

ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE METANO Y UNA MEZCLA EQUIMOLAR METANO-SYNGAS EN UN QUEMADOR DE COMBUSTIÓN ESTABILIZADA EN LA SUPERFICIE: EFICIENCIA Y EMISIONES CONTAMINANTES

Carlos Arrieta^{1,*}, Andrés Amell², Layrissir Iral³, Ángel Valencia⁴ y Arley Cardona⁵

Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente un quemador de combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso inerte utilizando gas natural y la adición de syngas al gas natural en proporciones equimolares. Más específicamente, se presenta el efecto de la composición del combustible, la tasa de aireación y la potencia térmica en la eficiencia térmica y las emisiones contaminantes. En este estudio se evaluó un syngas con un alto contenido de hidrógeno, similar a los obtenidos por gasificación de carbón usando la tecnología Sasol/Lurgi y por gasificación de biomasa. Para determinar el efecto de la tasa de aireación (λ), el comportamiento del quemador se analizó a $\lambda = 1.4$ y $\lambda = 1.1$. Por otro lado, las potencias térmicas evaluadas corresponden a tres valores (1.0, 1.8 y 2.5 kW) que se encuentran en aplicaciones domésticas.

Abstract

The primary objective of this work is to study the combustion of an equimolar mixture of methane and syngas (CH₄-SG) in a ceramic surface-stabilized combustion burner. We examine the effects of the fuel composition, the aeration rate and the thermal input on thermal efficiency and pollutant emissions. In this study, we evaluate a syngas with a high hydrogen content that is similar to those obtained by coal gasification using Sasol/Lurgi gasification technology or biomass gasification. To determine the effect of the aeration rate (λ), the burner performance is analyzed at $\lambda = 1.4$ and $\lambda = 1.1$. The thermal inputs evaluated in this study correspond to three values (1.0, 1.8, and 2.5 kW) found in household appliances.

^{1,*}Máster en Ingeniería, Ingeniero Mecánico, Investigador en el Grupo de Ciencias y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia. Autor para correspondencia ✉: ernesto.arrieta@udea.edu.co

²Máster en Economía de la Energía y los Recursos Naturales, Ingeniero Mecánico, Docente Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Antioquia, Investigador y Coordinador Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia.

³Máster en Ingeniería, Ingeniero Mecánico, Investigador en el Grupo de Ciencias y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia.

⁴Estudiante de Ingeniería mecánica – Universidad de Antioquia.

⁵Ingeniero Mecánico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Énfasis Energética, Investigador en Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia.

Recibido: 07-10-2014, Aprobado tras revisión: 22-11-2014.

Forma sugerida de citación: Arrieta, C.; Amell, A.; Iral, L.; Valencia, A.; Cardona, A. (2014). “Análisis de la combustión de metano y una mezcla equimolar metano-syngas en un quemador de combustión estabilizada en la superficie: eficiencia y emisiones contaminantes”. INGENIUS. N.º 12, (Julio-Diciembre). pp. 46-54. ISSN: 1390-650X.

Los resultados obtenidos indican que los quemadores de combustión estabilizada en la superficie tienen una gran potencia para permitir la sustitución de CH₄ por syngas en proporciones equimolares con eficiencias térmicas que generalmente son mayores que las que se obtienen en un quemador convencional. Sin embargo, se encontró que es necesario que el quemador permita una amplia modulación de la tasa de aireación para una operación óptima. También se halló que las emisiones contaminantes y la eficiencia térmica en un quemador de combustión en la superficie son muy sensibles ante variaciones de la potencia térmica y emisiones contaminantes.

Palabras clave: Combustión estabilizada en la superficie, metano, Syngas de alto contenido de hidrógeno.

The results for this experimental burner design indicate that the surface-stabilized combustion burner has a large capacity to allow replacement of CH₄ to syngas in equimolar proportions with thermal efficiency that are generally higher than those obtained in a conventional burner. However, it was found that it is necessary to have a large modulation of the aeration rate for an optimal performance. We also found that pollutant emissions and thermal efficiency in surface-stabilized combustion burner are very sensitive to changes in the thermal input and emissions.

Keywords: Surface-stabilized combustion burner, methane, High hydrogen content syngas.

