

Incidencia de los parámetros geométricos y de flujo en la tasa de aireación primaria y en las emisiones de monóxido de carbono en quemadores atmosféricos de mediana y alta presión

*Andrés Amell A., Jaime Hernández V., Jaime Cortes T. **

Resumen

En los quemadores atmosféricos de mediana y alta presión de suministro del gas y la geometría venturi del quemador garantiza un buen arrastre de aire primario para la combustión. En este proyecto se analizaron los principales parámetros geométricos del quemador (diámetro de salida, diámetro del inyector y geometría del mezclador) y las condiciones de flujo de gas (presión de suministro) que influyen sobre la tasa de aireación primaria. Con los resultados obtenidos se contribuirá a mejorar la metodología de diseño, con el fin de usar este tipo de quemadores en nuestro país.

----- *Palabras clave:* quemadores atmosféricos, emisiones de monóxido de carbono, aireación primaria, parámetros geométricos de quemadores.

Abstract

In this kind of atmospheric burners, high pressure gas supply and Venturi geometry guarantee a good primary air entrance for combustion. In this project we analyze the most important burner geometric parameters (outlet diameter, injection diameter and mixer geometry) and gas flux conditions (supply pressure) that have an influence over primary aeration rate. The results of this investigation will contribute with the methodology design improvement, focused to use this kind of burners in our country.

----- *Key words:* atmospheric burners, carbon monoxide emissions, primary aeration, burner geometric parameters.

* Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

1. Introducción

La penetración de los combustibles gaseosos en la economía colombiana ha venido creciendo significativamente en la presente década, en particular el gas natural en los sectores residencial, comercial, industrial, transporte y de generación eléctrica.

En Colombia dada la demanda de equipos y sistemas para la utilización de estos energéticos, se requiere soporte técnico para su diseño y construcción, buscando seguridad y eficiencia en el uso de los combustibles gaseosos. Los quemadores atmosféricos de baja y alta presión tienen una aplicación generalizada en los sistemas de combustión de gases combustibles; ello exige en el medio colombiano estudiar sus principales parámetros de diseño y variables incidentes sobre las condiciones óptimas de operación, en particular la rata de aireación primaria.

En este trabajo se ha estudiado la incidencia de los principales parámetros geométricos (diámetro del inyector, del cuello y de salida, longitud del mezclador), y de presión de suministro del gas sobre la rata de aireación primaria en quemadores atmosféricos de mediana y alta presión. Para tal efecto, los ensayos se realizaron con llama libre y llama confinada.

2. Consideraciones teóricas

En un quemador atmosférico de aire inducido por la energía cinética del gas se arrastra el aire primario para la combustión. Si el quemador opera en llama libre el aire necesario para completar la combustión se transfiere por difusión desde la atmósfera; cuando la llama es confinada el aire para la combustión será el admitido en la zona de arrastre primaria o se puede disponer de una admisión secundaria aprovechando la energía de la mezcla aire-gas en el difusor.

En el esquema de la figura 1 se presenta un quemador atmosférico; con sus principales componentes: inyector, mezclador y cabeza.

Dependiendo del valor de la presión de suministro del gas en el inyector los quemadores atmosféricos de aire inducido se clasifican:

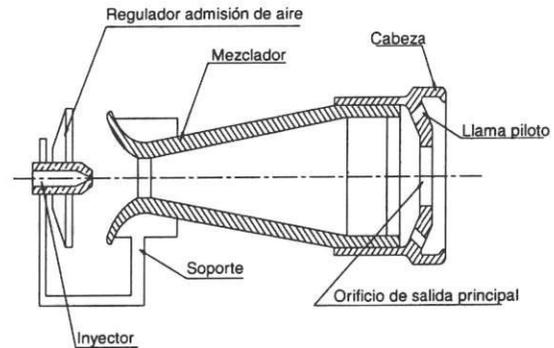


Figura 1 Esquema de las partes de un quemador atmosférico de alta presión

- **Baja presión.** Cuando la presión de suministro es menor de 100 mbar, a esta condición el flujo es incompresible y subsónico en la descarga. A este intervalo pertenecen la mayoría de aplicaciones de estos quemadores.
- **Mediana y alta presión.** En estos sistemas, a diferencia del anterior, la presión de suministro es mayor de 100 mbar y menor de 800 mbar para mediana presión, y es mayor de 800 mbar para alta presión. En estas condiciones el flujo es compresible y sónico o supersónico en la descarga.

Para igual potencia, los quemadores de mediana y alta presión son de menor tamaño que los de baja presión, además presentan mayores ratas de aireación primaria.

En quemadores atmosféricos el arrastre del aire primario por la corriente de gas se explica por la transferencia de momentum lineal (SIMMONDS 1954/55, MOUSSET 1972, A.T.I.G France 1983) En quemadores atmosféricos de alta y mediana presión con llama libre la rata de aireación primaria queda definida por (DOUPIS, 1980):

$$n_p = \frac{\sqrt{d}}{V_a} \cdot \left[A_p \cdot \frac{D_e}{D_i} - 1 \right] \quad (1)$$

En la cual:

- n_p : Rata de aireación primaria.
- d : Diámetro de entrada
- V_a : Volumen teórico de aire.
- A_p : Factor de atenuación.

