{t\min}$ (kW)	$P_{t\max}$ (kW)	Modulación de potencia
$p_g = p_m$	6,35	52,58	1 a 8,30
$p_g = p_a$	6,86	52,62	1 a 7,70
$p_g = p_s = 0$	5,84	47,66	1 a 8,20
$p_g \propto p_a$	7,13	46,74	1 a 6,60

3.7 Ensayo 7: Influencia de la posición del inyector de aire en el convergente del mezclador con la cabeza unipuerto (véase tabla 2)



Posiciones:

1. A la entrada del convergente
2. En la mitad del convergente
3. Al final del convergente (entrada al cuello)

Según estos resultados, se observa que la posición del inyector de aire no tiene prácticamente ninguna influencia sobre las otras variables de interés, cuando aquel se desplaza a lo largo del tramo convergente del venturi.

4. Conclusiones

- Se demostró, que con el procedimiento de diseño desarrollado en esta investigación, se obtienen las dimensiones necesarias para la construcción de un quemador de aire inductor con una gran flexibilidad de operación para obtener la potencia térmica requerida, la tasa de aireación apropiada para cada aplicación y una baja emisión de contaminantes (CO, CO₂).
- Se demostró la amplia modulación de potencia de los quemadores de aire inductor: 1 a 8 máximo; los quemadores de gas inductor tienen una modulación de potencia de 1 a 3 máximo.
- El rango de operación óptima del quemador (tasa de aireación constante con variaciones de potencia) depende de la configuración de presiones escogida, pero la configuración $p_g = p_a$ es la que permite obtener el mayor rango de opera-

ción óptima. El menor rango de operación óptima lo tiene la configuración $p_g \propto p_a$.

- La configuración $p_g = p_m$ es la más universal puesto que el gas puede suministrarse a baja presión, sin embargo se obtiene una potencia máxima casi igual a la obtenida con la configuración $p_g = p_a$. Además, con $p_g = p_m$ se obtiene la mayor capacidad de modulación de potencia (de 1 a 8,3).
- La presión de la mezcla oscila entre el 21 y el 25% de la presión de admisión del aire, razón por la cual los quemadores de aire inductor son adecuados para utilizarse cuando se tienen cámaras de combustión cerradas, es decir, cuando hay que vencer una contra-presión en la zona de combustión.
- La relación aire/gas, en los quemadores de aire inductor, permanece prácticamente constante cuando la potencia calorífica varía.
- Se encontró que la posición del inyector en el tramo convergente del mezclador no tiene ninguna influencia sobre el desempeño de un quemador de aire inductor.
- Con el cálculo del diámetro de cuello requerido para gas natural y para GLP, se encontró que el procedimiento de diseño desarrollado conduce a un diseño del quemador independiente del gas combustible por utilizar. Sin embargo, las presiones de los fluidos no serían las mismas debido principalmente a la gran diferencia de las gravedades específicas que tienen los gases combustibles.
- Si se quiere operar el quemador sin ninguna configuración de presiones específica, es válido hacerlo siempre y cuando:

Tabla 2 Efecto de la posición del inyector en el convergente del mezclador con la cabeza unipuerto

Posición	$Q_a \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$	$Q_g \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$	$P_a \text{ mbar}$	$P_m \text{ mbar}$	$P_{g1} \text{ mbar}$	$O_2 \text{ en mezcla}$	$P_t \text{ kW}$	n	n'
1	29,53	1,34	8,20	2,40	12	19,85	34,04	0,94	0,87
2	29,52	1,27	8,00	2,30	11	19,91	32,26	0,99	0,93
3	29,52	1,27	8,00	2,30	11	19,97	32,26	0,99	0,93

- Se obtenga la potencia térmica requerida
- Se controle la relación aire/gas de tal manera que la tasa de aireación primaria esté dentro del rango recomendado 1,0 a 1,3, a no ser que sea necesario obtener tasas de aireación muy elevadas, dependiendo de la aplicación.
- Las emisiones contaminantes estén dentro de los límites permitidos.

Si bien es cierto que es posible operar un quemador de aire inductor sin el regulador cero (no hay ninguna configuración de presiones definida), también es cierto que las ventajas que tiene un quemador con regulador cero, se pierden o, en el mejor de los casos, se ven reducidas.

- Se deben regular las presiones de tal manera que en la red de gas nunca se obtengan grandes presiones manométricas negativas, ya que el aire atmosférico podría introducirse en la tubería si hay escapes y formar una mezcla aire/gas potencialmente peligrosa en la red, pues dicha mezcla debe darse exclusivamente en el mezclador.