1. Introducción

En países o regiones con reservas de carbón, gas natural y biomasa, están dadas las condiciones para el desarrollo de sistemas energéticos sostenibles y de gran confiabilidad en el suministro de la energía a la economía y a la sociedad [1], [2], [3], [4]. Más específicamente, se puede disponer de combustibles gaseosos como gases de síntesis, gas natural y sus mezclas con grandes ventajas comparativas con respecto a los combustibles líquidos y sólidos [1], [5], [6], [7]. Sin embargo, estas mezclas en el régimen de combustión convencional presentan dificultades relacionadas con estabilidad de llama, eficiencia de combustión y flexibilidad para la operación óptima ante variaciones de la composición química [8].

Por lo anterior, hoy en día existe una gran necesidad de quemadores de alta eficiencia, bajas emisiones contaminantes y flexibilidad para usar combustibles gaseosos de composición química diferente [7]. Una de las alternativas más prometedoras que se ha discutido a nivel internacional son los quemadores que emplean matrices porosas inertes para la realización del proceso de combustión [9], [10].

Anteriormente, una de las limitantes para la construcción de este tipo de quemadores había sido la degradación de los materiales al estar expuestos a altas temperaturas, pero actualmente con el desarrollo de materiales cerámicos resistentes y de bajo costo, los quemadores de superficie radiante pueden considerarse como una opción asequible y prometedora aún para sistemas de baja potencia en aplicaciones de uso residencial (1-8 kW), como lo muestran estudios recientes [10], [11].

Hace un par de años Yu et al. [12] estudiaron el comportamiento de un quemador de combustión estabilizada en la superficie de 5.8 kW en un calentador de agua de paso usando gas natural como combustible. La superficie del quemador consistía de una placa de acero (AISI 304) perforada, con una porosidad de 83%. Los resultados arrojaron que para obtener bajas emisiones contaminantes y altas eficiencias (79.7%), el quemador debía operar con una tasa de aireación ligeramente mayor a 1.3.

En el presente año, estos mismos autores [13] evaluaron un dispositivo similar pero variando el material de la superficie del quemador. Las superficies estudiadas fueron una placa de acero perforada (31% de porosidad) y una placa cerámica de óxido de aluminio (49.5% de porosidad). Se encontró que al usar superficies cerámicas la eficiencia térmica se aumenta hasta valores cercanos a 85%, mientras que las emisiones contaminantes no cambian significativamente.

Muy recientemente Keramiotis et al. [14] también obtuvieron bajas emisiones contaminantes en un quemador cerámico de alúmina usando como combustible

gas natural y GLP. Se evaluaron emisiones de CO y NOx para dos niveles de potencia (4 kW y 8 kW) y tres valores de tasa de aireación (1.2, 1.4 y 1.6). Se observó que para todos los casos las emisiones contaminantes disminuyen considerablemente al trabajar con tasas de aireación mayores a 1.2, resultado que coincide con el trabajo de Yu et al. [12]. Para ambos combustibles se registraron valores de 10 ppm y 5 ppm de CO y NOx respectivamente. Adicionalmente, se reportó que desde el punto de vista de emisiones contaminantes y estabilidad de llama los quemadores cerámicos permiten la intercambiabilidad entre gas natural y GLP.

La idea de implementar quemadores de combustión estabilizada en la superficie para aplicaciones residenciales no es nueva [15], sin embargo, hasta el momento de la redacción de este documento no existen evidencias científicas que permitan concluir con respecto a la viabilidad de su uso. Esto debido a que no se han realizado estudios para evaluar experimentalmente el desempeño de esta técnica de combustión a las condiciones de operación que exigen las normas técnicas. Es por eso por lo que con el presente trabajo se pretende obtener las primeras evidencias que permitan evaluar la capacidad de los quemadores de combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso inerte para operar con combustibles de composición química diferente.

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 se muestra el quemador que se diseñó y construyó para las pruebas experimentales. El quemador experimental consta de: 1. La superficie estabilizadora, 2. Cabeza del quemador, 3. Tornillos para fijar la cabeza del quemador, 4. Cavidad para material aislante, 5. Ranuras para inserción de termocuplas, 6. Mezclador, 7. Cubierta, 8. Parrilla para ubicar la carga y 9. Soportes roscados para variar la distancia de la carga a la superficie del quemador. La superficie estabilizadora que se utilizó fue una estructura de alúmina tipo *honeycomb* de 64 mm de diámetro exterior, 25 mm de espesor, 34.8% de porosidad y 400 poros por pulgada cuadrada.