De: Diámetro equivalente

Di: Diámetro del inyector [mm]

Si existe inducción secundaria de aire puede demostrarse, que la rata de aireación secundaria es:

$$n_s = (n_p \cdot V_a + 1) \cdot \left(\frac{\rho_m \cdot A_s}{A_m \cdot \rho_a} \right)^2 \quad (2)$$

En la cual:

n_s : Rata de aireación secundaria.

P_m : Densidad de la mezcla

P_a : Densidad del aire

A_m : Área de salida en el mezclador.

A_s : Área de entrada del aire secundario.

Como puede concluirse, la rata de aireación secundaria depende principalmente de los siguientes factores:

- Las propiedades del combustible utilizado, esto es $\frac{\sqrt{d}}{V_a}$
- Del coeficiente de atenuación (A_p) que es función de la presión de suministro de gas.
- De la geometría, particularmente del diámetro del inyector, del diámetro del cuello del venturi y del diámetro de salida de la cabeza del quemador.

3. Procedimiento experimental

3.1 Montaje y equipos de medición utilizados

El montaje utilizado consistió de los siguientes elementos:

- *Cilindro de Metano a alta presión.* Se utilizó metano comercial preparado por la empresa AGAFANO. En la tabla 1 se muestra la composición de dicho gas.
- *Regulador de alta presión con manómetros.* Marca AGA; empleado para garantizar las presiones de suministro a los quemadores desde 0,4 hasta 1,5 bares. Los manómetros de alta y baja presión están incorporados en el regulador, sus rangos de presión son de 0 a 4.000 psi y de 0 a 30 psi respectivamente.

- *Rotámetro.* Marca MANOSTAT; empleado para medir los caudales del gas y utilizado en un rango de 0,29 hasta 0,60 m³(n)/hr.

- *Quemadores de ensayo.* Se diseñaron cinco quemadores de ensayo con configuraciones geométricas diferentes (véanse tablas 2 y 3), de tal forma que se pudiera modificar los principales parámetros geométricos. En los esquemas de las figuras 2 y 3 se muestran las principales dimensiones geométricas de los quemadores usados. En la fase de experimentación, se distinguen por medio de la combinación de un mezclador y una cabeza (MC); por ejemplo en quemador M1C1, corresponde al mezclador 1 con la cabeza 1.

Tabla 1 Composición del gas natural empleado en los ensayos

Componente	Concentración
Metano	93%
Etano	3,58%
Propano	1,02%
n- Butano	1.900 ppm
i- Butano	2.100 ppm
n- Pentano	600 ppm
i- Pentano	600 ppm
Hexano	200 ppm
Heptano	600 ppm
N ₂	4.700 ppm
CO ₂	7.000 ppm

Propiedades

Va	9,93 m ³ (n)/ m ³ (n) gas
P.C.S.	11,6 kWh/m ³ (n) gas
Grav. específica	0,6
%CO ₂ máx.	11,6

- *Sistema de captación de humos.* Se utilizó una pequeña cámara con admisión de aire secundario para coleccionar los gases de combustión requeridos en el estudio.

Tabla 2 Dimensiones de los mezcladores utilizados en los ensayos

Parámetros Geométricos	Nomenclatura	Mezcladores (mm)				
		M1	M2	M3	M4	M5
Diámetro cuello	Dc	11,9	21,6	17,2	12,2	20,3
Diámetro entrada	De	26,2	47,5	38,0	26,8	20,3
Diámetro nominal	Dn	26,2	47,5	38,0	26,8	20,3
Longitud convergente	Lc	26,2	47,5	38,0	26,8	-
Longitud divergente	Ld	89,3	162,0	129,0	91,5	-
Longitud recta	X	3,5	6,5	5,0	3,7	-
Longitud total	Lt	119,0	216,0	172,0	122,0	172,0

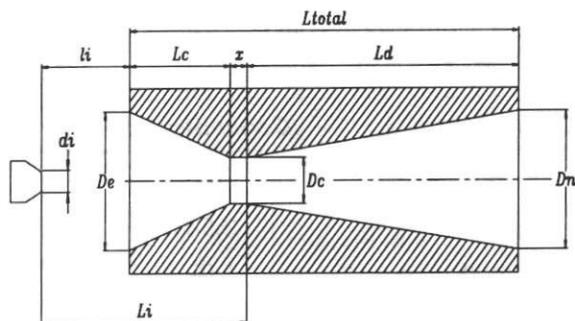


Figura 2 Dimensiones del mezclador

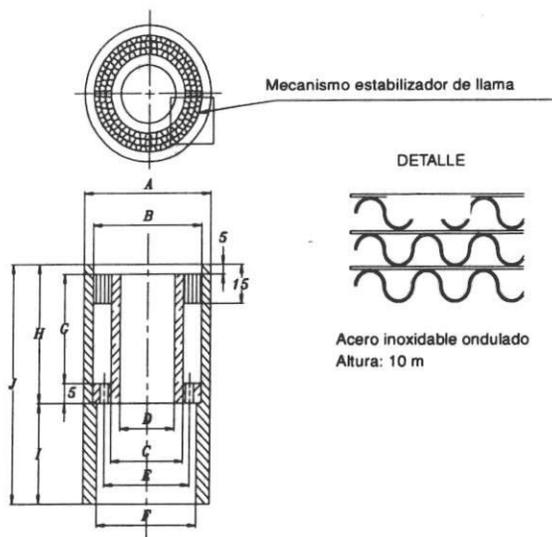


Figura 3 Dimensiones de la cabeza del quemador

- *Analizador de gases infrarrojo.* Empleado para determinar la composición del metano

