

EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO Y METANO EN UN QUEMADOR ATMOSFÉRICO DE GAS NATURAL

Andrés A. Amell A.*
Edison Gil B**,
Francisco J. Cadavid S.***

PALABRAS CLAVES: Quemadores atmosféricos, emisiones de Monóxido de Carbono (CO), emisiones de Metano (CH₄), combustión, gas natural y operación de quemadores

RESUMEN

En Colombia el desarrollo de la industria de equipos a gas se ha caracterizado por la copia de formas, sin ahondar en los principios y parámetros básicos de operación y diseño de los artefactos. Los retos actuales derivados del plan de masificación del gas natural exigen el conocimiento y dominio de los fenómenos incidentes en el diseño y operación de los equipos.

En este proyecto se estudian las emisiones de gases que producen efectos ambientales y disminución de eficiencia, monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄), que se presentan en un quemador atmosférico de premezcla, al modificar parámetros de flujo como la presión de suministro y algunos parámetros geométricos como el tamaño del inyector y de las boquillas, la longitud del mezclador y el diámetro del cuello del venturi.

Los resultados obtenidos muestran que la geometría del mezclador tiene una incidencia significativa en el incremento de las emisiones de CO y CH₄. De otra parte, cuando la rata de aireación es menor o igual a 0.5 para potencias mayores de 2.3 kW se obtuvo que las emisiones de CO son superiores al límite crítico. El aumento de la presión de suministro del gas tiende a disminuir las emisiones de CH₄.

KEYWORDS: Atmospheric burners, carbon monoxide emissions, methane emissions, combustion, natural gas, burners operation.

* Ingeniero Mecánico. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas.

** Ingeniero de Petróleos. Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

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

ABSTRACT

In Colombia, the development of gas equipment industry has been characterized by a copy of foreign systems, without going further on the basic principles of operation and design of gas appliances. In order to guarantee an efficient and safe use of this energetic during the present plan of massive use of gas in the country, it is necessary to know and dominate all the main phenomena influencing the design and operation of gas appliances, among them is the rate of primary aeration.

In this study we analyze the production of CO and CH₄ emissions in a premixed atmospheric burner when we modify: pressure supply, tip size, injector size, mixer length and diameter of the throat.

Results show that mixer geometry has a great influence on CO and CH₄ emissions. When aeration rate was less or equal than 0.5 for power greater than 2.3 kW, CO emissions were beyond critic boundary. In the other hand, when we increased gas pressure supply, we observed that CH₄ emissions decreased.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la importancia de los gases combustibles dentro de la canasta energética nacional se hace evidente, básicamente por su contribución a la disminución del impacto ambiental generado por el uso de los diferentes energéticos y por permitir un uso racional de los mismos.

El plan de masificación del consumo de gas busca que se aumente considerablemente su uso, principalmente en los sectores residencial, comercial e industrial, donde existe un consumo muy elevado de electricidad en procesos como cocción y calentamiento en general. En los sectores mencionados el gas se utiliza en los llamados quemadores atmosféricos. Por esto el estudio de la combustión de los gases en estos sistemas permite obtener conocimientos y tener criterios precisos para su diseño y correcta operación. Esta situación no es muy clara en Colombia dado que no siempre los parámetros de diseño responden a criterios tecnológicos y científicos acordes a los fenómenos de la combustión, lo cual sacrifica la eficiencia en la utilización de este energético y compromete la seguridad de los usuarios.

El objetivo general de este trabajo es evaluar los cambios que se presentan en las emisiones de CO y CH₄ al variar algunos parámetros de flujo y geométricos en quemadores atmosféricos de premezcla. El CO es un gas tóxico y es combustible,

la fuga de CH₄ al ambiente contribuye al efecto invernadero y reduce la eficiencia. Su presencia compromete la seguridad de los usuarios y la eficiencia de los sistemas de combustión.

El estudio se realiza en quemadores atmosféricos de baja presión (presión de suministro menor a 100 mbar) y potencias térmicas que varían desde 1 kW a 4 kW, medidas a temperatura ambiente promedio de 20 °C y presión atmosférica de 852 mbar, condiciones atmosféricas correspondientes a Medellín.

1. QUEMADOR ATMOSFÉRICO DE PREMEZCLA [1-4]

1.1 Funcionamiento de un Quemador Atmosférico

El quemador es el elemento que permite realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable. Es decir, asegurar la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calórica especificada, y distribuir la zona de reacción (llama) y la circulación de los productos de combustión de modo que el calor producido se transfiera a la carga de manera eficiente.