El combustible y el aire entran separados a la cámara de mezclado. El combustible fue simulado en línea utilizando gases certificados de alta pureza (99% pureza) y rotámetros especialmente calibrados para cada componente. En la Tabla 1, se presentan las composiciones volumétricas y las propiedades de combustión de estos gases. Estas incluyen el poder calorífico inferior (PCI), el índice de Wobbe (WI) y el volumen de aire estequiométrico ($V_{a,sto}$).

La adición de syngas (SG) a CH_4 reduce el poder calorífico inferior en 36.48% y el volumen de aire para tener una combustión estequiométrica en 40%. El



Figura 1. Quemador experimental para la evaluación de las superficies porosas seleccionadas. a. Configuración sin cubierta. b. Configuración para la medición de eficiencia y emisiones contaminantes.

índice de Wobbe es el parámetro de intercambiabilidad de gases más utilizado en la industria del gas porque indica la cantidad relativa de energía que fluye a través de una sección. Hoy en día las variaciones aceptables en WI varían de país en país, pero generalmente en quemadores convencionales aceptan variaciones entre $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ [16], en nuestro caso se observa una disminución en WI de 36.52% al adicionar SG a CH_4 .

El aire se suplió usando un compresor y se acondicionó usando dos trampas de condensados en la línea. Cada tasa de aireación y potencia térmica se aseguraron usando rotámetros de manera similar a como se describe en [17], [18]. Los errores en la composición final se estiman que fueron menores a 2%.

Con respecto a la tasa de aireación, en el presente estudio se ha centrado la atención en $\lambda = 1.4$ y $\lambda = 1.1$. La importancia de la primera radica en que varios estudios reportan condiciones de operación óptimas a esta tasa de aireación [12], [13], [14], mientras que la relevancia de la segunda radica en la cercanía a las condiciones estequiométricas, que en el caso de los hidrocarburos es la región donde se presenta la mayor velocidad de combustión y la mayor temperatura de llama [19].

Tabla 1. Composición (%vol. seco) y propiedades de combustión de los combustibles estudiados.

Componentes	SG	CH_4	CH_4/SG
H_2	55	–	27.5
CO	30	–	15
CO_2	15	–	7.5
CH_4	–	100	50
PCI ($\text{kWh}/\text{m}^3\text{st}$)	25.550	9.425	5.987
WI ($\text{kWh}/\text{m}^3\text{st}$)	3.810	14.089	8.944
Va,sto ($\text{m}^3\text{aire}/\text{m}^3\text{fuel}$)	2.023	9.520	5.712

Con respecto a la potencia térmica, se estudiaron tres valores de potencia térmica que corresponde al rango utilizado en aplicaciones domésticas, estos son 1.0 kW, 1.8 kW y 2.5 kW. En la Figura 2 muestra un registro visual de las llamas obtenidas.

La metodología implementada para la medición experimental de la eficiencia térmica y las emisiones contaminantes corresponde a la *Norma Técnica Colombiana para la Cocción de Alimentos NTC 2832-2*. La norma define los requisitos y los métodos de ensayo, relativos a la utilización racional de la energía de artefactos domésticos de cocción que utilizan combustibles gaseosos.

Los gases de combustión se toman con una sonda conectada a dos analizadores de gases. Se utilizó un analizador SICK MAIHAK s710 para medir las concentraciones de CO_2 , CO y O_2 en los productos de combustión. Este dispositivo utiliza el método de infrarrojo no dispersivo para el CO y CO_2 con un rango de medición de 0-40 000 ppm y 0-40 %vol. respectivamente.

En el caso del O_2 utiliza el método de paramagnetismo con un rango de medición de 0-100 %vol. Las concentraciones de NO y NO_2 se registraron con un analizador THERMO SCIENTIFIC 42i-HL que utiliza el principio de quimioluminiscencia con rangos variables de medición que pueden ir desde 0-10 hasta 0-5000 ppm. Ambos dispositivos cuentan con una unidad de acondicionamiento y las mediciones se reportan en base seca.