Tabla 3 Dimensiones de las cabezas de los quemadores utilizados en los ensayos. Dimensiones en milímetros

Nomenclatura	Cabezas		
	C1	C2	C3
A	31,75	50,8	50,8
B	23,8	36,6	29,0
C	17,3	28,6	23,0
D	14,0	25,4	20,0
E	19,4	30,7	26,0
F	21,6	35,0	28,0
G	27,0	35,0	35,0
H	37,0	45,0	45,0
I	25,0	30,0	30,0
J	62,0	75,0	75,0

en la premezcla y la composición de O₂, CO, CO₂ y CH₄ en los gases de la combustión. El instrumento de análisis de gases de infrarrojo más empleado es del tipo no dispersivo. El equipo utilizado en este trabajo fue un MULTOR 610, el cual detecta 4 componentes: CH₄ (0-25%), CO (0-5%), CO₂ (0-25%) por infrarrojo y O₂ (0-21%); este último componente hallado mediante una celda electroquímica incorporada al analizador IR.

3.2 Medición de la rata de aireación primaria

Inicialmente, para los ensayos en llama libre, se fijó la geometría del quemador (el diámetro del inyector, el diámetro de salida, la configuración del mezclador y tipo de estabilización) y se incrementó la presión de suministro entre 0,4 y 1,5 bares; registrándose el valor del %O₂ y el %CH₄ en la premezcla. Estos valores se tomaron sin importar la estabilidad de la llama, ya que solamente se quería determinar el potencial de arrastre de aire máximo del quemador, para lo cual la obturación de la zona de arrastre de aire primario permaneció completamente abierta.

Con dichos valores se determinó la rata de aireación primaria para cada caso, empleando dos métodos de cálculo: balance molar en base metano y balance molar en base oxígeno. En este caso se emplearon las combinaciones de mezclador-cabeza M1C1, M2C2, M3C3, M4C3 y M5C3. Una vez desarrollados los ensayos anteriores, se modificó el diámetro del inyector y se repitió el procedimiento anterior para la misma combinación de quemadores. Finalmente se efectuó la medición del %O₂ y %CH₄ en la premezcla para el quemador M1C1, variando adicionalmente el diámetro de salida para diferentes combinaciones de diámetro de inyector y presión de suministro.

3.3 Medición de la composición de humos, rata de aireación primaria y secundaria

Estos ensayos se realizaron para condiciones de llama confinada, donde fue determinante la estabilidad de llama en la cabeza; por lo cual las condiciones de operación fueron restringidas (en cuanto a la regulación de la zona de arrastre de aire primario y secundario, presión de suministro y diámetro de inyector) a ciertos valores donde era posible garantizar el correcto desempeño del quemador para condiciones de llama estable. Las combinaciones de mezclador-cabeza utilizadas se limitaron a los arreglos M1C1 (entre 0,4-1,2 bar y diámetros de 0,7

y 0,8 mm), M2C2 (entre 0,4-1,5 bares y diámetros de 1,0, 1,1, 1,3 y 1,6 mm) y M3C3 (entre 0,4-1,5 bares y diámetros de 1,0, 1,1 y 1,3 mm).

Se fijaron los parámetros geométricos en los quemadores de ensayo (mezclador y cabeza, diámetro del inyector, apertura de la zona de arrastre primario y secundario) y se fue perturbando la presión de suministro del gas hasta donde se garantizara la estabilidad de la llama, registrándose los valores de %O₂ y %CH₄ en la premezcla y las emisiones de CO, CO₂, O₂ y CH₄ en la chimenea, así como el monitoreo de la temperatura de dichos gases. Una vez desarrollados los ensayos anteriores, se modificó el diámetro del inyector y se repitió el procedimiento para la misma combinación de quemadores. El valor de la rata de aireación secundaria se determinó usando el programa COMBUGAS (Amell, 1997). La rata de aireación primaria, se determinó igual que para condiciones de llama libre.

4. Análisis de resultados

En esta fase se analizará primero la incidencia del diámetro del inyector y de la presión de suministro en la rata de aireación para llama libre o no confinada, así como los cambios que originan las diferentes configuraciones geométricas de los mezcladores. La segunda parte de este análisis involucra los mismos parámetros mencionados anteriormente, pero observando el comportamiento de las emisiones de humos de combustión en llama confinada.

4.1 Análisis de parámetros geométricos y de flujo en llama libre o no confinada

4.1.1 Variación de la tasa de aireación primaria con el diámetro del inyector para una presión de suministro constante

En la tabla 4 y la figura 4 se presenta la caída en la rata de aireación primaria para un cambio de diámetro entre 0,7 y 1,6 mm, dejando constante las presiones de suministro (0,4, 0,6, 0,8, 1,0 y 1,5 bar).