El quemador atmosférico de premezcla es aquel en el cual el gas combustible y el aire primario se mezclan previamente antes de llegar a la zona de combustión. Si el quemador es de gas inductor, a expensas de la energía cinética de éste se arrastra el aire

atmosférico; si es de aire inductor, a expensas de la energía de presión del aire se arrastra el gas, que generalmente se encuentra a presión relativa nula. El calificativo de atmosférico se debe a que el aire primario es arrastrado desde la atmósfera por la corriente de gas, y también porque la combustión se realiza a presión atmosférica. El principio de funcionamiento fue desarrollado en 1855 por el químico alemán Robert Bunsen.

La combustión que se efectúa en este tipo de quemadores tiene las siguientes características:

1.2 Principales elementos del quemador.

Los elementos geométricos básicos del quemador atmosférico de premezcla son:

- **Inyector:** Desde donde se descarga el gas combustible. El gas al expandirse actúa como fluido inductor para arrastrar al aire primario de la atmósfera.
- **Mezclador:** Donde el gas y el aire arrastrado se mezclan, buscando siempre alivio de presiones y buen contacto entre aire y gas.
- **Cabeza:** Donde se efectúa la combustión de la mezcla aire - combustible al fluir la mezcla por las boquillas.

1.3 Parámetros Característicos del Quemador Atmosférico de Premezcla. [1]

- **Potencia térmica.** Es la energía térmica por unidad de tiempo que se obtiene del quemador al reaccionar el combustible con el comburente. La potencia térmica que puede desarrollar un quemador queda definida por:

$$P = Q_n \cdot PC \quad (1)$$

- **Rata de aireación primaria.** Es la relación entre el aire inducido (aire primario) que admite el quemador y el aire teórico. Queda definida por la siguiente expresión:

$$N_p = R/V_a \quad (2)$$

$$\text{Donde } R = Q_{ap}/Q_g \quad (3)$$

El funcionamiento óptimo de un quemador atmosférico se caracteriza por las siguientes condiciones:

- Máxima eficiencia.
- **Combustión higiénica.** La producción de Monóxido de carbono durante la combustión debe ser nula o estar dentro del rango establecido por las normas.
- Emisiones de NOx dentro del rango establecido por las normas.
- Estabilidad de llama.
- Llama sin puntas amarillas y sin producción de hollín.
- Operación silenciosa.
- Ignición correcta en las boquillas.

El funcionamiento óptimo de un quemador se logra cuando se establecen criterios precisos para su diseño y el quemador se opera con un adecuado ajuste de la relación aire-combustible en el momento de la combustión de un gas dado. El diseño del quemador y el ajuste de la combustión pueden sufrir influencia por las condiciones atmosféricas del lugar donde se realiza la combustión, particularmente por la incidencia de la presión, temperatura y la higrometría [8].

2. PROCESO DE FORMACIÓN DE CO EN LLAMAS.

Los principales contaminantes emitidos en un sistema de combustión son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), los óxidos de azufre (SOx), los compuestos orgánicos (hidrocarburos inquemados) y las partículas (hollín). En el caso de los combustibles gaseosos, los SOx se evitan si el gas es tratado previamente para eliminar los compuestos que contienen azufre, como el H₂S. En el caso del gas natural, su composición presenta nulo o bajo contenido de azufre, por lo tanto la producción de SOx no es considerable.

Los niveles de emisión en un equipo dado dependen fundamentalmente de la interacción entre procesos

físicos y químicos, especialmente aquéllos que dominan el proceso de mezclado gas-aire. Este mezclado debe ser homogéneo con el fin de asegurar la combustión lo más completa posible del gas. Para algunos contaminantes como el CO y el hollín las reacciones de formación son una parte íntima del proceso de combustión, esto es, la serie de reacciones elementales en cadena y la formación de especies químicas [3]. Otros factores que contribuyen a tener una combustión incompleta y por tanto emisiones de CO [2] [8] son: viciado del aire, composición del gas, mezcla deficiente aire-gas y condiciones atmosféricas locales.

Para otros contaminantes como los NOx y los SOx, las reacciones de formación no son parte del proceso, aunque ocurren en la atmósfera creada por los productos de la combustión.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA EMISIONES DE CO Y CH₄

3.1 Descripción del Montaje y Equipos de Medición

El montaje experimental comprendió básicamente los siguientes elementos:

- Cilindros de gas natural a alta presión. Se utilizó metano comercial, cuya composición se muestra en la Tabla I.
- Regulador de doble etapa para alta presión con un rango en la carátula de salida de 50 a 1400 kPa, para el cilindro de metano.
- Regulador de baja presión, una etapa, para ajustar la presión de alimentación del gas al quemador.
- Medidor de volumen de gas tipo diafragma. Marca Elster con un rango de 0.025 a 2.5 m³/h
- Manómetros para baja presión. Rango de medición entre 0 y 160 mbar, marca Haenni.
- Quemadores. Con el fin de tener flexibilidad en el montaje, minimizar costos y hacer las pruebas en un mínimo tiempo, el quemador debe permitir hacer un cambio rápido en aquellas partes que se

van a variar, como el tubo mezclador (diámetro del cuello y longitud del difusor), el inyector y la cabeza. Por esto se construyó un quemador versátil, de manera que fuera fácil el intercambio de sus principales elementos. Como componentes básicos del quemador se tienen:

- Soporte del inyector.
- Inyectores. Se utilizaron 4 inyectores, de diámetros 1.0, 1.1, 1.2 y 1.3 mm.
- Tubo porta-mezclador.
- Mezcladores. Se emplearon 3 mezcladores, detallados en la Tabla II. El mezclador VP-12 es aquel sin sección convergente – divergente, es decir, que tiene forma cilíndrica. En la Figura 1 se muestra un esquema de un mezclador con sección convergente – divergente y sus parámetros geométricos.
- Codo fijo para soporte de la cabeza.
- Cabezas. En la Tabla III se detallan las cabezas empleadas. Los puertos se perforaron sobre el borde de las cabezas, con una inclinación de 25°.

Tabla I. Composición y propiedades del gas metano comercial.

<i>Componente</i>	<i>Concentración</i>
Metano	93 %
Etano	3.58%
Propano	1.02%
n- Butano	1900 ppm
i- Butano	2100 ppm
n- Pentano	600 ppm
i- Pentano	600 ppm
Hexano	200 ppm
Heptano	600 ppm
N ₂	4700 ppm
CO ₂	7000 ppm
<i>Propiedad</i>	
Vol. aire	9.93 m ³ (n)/ m ³ (n) gas
P.C.S.	11.6 kWh/m ³ (n) gas
Grav. Especifica	0.6
%CO ₂ máx.	11.6

- Analizador de gases tipo infrarrojo no dispersivo. El equipo utilizado en este trabajo fue un MULTOR 610, el cual detecta 4 componentes: CO, CO₂, metano y oxígeno, este último componente hallado mediante una celda electroquímica incorporada al analizador.

3.2 Descripción del Método Experimental.

La medición de las emisiones de CO y CH₄ se realizó como lo recomienda la norma NTC 2832, la cual es una adaptación de la norma europea EN 30, UNE 60-775-81 [10]. En esta norma se establece que el contenido de CO corregido en los humos secos no debe ser mayor de 0.1%. El quemador de ensayo se colocó en una cocina comercial y se recolectaron los humos con la campana recomendada en la mencionada norma.

Tabla II. Descripción de los mezcladores empleados en los ensayos.

Parámetros Geométricos (mm)	V11-L6	V12-L6	VP-12
Dc	11	12.5	12.5
Lc	28	31	31
Ld1	61	70	-
Angulo 1	3.61°	3.58°	0°
Long. total	94	106	143.5
Ld2	-	-	-
Angulo 2	-	-	-
Long. total	-	-	-
D. Salida máx	18.7	21.25	12.5

Para aumentar la potencia se cambiaron la presión de suministro y el diámetro del inyector. Además de este parámetro geométrico se variaron los siguientes: diámetro del cuello, ángulo de la sección divergente y diámetro máximo de salida del mezclador con lo cual se varía el ángulo del mezclador, área de los puertos al modificar el número de estos. En relación con la incidencia de la composición química del gas, se trabajó con un gas de composición constante.

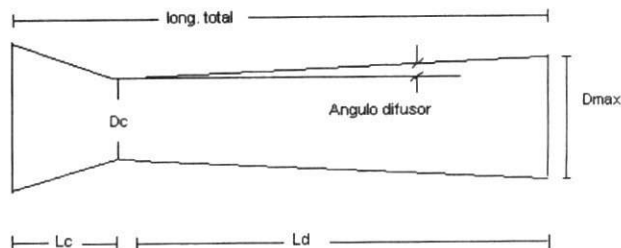


Fig. 1. Esquema del mezclador.

Tabla III. Descripción de las cabezas utilizadas.

Parámetros Geométricos (mm)	Denominación				
	C1	C2	C3	C4	C5
Diámetro de puerto	4.65	4.6	4.0	3.0	2.0
No. puertos	46	33	34	34	43
Area total, cm ²	7.812	5.604	4.272	2.403	1.351

Durante los experimentos los parámetros iniciales que se registraron fueron la temperatura ambiente, la temperatura del gas y la humedad relativa. Durante las pruebas se midió %CO y %CH₄ en humos.