Las mediciones de CO reportadas en el presente trabajo se corrigieron siguiendo los lineamientos de la norma NTC 2832-2 de la siguiente manera:



Figura 2. Registro visual de las llamas obtenidas en el quemador de combustión estabilizada en la superficie. a. registro lateral. b. registro frontal

$$\%CO = CO_{2\text{-estequiométrico}} \left(\frac{CO}{CO_2} \right)_{\text{medido}} \quad (1)$$

Adicional al quemador de combustión en la superficie también se evaluó un quemador convencional de una estufa doméstica distribuida por uno de los fabricantes de equipos térmicos más grande de Latinoamérica. Esto con el fin de comparar los resultados entre las dos tecnologías. Sin embargo, la comparación entre el quemador convencional y el de combustión en la superficie se realiza con el primero operando con gas natural y a 1.8 kW, ya que este valor corresponde a su potencia nominal y bajo el cual se obtienen las mejores prestaciones.

3. Resultados y discusión

3.1. Quemador convencional vs. quemador de combustión estabilizada en la superficie

En la Figura 3, se presenta la eficiencia térmica del quemador convencional y de las diferentes configuraciones del quemador de combustión estabilizada en la superficie usando gas natural como combustible. Con ningún combustible fue posible obtener llamas estables para $\lambda = 1.4$ operando a 1.8 kW y 2.5 kW, esto debido a que se presentaba el fenómeno de *blow-off*.

En general, se obtuvieron mayores eficiencias térmicas con el quemador de combustión estabilizada en la superficie. Con respecto al quemador convencional, el aumento en la eficiencia es del orden de 1.1 a 12.5 puntos de eficiencia, resultado que se puede explicar por la distribución de los productos de combustión aguas arriba de la zona de reacción. En un quemador convencional la descarga de la mezcla reactiva se realiza por puertos ubicados en el borde de la cabeza del quemador, mientras que en un quemador de combustión en la superficie se descargan a lo largo del eje axial y en el centro de la carga por lo cual están en más contacto con la carga a medida que abandonan la zona de reacción.

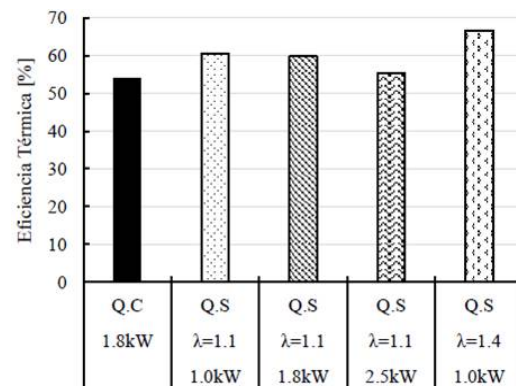


Figura 3. Eficiencia térmica quemador convencional vs. quemador de combustión estabilizada en la superficie. Q.C: quemador convencional. Q.S: quemador de combustión estabilizada en la superficie

En las Figuras 4a y 4b se presentan las emisiones contaminantes del quemador convencional y de las diferentes configuraciones del quemador de combustión estabilizada en la superficie usando gas natural como combustible. Con respecto a las emisiones de CO (Figura 4a), en la mayoría de los casos, con el quemador de combustión estabilizada en la superficie se observa una variación que equivale a una reducción del 75.5 a 90.83% de la emisión obtenida con el quemador convencional. Este resultado es característico de tecnologías que operan en condiciones de premezcla pobre y se explica porque la alta disponibilidad de aire permite que haya una oxidación completa de las especies combustibles [11]. Para $\lambda = 1.1$ a 1.0 kW, el aumento de la emisión de CO se explica porque la baja velocidad de descarga, consecuencia de la baja potencia, hace que la llama se desplace aguas arriba hacia la superficie del quemador y experimente una pérdida de calor lo cual disminuye la temperatura de llama. En muchas aplicaciones prácticas se ha demostrado que la oxidación del CO a CO₂ ocurre en las últimas etapas del proceso de combustión a través de varias rutas químicas que dependen altamente de la temperatura. Por ejemplo, tal es el caso de la ruta química conocida como ruta “húmeda” ($CO + OH \rightarrow CO_2 + H$), en donde la oxidación del CO depende en gran medida