Tabla 4 Variación promedio de la rata de aireación con el diámetro del inyector

Presión (bar)	%Disminución Promedio
0,4	55,28
0,6	54,29
0,8	54,70
1,0	53,75
1,5	54,17

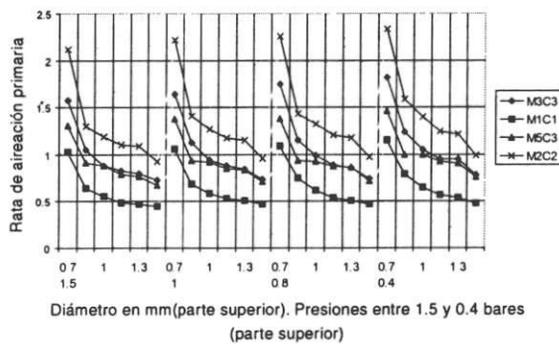


Figura 4. Variación en la rata de aireación primaria para cambios de diámetro

4.1.2 Variación de la tasa de aireación primaria con la presión de suministro para un diámetro del inyector constante

Los rangos de presión empleados fueron 0,4, 0,6, 0,8 bares en mediana presión y 1,0, 1,5 bares en alta presión. En la tabla 5 y la figura 5, se presenta este comportamiento.

Tabla 5 Variación promedio de la rata de aireación con la presión de suministro

Diámetro (mm)	%Disminución Promedio
0,7	10,77
0,8	15,34
1,0	14,24
1,1	13,11
1,3	13,54
1,6	7,78

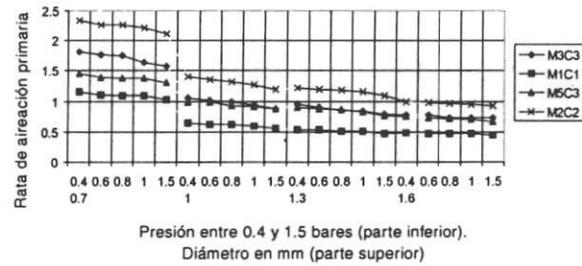


Figura 5 Variación en la rata de aireación primaria para cambios en la presión de suministro para diámetro de inyector constante

Como se pudo observar, las caídas en la rata de aireación primaria debido a la presión de suministro están entre el 7,78 y el 15,34%. Cabe notar que el arrastre de aire mayor se dio para el quemador M2C2, el cual es el de mayores dimensiones geométricas; luego le siguen el quemador M3C3, M5C3 y el M1C1. Esto es un indicativo de que para mayores dimensiones del quemador, el arrastre de aire es mayor; inclusive para el quemador con geometría de mezclador tubo (M5C3) la rata de aireación es mayor que para el quemador con venturi M1C1.

En la tabla 4 y la figura 4 se observa que la caída en la rata de aireación primaria es mucho mayor para cambios en el diámetro del inyector que para cambios en la presión de suministro: en promedio el aumento de 0,7 a 1,6 mm para una presión de suministro constante genera una disminución del orden del 54%; mientras que para el aumento en la presión de suministro entre 0,4 y 1,5 bares y diámetro de inyector constante, la disminución generada se encuentra entre el 7 y el 15%.

4.2 Efecto de la geometría de los mezcladores.

Quemadores: M3C3, M3C4, M5C3

En la tabla 6 se presentan los valores de la rata de aireación primaria para las diferentes geometrías de mezcladores utilizados. Observamos que el venturi que cumple la relación óptima de diseño (M3C3, $D_c = 0,85D_s$) arrastró mayor cantidad de aire que en tubo recto (M5C3); no

obstante que el quemador M5C3 presentó estabilidad de llama en mayores oportunidades arrastró menos aire que el M3C3. El venturi diseñado fuera de los parámetros óptimos (M4C3, $D_c < 0,85D_s$) fue el que presentó menos posibilidad de estabilización.

Tabla 6 Tasas de aireación para las diferentes geometrías de mezcladores

Quemador	Diámetro (mm)	Presión (bar)	Rata aireación
M3C3			0,952
M4C3	1,1	0,4	0,908
M5C3			0,926
M3C3			0,9035
M4C3	1,3		0,875
M5C3			0,8885
M3C3			1,75
M4C3	0,7	0,8	1,54
M5C3			1,377
M3C3			1,129
M4C3	0,8	1,0	1,2694
M5C3			0,934
M3C3			0,88
M4C3	1,0	1,5	0,92

4.3 Efecto del diámetro de salida en la rata de aireación primaria. Quemador M1C1

Esta prueba se realizó variando el diámetro de salida en la cabeza del quemador M1C1, empleando tres diámetros diferentes: 6, 10 y 14 mm. La figura 6 ilustra este comportamiento.

La disminución de la rata de aireación primaria para cambios en el diámetro de salida entre 6 y 14 mm, con variación de diámetros de inyector (0,7, 1,0 y 1,6 mm) y cambio de presión de 0,8 a 1,5 bares, es en promedio del 67% tomando valores muy aproximados en todos estos casos. Este valor promedio indica que es la variable que más afecta la sensibilidad de la rata de aireación, seguido del diámetro del inyector (54%) y finalmente, la presión de suministro (15%).