Para las pruebas preliminares se utilizaron los 4 inyectores (1.0, 1.1, 1.2 y 1.3 mm de diámetro), los 3 mezcladores (V11-L6, V12-L6 y VP-12) y las 5 cabezas descritas anteriormente. El área de la sección de entrada de aire se mantiene constante. Para las pruebas finales en las cuales se aumentó la potencia vía presión de suministro, se empleó una cabeza con mecanismo de estabilización y el mezclador V12-L6.

3.4 Ecuaciones Empleadas [10].

Los volúmenes de CO y de CH₄ leídos en el analizador se deben corregir para tener en cuenta la dilución que se presenta por la entrada de aire a la campana colectora de humos. Las ecuaciones que se utilizan son:

$$\%CO)_{\text{corr}} = \frac{\%CO_2)_{\text{leído}}}{\%CO_2)_{\text{máx}}} \times \%CO)_{\text{leído}} \quad (4)$$

$$\%CH_4)_{\text{corr}} = \frac{\%CO_2)_{\text{leído}}}{\%CO_2)_{\text{máx}}} \times \%CH_4)_{\text{leído}} \quad (5)$$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 Pruebas iniciales.

Con estas pruebas se pretendió identificar la incidencia de los parámetros geométricos sobre la producción de CO y metano, en particular para las emisiones de CO mayores al límite permisible (0.1% en humos secos). En la Tabla IV se presentan los valores de rata de aireación primaria, %CO y %CH₄ obtenidos con los 8 mezcladores, las dos cabezas y 3 inyectores (1.0, 1.1 y 1.2 mm). La presión de suministro de gas fue de 20 mbar.

En las Figuras 2 a la 5 se muestra el comportamiento del % CO y % CH₄ para los mezcladores e inyectores utilizados. En las Figuras 2 y 3 se aprecia como los mezcladores sin tramo convergente-divergente (mezclador cilíndrico) contribuyen de manera significativa a la formación de CO. En particular tuvieron niveles de emisiones superiores al límite crítico. Esto puede deberse a la falta de un mezclado homogéneo del aire primario y el gas, debido a la ausencia de un tramo divergente que coadyuve al contacto íntimo entre el oxígeno y las moléculas de combustible. De estos resultados también se aprecia

Tabla IV. Emisiones de CO y CH₄ para diferentes valores de aireación primaria.

Inyector (potencia)	Vénturi	CABEZA 1			CABEZA 3		
		Np	% CO)corr.	%CH ₄)corr	Np	% CO)corr.	%CH ₄)corr
1 mm (1.65 kW)	V9-L6	0.793	0.0967	0.0000	0.758	0.0981	0.1374
	V9-L9	0.742	0.0223	0.0892	0.750	0.0576	0.1152
	V11-L6	0.746	0.0240	0.0959	0.784	0.0591	0.1379
	V11-L9	0.774	0.0224	0.1118	0.703	0.0360	0.1079
	V12-L6	0.784	0.0215	0.1076	0.855	0.0626	0.1043
	V12-L9	0.776	0.0214	0.1072	0.861	0.0507	0.1351
	VP-9	0.531	1.6373	0.3608	0.545	0.1832	0.2442
	VP-12	0.670	1.2518	0.2225	0.700	0.3432	0.2746
1.1 mm (2.05 kW)	Vénturi	Np	% CO)corr.	%CH ₄)corr	Np	% CO)corr.	%CH ₄)corr
	V9-L6	0.669	0.0970	0.0194	0.675	0.0534	0.0712
	V9-L9	0.682	0.0397	0.0793	0.672	0.0172	0.1030
	V11-L6	0.764	0.0195	0.0976	0.677	0.0731	0.1755
	V11-L9	0.693	0.0589	0.0981	0.686	0.0181	0.1807
	V12-L6	0.711	0.0197	0.1180	0.682	0.0503	0.1341
	V12-L9	0.687	0.0000	0.1347	0.666	0.0612	0.1377
	VP-9	0.477	0.6228	0.2725	0.466	1.3510	0.3028
	VP-12	0.584	0.4763	0.1121	0.557	0.9071	0.1374
1.2 mm (2.42 kW)	Vénturi	Np	% CO)corr.	%CH ₄)corr	Np	% CO)corr.	%CH ₄)corr
	V9-L6	0.634	0.0000	0.1206	0.609	0.0000	0.1300
	V9-L9	0.642	0.0349	0.1398	0.615	0.0263	0.1580
	V11-L6	0.669	0.0000	0.0877	0.665	0.0000	0.1342
	V11-L9	0.643	0.0000	0.1504	0.625	0.0913	0.0913
	V12-L6	0.681	0.0238	0.1191	0.634	0.0000	0.1250
	V12-L9	0.598	0.0188	0.1692	0.644	0.1019	0.1835
	VP-9	0.440	0.3599	0.1693	0.436	0.4752	0.1512
	VP-12	0.541	0.8943	0.2811	0.528	0.5739	0.1640

que la condición de una rata de aireación alta (mayor de 0.6) no es suficiente para la no formación de CO por encima de un valor crítico. Así, por ejemplo, para el inyector de 1.0 mm y el mezclador sin tramo divergente – convergente (VP-12) se tiene una rata de aireación de 0.67 y un %CO de 1.25%, mientras que con el inyector de 1.1 mm y un mezclador con tramo divergente – convergente (V11-L9), la rata de aireación es 0.693 y el %CO es 0.059, (ver Tabla IV).