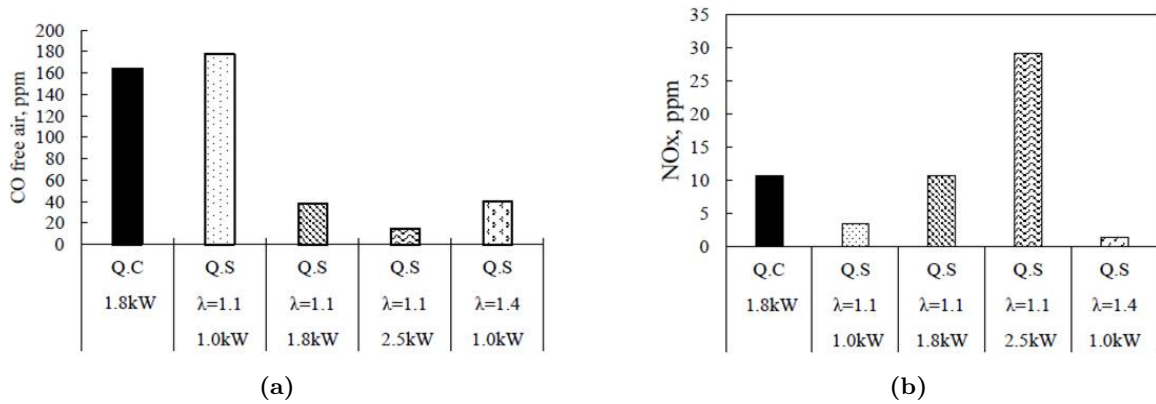


Figura 4. Emisiones contaminantes en el quemador convencional y en las diferentes configuraciones del quemador de combustión estabilizada en la superficie usando gas natural como combustible. a. emisiones de CO. b. emisiones de NOx. Q.C: quemador convencional. Q.S: quemador de combustión estabilizada en la superficie.

de la concentración de radicales OH producidos principalmente por la reacción de ramificación $H + O_2 \rightarrow OH + O$, la cual se detiene cuando la temperatura es menor a 1100 K.

Con respecto a las emisiones de NOx, las cuales se muestran en la Figura 4b, en general, también se observan reducciones considerables cuando se compara las emisiones del quemador convencional con respecto a las emisiones del quemador de combustión estabilizada en la superficie. Aunque la formación de NOx, especialmente de NO, es fuertemente dependiente de la temperatura y tiende a presentar un incremento en condiciones ligeramente pobres donde la temperatura de llama es alta y hay O_2 disponible [11], la disminución de las emisiones de NOx a $\lambda = 1.1/1.0$ kW se explica por la hipótesis del “enfriamiento de la llama” como consecuencia de la transferencia de calor a la superficie del quemador. Al disminuir la temperatura de llama también se disminuyen las constantes de reacción de las reacciones productoras de NOx [20]. Por otro lado, el aumento que va desde 10.65 ppm en el quemador convencional hasta 29.1 ppm en el quemador de combustión en la superficie para $\lambda = 1.1/2$ se explica porque la alta velocidad de descarga, consecuencia de la mayor potencia, hace que no haya una buena interacción entre el frente de llama y la superficie del quemador, disminuyendo las pérdidas de calor de la llama al medio poroso.

3.2. Quemador de combustión estabilizada en la superficie

En las Figuras 5, 6a y se presentan la eficiencia térmica y las emisiones contaminantes para las diferentes configuraciones de combustibles, tasas de aireación (λ) y potencias térmicas estudiadas en el quemador de combustión estabilizada en la superficie. Las configuraciones $\lambda = 1.1/1.0$ kW y $\lambda = 1.1/1.8$ kW usando CH₄/SG no se incluyen por la ocurrencia de apari-

ción del fenómeno de *flashback*. La aparición de este fenómeno a dichas configuraciones de operación se explica porque la alta velocidad de combustión que caracterizan a los gases combustible tipo syngas, las cuales favorecen el desequilibrio entre la velocidad de los gases sin quemar y la velocidad de combustión.