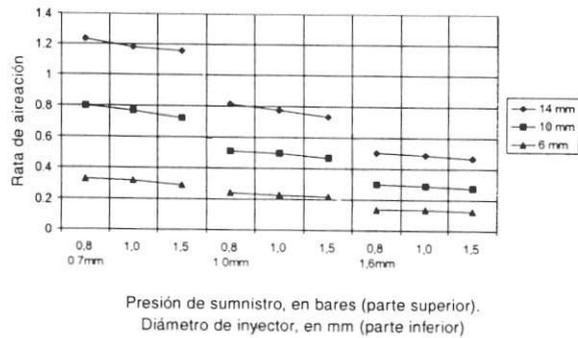


Figura 6 Variación en la rata de aireación primaria para cambio en el diámetro de salida (cabeza). Quemador M1C1

4.4 Comparación de la rata de aireación en un mezclador con y sin él venturi (M3C3 y M5C3)

Para el rango de presiones de trabajo (0,4-1,2 bar) y en el intervalo de diámetros usados se obtuvo estabilidad de llama en todos los casos, tanto para el tubo recto como para el venturi. En la tabla 7 y las figuras 7 y 8, se aprecia la variación de la rata de aireación primaria con la presión de suministro, el diámetro del inyector y el tipo de mezclador.

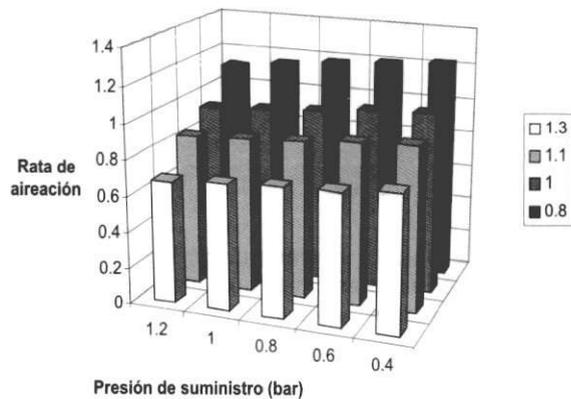


Figura 7 Variación en la rata de aireación primaria para cambios en presión de suministro y diámetro del inyector para el quemador M5C3 (tubo recto, sin venturi)

Tabla 7 Comparación de la rata de aireación primaria (np) para el mezclador con venturi (M3C3) y sin venturi (tubo, M5C3)

P.S. (bar)	Øinyector 0,8 mm			Øinyector 1,0 mm			Øinyector 1,1 mm			Øinyector 1,3 mm		
	np tubo	np venturi	% cambio	np tubo	np venturi	% cambio	np tubo	np venturi	% cambio	np tubo	np venturi	% cambio
1,2	1,116	1,158	3,63	0,938	1,00	6,94	0,84	0,992	14,67	0,676	0,839	19,48
1,0	1,148	1,195	3,89	0,959	8	7,16	0,86	1,028	16,13	0,699	0,849	17,67
0,8	1,178	1,206	2,28	0,98	1,03	6,67	0,87	1,046	15,93	0,719	0,870	17,26
0,6	1,203	1,223	1,68	1,009	3	7,85	0,90	1,061	14,51	0,732	0,892	17,93
0,4	1,222	1,254	2,55	1,025	1,05	13,43	0,92	1,096	15,26	0,764	0,907	15,77
			<u>2,81</u>		0	<u>8,41</u>			<u>15,3</u>			<u>17,62</u>
					1,09							
					5							
					1,18							
					4							

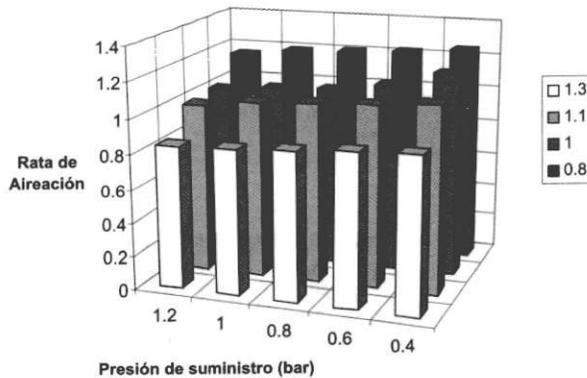


Figura 8 Variación en la rata de aireación primaria para cambios en presión de suministro y diámetro del inyector para el quemador M3C3 (con venturi)

En la tabla 7 y las figuras 7 y 8 se observa que el mezclador con venturi, respecto al tubo sin venturi arrastra mayor cantidad de aire primario cuando se aumentan el diámetro del inyector o la presión de suministro. Similar comportamiento se presenta cuando simultáneamente se aumentan la presión de suministro y el diámetro del inyector.

4.5 Análisis comparativo de composición de humos (%O₂, %CO, %CO₂, %CH₄) en función del diámetro del inyector y la presión de suministro, para llama confinada. Quemador M2C2

El ensayo conservó la obturación de la aireación primaria y secundaria. El quemador fue ensayado en condiciones de llama confinada, para realizar el efecto de la variación del diámetro del inyector y la presión de suministro en las emisiones de oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano inquemado. En las figuras 9 y 10 se ilustran los resultados.

De los resultados obtenidos se observa que:

- El %O₂ en los humos disminuye con el aumento en la presión de suministro para todos los diámetros de inyector.