En las Figuras 4 y 5 se observa la incidencia de los parámetros geométricos en las emisiones de Metano. Nuevamente se aprecia que en los mezcladores cilíndricos las emisiones de CH₄ se elevan con respecto a las emisiones en los mezcladores con tramo convergente - divergente. Para mezcladores cilíndricos, se observan %CH₄ corregido mayores de 0.1% con valores extremos hasta de 0.35%. Para los mezcladores con tramos convergente - divergente, en la mayoría de los casos las emisiones son comparables a un valor de 0.1%. Es importante notar que en todos los ensayos se obtuvieron emisiones de CH₄.

4.2 Pruebas finales de emisiones de CO y CH₄

Se realizaron unas pruebas adicionales para determinar las emisiones de CO y CH₄ trabajando con presiones de suministro de 20, 40, 60 y 80 mbar, con los 4 inyectores, el mezclador con vénturi V12-L6, una cabeza con mecanismo de estabilización de llama y diferentes valores del área de la sección de entrada de aire primario. En las Tablas V, VI y VII se presentan los principales resultados obtenidos para 3 presiones de suministro, en los cuales la variación de la aireación primaria (Np) corresponde a una determinada posición del obturador. Se utilizó una cabeza con mecanismo de estabilización, diferente a las utilizadas en las pruebas anteriores. En las Figuras 6-8 se muestran los resultados en forma gráfica para el inyector de 1.0 mm.

Tabla V. Valores de aireación primaria, %CO y %CH₄ para 4 inyectores, mezclador V12-L6 y 40 mbar.

Iny., mm	Potencia kW	40 mbar		
		Np	CO	CH ₄
1.3	3.994	0.595	0.0198	0.1581
		0.566	0.0597	0.1791
		0.511	0.1063	0.1771
		0.432	0.1251	0.1720
		0.282	0.1666	0.1666
1.2	3.454	0.603	0.0000	0.1406
		0.564	0.0447	0.1118
		0.548	0.0718	0.1437
		0.504	0.1919	0.1279
		0.443	0.1930	0.1544
1.1	3.215	0.468	0.1945	0.1238
		0.593	0.0000	0.1929
		0.510	0.1090	0.1744
		0.477	0.1592	0.1820
		0.438	0.2911	0.2239
1.0	2.372	0.413	0.3265	0.1959
		0.550	0.0000	0.1829
		0.473	0.0251	0.1506
		0.426	0.0908	0.1816
		0.401	0.1392	0.1856
		0.372	0.1996	0.1774

Durante los experimentos los parámetros iniciales que se registraron fueron la temperatura ambiente, la temperatura del gas y la humedad relativa. Durante las pruebas se midió %CO y %CH₄ en humos.

En relación con las emisiones de metano, los ensayos desarrollados muestran que estas emisiones no experimentan cambios significativos con el incremento de la rata de aireación, ello puede constatarse en las Figuras 6, 7 y 8.

En cuanto a la incidencia de la presión de suministro, de las Tablas V, VI, y VII y en las Figuras 6, 7 y 8 se observa que su incremento tiende a disminuir las

emisiones de Metano. Así, por ejemplo, para una rata de aireación de 0.6, cuando se aumenta la presión de suministro desde 40 mbar a 80 mbar las emisiones de metano disminuyen en un 100%.

Tabla VI. Valores de aireación primaria, %CO y %CH₄ para 4 inyectores, mezclador V12-L6 y 60 mbar.