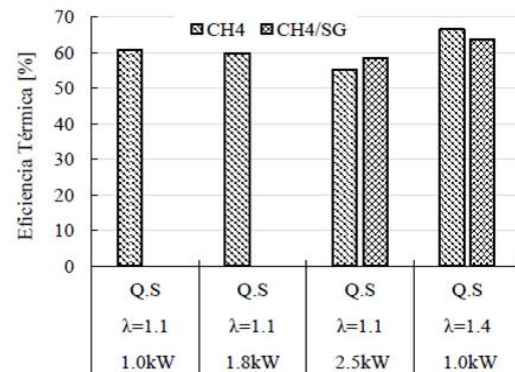


Figura 5. Eficiencia térmica quemador de combustión estabilizada en la superficie CH₄ vs CH₄/SG. Q.S: quemador de combustión estabilizada en la superficie.

Con respecto a la adición de syngas al CH₄ se observan ligeras variaciones en la eficiencia térmica, las cuales están en el rango de 1.1 a 3.1 puntos de eficiencia. Por otro lado, la hipótesis previa a la realización de las pruebas de eficiencia y emisiones contaminantes consideraba un aumento en la eficiencia térmica al disminuir la tasa de aireación ($\lambda = 1.1/1.0$ y $\lambda = 1.4/1.0$ kW para CH₄) la cual es una estrategia generalmente utilizada para incrementar la eficiencia en hornos y calderas. Sin embargo, los resultados no validaron este razonamiento. La disminución de la tasa de aireación desde $\lambda = 1.4$ a $\lambda = 1.1$ al comparar solo CH₄ representó una disminución en la eficiencia térmica de 6 puntos, es decir, una reducción del 9%. Posiblemente la razón de este comportamiento se deba

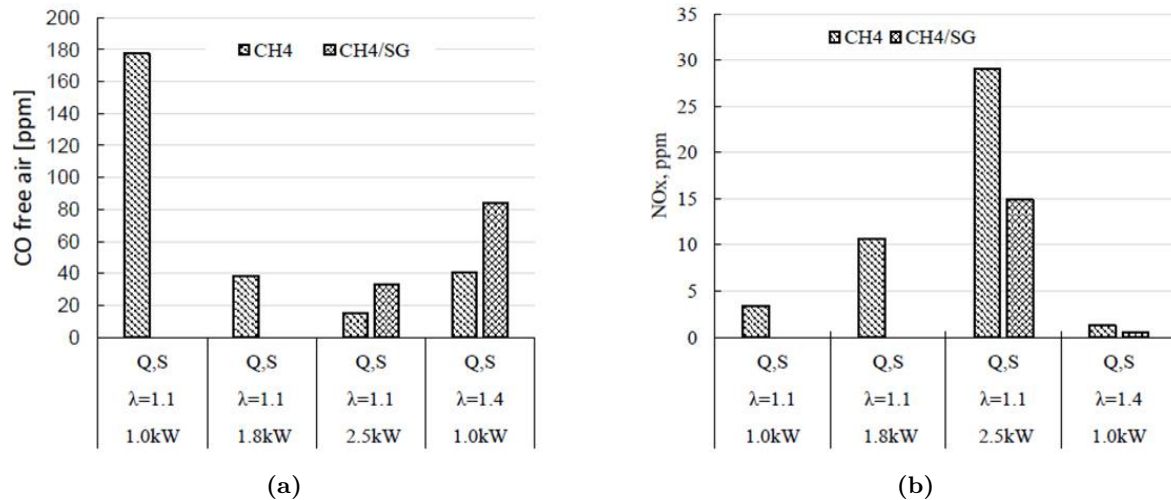


Figura 6. Emisiones en el quemador de combustión estabilizada en la superficie CH_4 vs CH_4/SG . a. emisiones de CO. b. emisiones de NOx. Q.S: quemador de combustión estabilizada en la superficie.

al aumento de las pérdidas por conducción, por radiación y por combustión incompleta. El aumento de la primera y segunda se produce por el incremento en la temperatura del medio poroso como consecuencia del incremento en la temperatura de llama adiabática al disminuir la tasa de aireación, siendo los receptores la estructura del quemador y los alrededores respectivamente. El aumento de la tercera se discutió en la sección anterior (“enfriamiento de la llama”) y se evidencia en la Figura 6a, donde se observa un aumento de 641% en la emisión de CO.