Referencias bibliográficas

1. Association Technique de l'industrie du gaz en France. *Calcul, conception et utilisation des brûleurs industriels a gaz*. Collection des Techniques gazières. París, 1983. p. 119.
2. North American Mfg. Co. *North American Combustion Handbook*. Vol. 1. Combustion, fuels, stoichiometry, heat transfer, fluid flow. Tercera edición. Cleveland, 1986. p. 131.
3. Amell, A. et al. *Tecnología de la Combustión de los Gases*, Módulos 4 y 5: Quemadores atmosféricos con llama de premezcla y Quemadores de aire inductor. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Centro de Extensión Académica CESET. Medellín, 1998.
4. Goodwin, C. J. et al. "Aerated bar burners". En: *Gas council research communication*. 35th Autumn research meeting of the institution of gas engineers. I.G.E Journal. Londres, 1970.
5. Ospina, J. C. y Cadavid, F. Proyecto de investigación: *Mecanismos de estabilización de llama en quemadores atmosféricos de premezcla*. Medellín, 1998.
6. Greene, R. y Cuerpo de redactores de *Chemical Engineering Magazine*. "Válvulas: selección, uso y mantenimiento". McGraw-Hill. México, 1994.

Anexo 1 Montaje del quemador con la cabeza de barra

6	Cabeza de barra	1	-	AISI 316	Tubo 1 pulg
5	Portacabeza	1	-	Acero inoxidable	-
4	Mezclador	1	-	Bronce	-
3	Cámara de gas	1	-	Bronce	-
2	inyector	1	-	Acero	-
1	Portainyector	1	-	Bronce	-
Ref.	Description	Cant.	Pl. de Ref.	Material	Observaciones
				AISI 1020	Tubo 1 1/4 sch 80

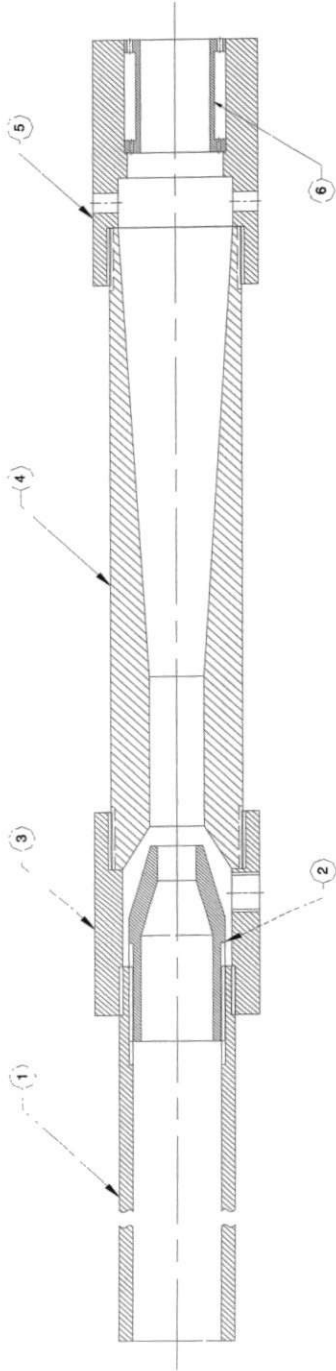
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

MONTAJE CON CABEZA DE BARRA

DISEÑO: Camilo Eduardo Martínez
 APROBO: Andrés Amell Arrieta
 DIBUJO: Mario Cardona Valencia
 REVISO: Camilo Eduardo Martínez
 ESCALA: SIN
 FECHA: 00-08-23
 O.T.: -
 MOD: -
 PL.No: A4-02

Anexo 2 Montaje del quemador con la cabeza unipuerto



6	Estabilizador llama	1	A4-07	Acero	AISI 1020	-
5	Cabeza unipuerto	1	A4-07	Acero	AISI 1518	-
4	Mezclador	1	A4-01	Bronce	-	-
3	Cámara de gas	1	A4-06	Acero	AISI 1045	-
2	Inyector	1	A4-01	Bronce	-	-
1	Portainyector	1	A4-06	Acero	AISI 1020	Tubo 1 1/4sch80
Ref.	Descripción	Cant.	Pl. de Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERIA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA						
MONTAJE CON CABEZA UNIPUERTO						
		DISEÑO: Camilo Eduardo Martínez		DIBUJO: Mario Cardona Valencia		ESCALA: SIN
APROBO: Andrés Amell Arrieta		REVISO: Camilo Eduardo Martínez		MOD: -		FECHA: 00-08-23
						O.T: -
						PL.No: A4-01