60 mbar				
Iny, mm	Potencia kW	Np	CO	CH ₄
1.3	4.749	0.509	0.0000	0.1278
		0.463	0.0169	0.1353
		0.363	0.0542	0.1220
		0.323	0.1112	0.1235
		0.279	0.1511	0.1385
1.2	3.839	0.710	0.0000	0.1500
		0.595	0.0200	0.1198
		0.559	0.1018	0.1425
		0.444	0.1102	0.1574
		0.372	0.1220	0.0813
1.1	3.742	0.295	0.2142	0.2307
		0.599	0.0393	0.1766
		0.568	0.0605	0.1614
		0.511	0.1806	0.1606
		0.457	0.1729	0.2075
1.0	2.663	0.424	0.2895	0.1544
		0.658	0.0000	0.1062
		0.552	0.0220	0.1101
		0.467	0.1365	0.1137
		0.439	0.2067	0.1608
		0.390	0.2682	0.1565

5. CONCLUSIONES

1. En quemadores atmosféricos de aire inducido, la configuración geométrica del mezclador afecta las emisiones de CO y CH₄. En mezcladores sin tramo convergente – divergente (mezclador cilíndrico), estas emisiones se incrementan de manera significativa. Cuando se implementan mezcladores con tramo convergente-divergente se observa una reducción importante de las emisiones.
2. En quemadores con mezcladores sin tramo convergente - divergente, aún las ratas de aireación primaria altas (mayores de 0.6) no son suficientes para evitar la formación de monóxido

Tabla VII. Valores de aireación primaria, %CO y %CH₄ para 4 inyectores, mezclador V12-L6 y 80 mbar.

80 mbar				
Iny., mm	Potencia KW	Np	CO	CH ₄
1.3	5.510	0.593	0.0000	0.0835
		0.581	0.0385	0.1924
		0.530	0.0744	0.1041
		0.475	0.0803	0.1070
		0.441	0.1311	0.1788
1.2	4.595	0.750	0.0000	0.0583
		0.726	0.0265	0.1062
		0.656	0.0677	0.0903
		0.564	0.0908	0.0726
		0.510	0.0911	0.0759
1.1	4.233	0.590	0.1792	0.1344
		0.694	0.0000	0.2173
		0.590	0.0444	0.1774
		0.582	0.0949	0.1709
		0.480	0.1631	0.1813
1.0	3.000	0.402	0.1741	0.1583
		0.788	0.0000	0.0341
		0.670	0.0000	0.0760
		0.535	0.0892	0.1115
		0.484	0.2540	0.1270
		0.391	0.2654	0.1327

de carbono cuando se tienen potencias mayores o iguales a 1.65 kW.

3. El aumento de la rata de aireación no tiene una incidencia importante en la variación de las emisiones de CH₄. El incremento de la presión de suministro tiende a disminuir las emisiones de este gas.

Dado que las emisiones de CH₄ tienen implicaciones en la eficiencia energética y la contaminación ambiental al ser este gas una molécula termoactiva que incide en el efecto invernadero, conviene desarrollar investigaciones para estudiar los mecanismos físico – químicos incidentes en las emisiones de CH₄ en quemadores atmosféricos.

4. En quemadores atmosféricos de mezclador con tramo convergente-divergente, para potencias mayores o iguales a 2.4 kW y ratas de aireación

primaria menores de 0.5, se tienen emisiones de CO mayores o iguales al límite crítico. Por tanto en sitios localizados en alturas mayores de 1500 m y trabajando con potencias mayores de 2.4 kW, el ajuste de la rata de aireación debe ser muy cuidadoso para evitar tener valores menores de 0.5, lo cual puede comprometer la seguridad de los usuarios y disminuir la eficiencia del sistema.

NOMENCLATURA

- d*: Gravedad específica del gas.
- dc*: Diámetro del cuello en el mezclador
- di*: Diámetro del inyector, mm.
- Lc*: Longitud del tramo convergente del mezclador.
- Ld*: Longitud del tramo divergente del mezclador.
- Np*: Rata de aireación primaria, adimensional
- P*: Potencia térmica del quemador, kW.

- PC*: Poder calorífico por unidad de volumen del gas, kW.h/m³(n)
- Ps*: Presión de suministro, (mbar)
- Qap*: Caudal de aire primario, m³(n)/h.
- Qg*: Caudal normal de gas, m³(n)/h.
- R*: Relación aire-gas.
- Va*: Volumen de aire estequiométrico: m³(n) aire/ m³(n) gas.
- %CO₂corr*: Volumen de CO corregido por dilución.
- %CO₂leído*: Volumen de CO₂ leído en el analizador de gases.
- %CO₂leído*: Volumen de CO₂ leído en el analizador de gases.
- %CO₂máx*: Volumen de CO₂ máximo producido en la combustión estequiométrica del gas.
- %CH₄leído*: Volumen de CH₄ leído en el analizador de gases.
- %CH₄corr*: Volumen de CH₄ corregido por dilución.