En la Figura 5, también se observa que al aumentar la potencia, en su orden $\lambda = 1.1/1.0$ kW, $\lambda = 1.1/1.8$ kW y $\lambda = 1.1/2.5$ kW con CH_4 , se presenta ligeras variaciones en la eficiencia térmica del equipo, las cuales son de 0.8 a 2.4 puntos de eficiencia.

Con respecto a las emisiones contaminantes (Figura 6), con la adición de syngas al CH_4 se registra un aumento de las emisiones de CO del orden de 100% y una disminución de las emisiones de NOx del orden de 50%, con respecto a las obtenidas con CH_4 . Sin embargo, en ambos casos las emisiones son muy bajas cuando se comparan con el quemador convencional. Este comportamiento se explica por la pérdida de calor desde el frente de llama, el cual es mayor para CH_4/SG debido a la mayor velocidad de combustión de este último, lo cual hace que la llama esté más cerca de la superficie del quemador.

Las emisiones contaminantes, exhibieron un comportamiento más sensible ante variaciones de la potencia. La disminución de hasta 91.53% de la emisión de CO y el aumento de hasta 758.4% de la emisión de NOx para CH_4 se explica porque al aumentar la potencia térmica se aumenta la tasa de liberación de calor favoreciendo el consumo de CO y la producción de NOx.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se logró estudiar el desempeño de un quemador de combustión estabilizada en la superficie de un medio poroso inerte en un rango de potencias térmicas correspondientes al sector residencial. La idea de implementar quemadores de combustión estabilizada en la superficie para aplicaciones de cocción no es nueva; sin embargo, hasta el momento de la redacción de este documento no existían evidencias científicas que permitan concluir con respecto a la viabilidad de su uso. Esto debido a que no se habían realizado estudios para evaluar experimentalmente el desempeño de esta técnica de combustión a las condiciones de operación que exigen las normas técnicas. En este trabajo se evaluó el comportamiento de la eficiencia térmica del equipo y emisiones contaminantes (CO y NOx). En el estudio realizado también se incluyó la comparación del quemador de combustión estabilizada en la superficie con un quemador convencional comercializado en Colombia. Los resultados obtenidos permiten concluir:

1. La tasa de aireación tiene una gran influencia en el comportamiento del quemador de combustión estabilizada en la superficie. Contrario a la técnica de disminuir la tasa de aireación a valores entre 1.1 a 1.2, generalmente empleada en hornos y calderas para aumentar la eficiencia térmica, se observó que, en el caso de la situación aquí estudiada, la disminución de la tasa de aireación disminuye la eficiencia térmica hasta en 9%. Los resultados indican que desde el punto de vista de estabilidad de llama, para garantizar una buena operación es necesario que el equipo permita la modulación de la tasa de aireación. Similar a los resultados que se encuentran en la literatura, la mayor eficiencia térmica y

menores emisiones contaminantes se obtuvieron a $\lambda = 1.4$ para ambos combustibles, sin embargo, se observó que su implementación está limitada por la estabilidad de llama al aumentar la potencia, por esta razón a $\lambda = 1.4$ solo se obtuvieron llamas estables a 1.0 kW.

2. La potencia térmica influye considerablemente en los niveles de emisiones contaminantes del quemador de combustión estabilizada en la superficie. Se observó que los incrementos en la potencia térmica implican una disminución en la emisión de CO de hasta 91.53% y un aumento en la emisión de NOx de hasta 83.93%, lo cual se explica por el incremento de la temperatura de la zona de reacción como consecuencia de la disminución de la pérdida de calor desde la llama hacia la superficie del quemador. Con respecto a la eficiencia térmica, se encontró que es ligeramente afectada por cambios de potencia.
3. Con respecto a la posibilidad de adicionar syngas al gas natural en proporciones equimolares implementando un quemador de combustión estabilizada en la superficie en aplicaciones domésticas se observó que, desde el punto de vista de estabilidad de llama, la adición de syngas conduce a condiciones indeseadas de operación, esto a $\lambda = 1.1$ y bajas potencias. Las condiciones indeseadas se explicaron por los efectos fú-dinámicos que se generan por la interacción con la carga, lo cual conduce a un desequilibrio entre la velocidad de deflagración laminar y la velocidad de descarga de la mezcla sin quemar. Sin embargo, los resultados obtenidos para las otras condiciones de operación, entre los que se incluyen poca variación de la eficiencia térmica (1.1 a 2.9 puntos) y disminución considerable de la emisión de NOx (50%) no permiten concluir con certeza con respecto a este tema. Por tal motivo es necesario que en futuras investigaciones se considere un número mayor de tasas de aireación a estudiar de las que actualmente son utilizadas en la literatura, incluyendo el presente trabajo.