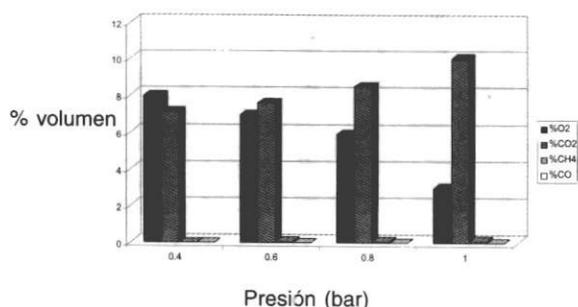


Figura 9. Composición de humos para el quemador M2C2 con un diámetro de inyector de 1,3 mm

- El efecto combinado de aumentos en el diámetro del inyector y la presión de suministro disminuyen más rápidamente el %O₂ en los humos.
- Se observa que la presión de suministro alcanza un nivel de incidencia importante cuando la operación se realiza con llama confinada con aireación secundaria.
- El %CO₂ aumenta si se incrementa el diámetro del inyector, viéndose la incidencia de la falta de oxígeno en la formación de CO₂.

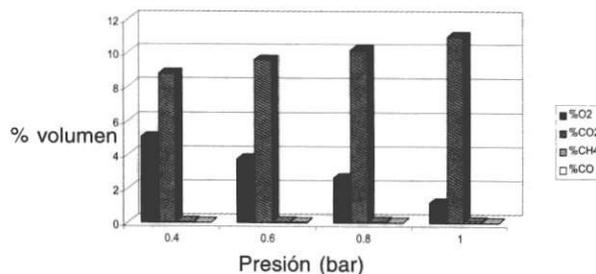


Figura 10. Composición de humos para el quemador M2C2 con un diámetro de inyector de 1,6 mm

4.6 Variación de las ratas de aireación primaria para llama confinada y para llama libre

Para este propósito seleccionamos el quemador M3C3 como el más representativo, ya que operó de forma estable para tres diámetros de inyectores diferentes entre cuatro presiones de suministro (0,4-1,0 bar) tanto en condiciones de llama libre, como de llama confinada.

La tabla 8 y la figura 11 contienen datos del comportamiento de la rata de aireación.

Tabla 8 Variación de la rata de aireación según la condición de la llama: confinada o sistema cargado (ncarga) o libre en vacío (nvacío). Datos para el quemador M3C3

Psum (bar)	Øinyector 1,0 mm			Øinyector 1,1 mm			Øinyector 1,3 mm		
	ncarga	nvacío	%cambio	ncarga	nvacío	%cambio	ncarga	nvacío	%cambio
0,4	1,042	1,184	11,99	1,047	1,086	3,6	0,938	0,907	3,3
0,6	1,02	1,095	6,85	1,017	1,061	4,15	0,8902	0,892	0,2
0,8	0,981	1,05	6,6	0,979	1,046	6,4	0,877	0,870	0,8
1,0	0,946	1,033	8,42	0,94	1,028	8,2	0,8675	0,850	2,0
% dismin.	<u>9,21%</u>	<u>12,75%</u>	<u>8,46</u>	<u>9,8%</u>	<u>5,34%</u>	<u>5,6</u>	<u>7,54%</u>	<u>6,28%</u>	<u>1,6</u>
0,4-1,0 bar	<u>promedio</u>			<u>promedio</u>			<u>promedio</u>		

Para los diámetros de inyector de 1,0 y 1,1 mm, la rata de aireación para el quemador en llama libre fue mayor que la rata de aireación para llama confinada en un 7% para una presión de suministro constante. En diámetros mayores (1,3 mm), esta diferencia tiende a disminuir (1,6%). Se puede decir que el efecto atenuador del arrastre de aire primario en sistemas de llama confinada se debe a una contrapresión en la cabeza del quemador originada por las condiciones mismas del confinamiento; lo anterior se mostró para diámetros pequeños (menores de 1,1 mm), los cuales ayudan al aumento en el arrastre de aire primario. Posiblemente como el arrastre de aire disminuye para los diámetros mayores, el efecto que tiene la contrapresión en la cabeza no es significativo.

4.7 Determinación del factor de aireación total, del factor de aire utilizado y del no utilizado

Para este análisis utilizamos el quemador M3C3 con tipo arandela, ya que mostró esta-

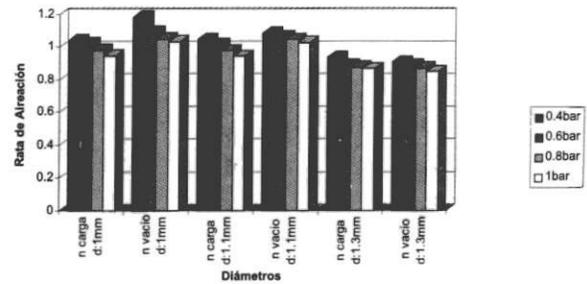


Figura 11 Comparación de las ratas de aireación primaria en condiciones de llama libre (vacío) y llama confinada (carga)

bilidad en condiciones de llama libre y confinada para tres diámetros y un rango de presiones de 0,4 a 1,0 bar.

En la tabla 9 y las figuras 12 y 13 se presentan las ratas de aireación totales según variaciones de la presión de suministro y del diámetro de inyector.