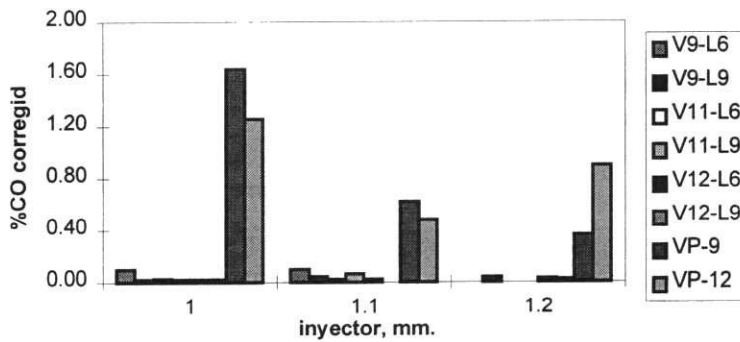


Figura 2. %CO corregido para 3 inyectores y 8 mezcladores. Cabeza 1, ps = 20 mbar.

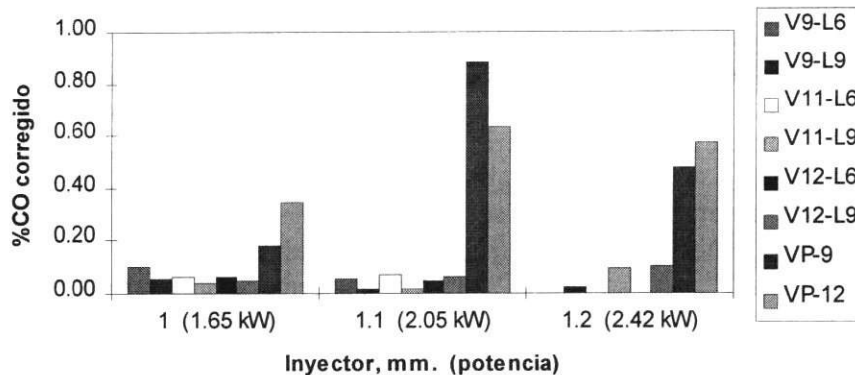


Figura 3. %CO corregido para 3 inyectores y 8 mezcladores. Cabeza 3, ps = 20 mbar.

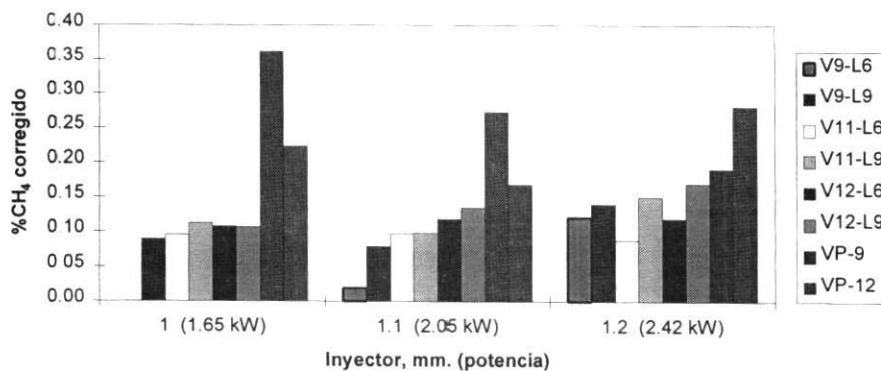


Figura 4. %CH₄ corregido para 3 inyectores y 8 mezcladores. Cabeza 1, ps = 20 mbar.

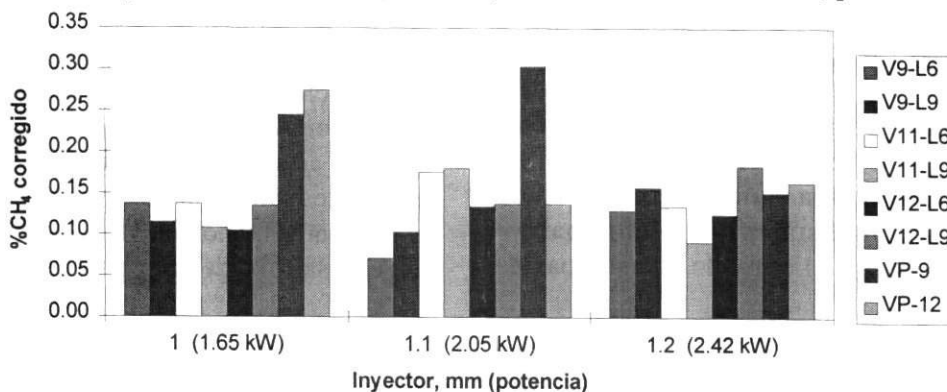


Figura 5. %CH₄ corregido para 3 inyectores y 8 mezcladores. Cabeza 3, ps = 20 mbar.