Referencias

- [1] D. Roddy, "A syngas network for reducing industrial carbon footprint and energy use," *Applied Thermal Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 299 – 304, 2013, includes Special Issue: PRO-TEM Special Issue.
- [2] L. D. Thi, Y. Zhang, and Z. Huang, "Shock tube study on ignition delay of multi-component syngas mixtures - effect of equivalence ratio," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 11, pp. 6034 – 6043, 2014.
- [3] A. Colorado, B. Herrera, and A. Amell, "Performance of a flameless combustion furnace using biogas and natural gas," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 7, pp. 2443 – 2449, 2010.
- [4] Y. Najjar, "Hydrogen safety: The road toward green technology," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 25, pp. 10 716 – 10 728, 2013.
- [5] K. H. Casleton, R. W. Breault, and G. A. Richards, "System issues and tradeoffs associated with syngas production and combustion," *Combustion Science and Technology*, vol. 180, no. 6, pp. 1013–1052, 2008.
- [6] Y. He, Z. Wang, L. Yang, R. Whiddon, H. Zhongs, J. Zhou, and K. Cen, "Investigation of laminar flame speeds of typical syngas using laser based bunsen method and kinetic simulation," *Fuel*, vol. 95, no. 0, pp. 206 – 213, 2012.
- [7] M. Chaos and F. L. Dryer, "Syngas combustion kinetics and applications," *Combustion Science and Technology*, vol. 180, no. 6, pp. 1053–1096, 2008.
- [8] D. Giles, S. Som, and S. Aggarwal, "{NOx} emission characteristics of counterflow syngas diffusion flames with airstream dilution," *Fuel*, vol. 85, no. 12–13, pp. 1729 – 1742, 2006.
- [9] R. W. Francisco, F. Rua, M. Costa, R. C. Catapan, and A. Oliveira, "On the combustion of hydrogen-rich gaseous fuels with low calorific value in a porous burner," *Energy Fuels*, vol. 22, no. 2, pp. 880–887, 2010.
- [10] M. Mujeebu, M. Abdullah, M. Abu-Bakar, A. Mohamad, R. Muhad, and M. Abdullah, "Combustion in porous media and its applications - a comprehensive survey," *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 8, pp. 2287 – 2312, 2009.
- [11] D. Dunn-Rankin, R. K. Cheng, and H. Levinsky, "Lean premixed burners," *Lean Combust*, pp. 161–V, 2008.
- [12] B. Yu, S.-M. Kum, C.-E. Lee, and S. Lee, "An experimental study of heat transfer and pollutant emission characteristics at varying distances between the burner and the heat exchanger in a compact combustion system," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 350 – 357, 2012.
- [13] —, "Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners," *Energy*, vol. 53, no. 0, pp. 343 – 350, 2013.
- [14] C. Keramiotis, B. Stelzner, D. Trimis, and M. Founti, "Porous burners for low emission combustion: An experimental investigation," *Energy*,

- vol. 45, no. 1, pp. 213 – 219, 2012, the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy, {ECOS} 2011.
- [15] M. Mujeebu, M. Abdullah, and A. Mohamad, “Development of energy efficient porous medium burners on surface and submerged combustion modes,” *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5132 – 5139, 2011, {PRES} 2010.
- [16] I. G. Union. (2011) Petroleum B. guidebook to gas interchangeability and gas quality.
- [17] H. Burbano, J. Pareja, and A. Amell, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of syngas mixtures at sub-atmospheric pressures,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3243 – 3252, 2011.
- [18] —, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3232 – 3242, 2011.
- [19] S. Turns, *An introduction to combustion: concepts and applications*, ser. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill, 2000.
- [20] P. Bouma, L. Somers, L. de Goey, and J. Nieuwenhuizen, “Methane-air combustion on ceramic foam surface burners,” *Technische Universiteit Eindhoven*, pp. 153–166, 1997.