Tabla 9 Ratas de aireación para cambios en la presión de suministro y diámetro de inyector. Datos para el quemador M3C3. Siete hilos de apertura de zona primaria de aireación

Presión de Sum. (bar)	n total	Diámetro de inyector: 1,0 mm			
		n primario	n utilizado	n secundario	n sin utilizar
0,4	2,001	1,042	0,976	0,959	1,025
0,6	1,787	1,02	0,97	0,767	0,812
0,8	1,642	0,981	0,971	0,661	0,671
1,0	1,517	0,946	0,975	0,571	0,542

Presión de Sum. (bar)	n total	Diámetro de inyector: 1,1 mm			
		n primario	n utilizado	n secundario	n sin utilizar
0,4	1,866	1,047	0,989	0,819	0,878
0,6	1,674	1,017	0,999	0,657	0,676
0,8	1,562	0,979	1,0	0,538	0,563
1,0	1,298	0,944	0,946	0,354	0,346

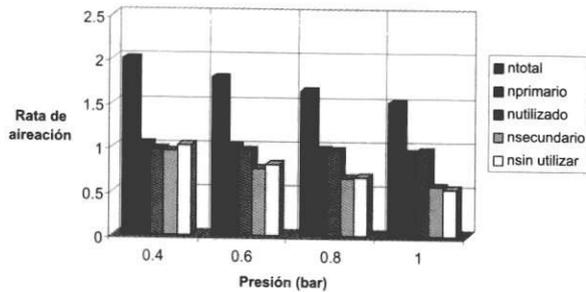


Figura 12 Factor de aireación total, aire utilizado y sin utilizar para el quemador M3C3 con un diámetro de inyector de 1,0 mm

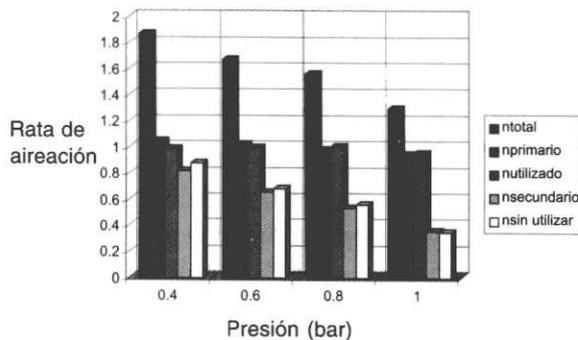


Figura 13 Factor de aireación total, aire utilizado y sin utilizar para el quemador M3C3 con un diámetro de inyector de 1,1 mm

Respecto a los gráficos anteriores se puede anotar lo siguiente:

- La rata de aireación útil para todos los casos es del orden de 0,979 en promedio, siendo un valor constante.
- El porcentaje de aireación secundaria se disminuye con aumentos en la presión de suministro para todos los casos. Lo mismo para aumentos en el diámetro del inyector.
- La rata de aireación secundaria es la variable más sensible a cambios en el diámetro del inyector. Para una disminución del 29,23% se requiere aumento en el diámetro de 1,0 a 1,3 mm; mientras que para obtener un cambio similar (32,44%) vía presión de suministro, se necesita aumentarla de 0,4 a 1,0 bar.

- El porcentaje de aire secundario toma importancia en la combustión cuando aumentamos la presión de suministro y el diámetro del inyector (fenómenos que inhiben el arrastre de aire primario).

5. Conclusiones

- En un quemador atmosférico de alta presión en llama libre, las principales variables que inciden sobre la rata de aireación primaria son: diámetro de salida en la cabeza, el diámetro del inyector y la presión de suministro. Tiene mayor incidencia el diámetro de salida y el diámetro del inyector; la incidencia de la presión de suministro es menor comparativamente con las anteriores variables. Al aumentarse el diámetro del inyector, la rata de aireación se disminuye; si se disminuye el diámetro de salida en la cabeza del quemador, la rata de aireación disminuye. Cuando la presión de suministro se aumenta, la rata de aireación disminuye.
- El efecto combinado de aumentar la presión de suministro y el diámetro del inyector, reduce ostensiblemente la rata de aireación. Es significativamente mayor la contribución del diámetro del inyector en este comportamiento. De acuerdo con el comportamiento anterior, en este tipo de quemadores la disminución de la rata de aireación primaria por incremento en la presión de suministro puede ser fácilmente compensada por pequeñas disminuciones en el diámetro del inyector. Este comportamiento se torna de interés práctico en circunstancias en las que se requieran pequeñas variaciones de potencia térmica.
- En quemadores atmosféricos de alta presión de aire inducido, las configuraciones de mezclador con tramo convergente-divergente presentan mayor rata de aireación que en los casos donde se tienen mezcladores en tubo.
- La tendencia general que se observa cuando se comparan mezcladores con tramo convergente-divergente y de tubo, es que con los primeros se alcanzan mayores ratas de aireación

primaria. Sin embargo, dependiendo del tipo de estabilización de llama y los valores determinados del diámetro del inyector se tienen comportamientos diversos:

- Cuando se implementa estabilización tipo arandela, para diámetros de inyector menores o iguales a 0,8 mm, es indiferente el uso de un mezclador convergente-divergente o del tipo tubo, ya que la rata de aireación primaria es aproximadamente la misma.
- El uso de un mezclador convergente-divergente se hace indispensable para aumentos en el diámetro del inyector y la presión de suministro. En esta situación la diferencia en la rata de aireación primaria al emplear uno u otro mezclador es bastante elevada, siendo mayor la correspondiente al convergente-divergente.
- La estabilización tipo malla presenta el comportamiento inverso, para diámetros grandes la rata de aireación primaria es aproximadamente igual y viceversa.
- La estabilización tipo arandela ofrece la posibilidad de un mayor arrastre de aire, bien sea en el caso de geometría convergente-divergente o la del tipo tubo haciéndose la comparación para diámetro de inyector y presión de suministro iguales.
- Al implementar quemadores atmosféricos de aire inducido a alta presión en ambientes confinados, con admisión de aire secundario por inducción, se obtienen factores totales de aireación mayores al estequiométrico. En los casos analizados, oscilaron entre 1,3 y 2, intervalo que depende de las condiciones de presión, diámetro del inyector, obturación del aire primario y la obturación del aire secundario. Si tiene en cuenta la incidencia de la presión de suministro y el diámetro del inyector, se observan los siguientes comportamientos:
 - Dado un diámetro de inyector, al aumentarse la presión de suministro, se reduce el factor de aireación total y secundario. Siendo más fuerte la disminución del factor de aireación secundario.

- Dado una presión de suministro, el aumento del diámetro del inyector reduce el factor de aireación total y secundario. Para diámetros menores de 1,1 mm, se tienen excesos de aire mayores o iguales al 50% y para diámetros mayores excesos superiores o iguales al 30%.

- El efecto combinado del diámetro del inyector y la presión de suministro, inducen disminuciones significativas del factor de aireación total, pero siguen siendo superiores al estequiométrico.

- Se presenta alto porcentaje de aire sin utilizar en este tipo de quemadores con inducción secundaria. Ello debe ser tenido en cuenta al momento de poner a punto este tipo de sistemas debido a que se disminuye la eficiencia de combustión. Para ello se tendrían las siguientes opciones:

- Mantener la máxima rata de aireación primaria y regular mediante la admisión secundaria. Para esto debe resolverse el problema de apagado cuando se alcanzan las condiciones límite de obturación en la zona de arrastre secundario.

- Mantener el valor de aireación secundaria al máximo y regular el exceso de aire por medio de la obturación de la zona primaria de arrastre. Esta es la opción más viable, ya que el porcentaje de aire primario se regula de una forma muy simple.

Nomenclatura

PCI: Poder calorífico inferior [kW-h/m³].

Pt: Potencia térmica.

PCI: Poder calorífico inferior [kW-h/m³].

Pt: Potencia térmica.

A: Área del inyector [m²].

C: Coeficiente de descarga.

Ds: Diámetro de salida [mm].

K: Qmr/presión reducida.

(P reducida = P absoluta/P atmosférica)

DP: Contrapresión en la cabeza [Pa].
 q_V : Caudal de gas [$m^3(n)/hr$].
 r_M : Densidad de la premezcla [kg/m^3].
 r_A : Densidad del aire [kg/m^3].
 P_{ATM} : Presión atmosférica [Pa].
 P_o : Presión absoluta en el inyector [Pa].
 P^* : Presión de referencia [Pa].
PCI: Poder calorífico inferior [$kW-h/m^3$].
Pt: Potencia térmica.
 Q_{mr} : Caudal mínimo reducido.
 Q^* : Caudal de gas en el estado de referencia [$m^3 (*)/hr$].
 T^* : Temperatura de referencia [$^{\circ}K$].
 T_o : Temperatura en la descarga [$^{\circ}K$].
M1C1: Mezclador 1, cabeza 1.
M2C2: Mezclador 2, cabeza 2.
M3C3: Mezclador 3, cabeza 3
M3C4: Mezclador 3, cabeza 4.
M3C5: Mezclador 3, cabeza 5

Agradecimientos

Al Comité para el Desarrollo de la Investigación, CODI, adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Antioquia, que con fondos provenientes de la estampilla municipal y departamental financió este proyecto. También se hacen extensivos los agradecimientos al Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería, CIA, por su apoyo logístico en el desarrollo de este proyecto.

Referencias

1. Simmonds, W. A. "Primary Air Entrainment in Gas Burners". *Trans. Inst. Gas Engineering* 104, 1954/55. pp. 557-616.
2. mousser P. Contribution a l' Etude de l'Entrainment d'Air Primaire des les Brûleurs Atmospheriques de Faible Puissance. *Communication Technique du Congres de l'ATG*. 1972, pp. 252-273.
3. Association Technique De L'industrie Du Gas En France. *Collection des Techniques Gazieres: Calcul, Conception et Utilisation de Brûleurs Industrial a Gas*. Paris, 1983, pp. 321.
4. Doupis M. "Les Brûleurs à Induction d'Air Atmospherique d'Usage Industriel". *Rev. Gen. Ther.* No. 219, Mars, 1980, pp. 199-213.
5. Jaeglè J., Morillon R. Et Maraval L. "Nombres sans Dimensions pour le Calcul del' Ecoulement d'un Fluide Compressible. Application au Calcul des Injecteurs de Brûleurs des Flammes de Difusión at des Col Soniques". *Revue General de Thermique*. 1972, Vol. 50, No. 121. pp. 19-50.
6. Amell A., Gil E., Cadavid F. "Incidencia de los factores geométricos y de flujo sobre la aireación primaria en un quemador atmosférico a gas a baja presión". *Reporte del Proyecto*. CODI, Universidad de Antioquia. 1998.
7. Amell A., Gil E., Maya R. "Diagramas de combustión y eficiencia teórica de los gases colombianos". *Reporte del Proyecto*. CODI, Universidad de Antioquia. 1997.