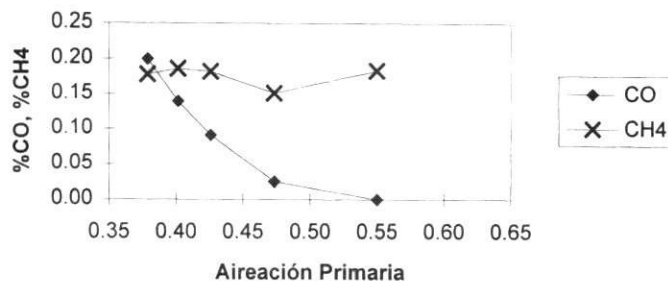


Figura 6. Variación de %CO y %CH₄ con la aireación primaria. Inyector de 1.0 mm, Ps: 40 mbar. Potencia (2.37 kW)

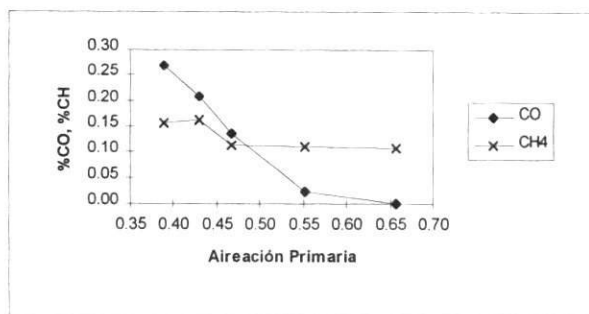


Figura 7. Variación de %CO y %CH₄ con la aireación primaria. Inyector de 1.0 mm, Ps: 60 mbar. Potencia (2.66 kW)

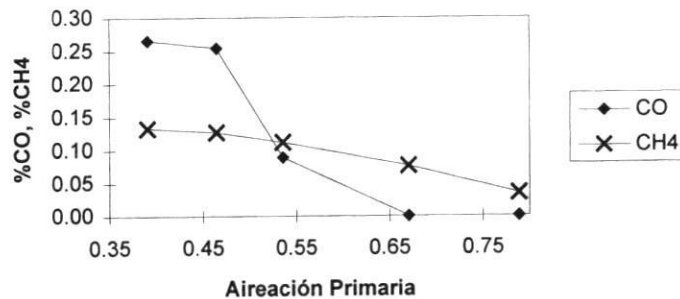


Figura 8. Variación de %CO y %CH₄ con la aireación primaria. Inyector de 1.0 mm, Ps: 80 mbar. Potencia (3.00 kW)

AGRADECIMIENTOS

Al Comité para el Desarrollo de la Investigación, CODI, adscrito a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia, que con fondos provenientes de la Estampilla Municipal y Departamental financió el proyecto “Incidencia de

los Parámetros de Flujo y Geométricos sobre la Rata de Aireación Primaria y Emisiones de CO en un Quemador Atmosférico”, del cual hace parte el presente artículo. Igualmente agradecimientos al estudiante Juan Carlos Ospina, Miembro del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas, quien contribuyó con el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

1. AMELL, A., BARRAZA L. y GOMEZ E. Curso Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas, Universidad de Antioquia, Medellín, octubre 3- 7, 1994.
2. JONES, H.R.. The Application of Combustion Principles to Domestic Gas Burner Design. British Gas plc, 1989.
3. BARTOK, W. y SAROFIM, A. Fossil Fuel Combustion. A Source Book, Capítulo 4, Chemistry of Gaseous Pollutant Formation and Destruction. John Wiley and Sons, Inc. 1991. Pág 866.
4. HARRIS, J.A. y PRIGG, J.A. “Domestic Aerated Burners for Methane”. I.G.E. Journal, Marzo 1965. Pág. 203-227.
5. A.G.A. “Fundamentals of Designed of Atmospheric Gas Burner Ports”. AGA Research Bulletin No 13, 1942.
6. GOLLAHALLI, S. R. y RAO, A.V. “Effects of Inlet Diameter and Fillet Radius of Venturi on Combustion Characteristics of Inshot Burners”. En: *ASME Vol. HTD 296: Fire, Combustion and Hazardous Waste Processing*. 1994. Pág. 127-136.
7. RAO, A.V. y GOLLAHALLI, S.R. “Effects of Venturi Length on Combustion Characteristics of Inshot Burners”. En: *IEEE*, 1996. Pág. 2203-2208.
8. GRUPO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL GAS. Proyecto de Investigación “Incidencia de la Altitud y la Higrometría sobre los Quemadores Atmosféricos de Premezcla”, Universidad de Antioquia, 1994.
9. MOSCHANDREAS, P.J. “Emission Rates from Range-Top Burners - Assesment of Measurement Methods”. En: *Atmospheric Environment*, Vol. 21, No. 2, 1987. Pág. 285-289.
10. AENOR. Aparatos que Utilizan Gas como Combustible. Recopilación de normas UNE. Ingeniería Mecánica, Tomo 3. Madrid, España, 1990.