

QUEMADORES RADIANTES DE MATRÍZ CERÁMICA PARA GAS⁴

John R. Agudelo Santamaría¹, Juan Carlos Ospina² y Jaime Hernández³

Resumen

Este artículo presenta la caracterización de un quemador de matriz cerámica radiante, que puede operar con gas natural o con gas licuado de petróleo (GLP). El quemador se desarrolló en el laboratorio de Combustión Atmosférica y Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia. Se presenta el potencial de la radiación térmica infrarroja en aplicaciones industriales, posteriormente se describe el proceso de diseño y construcción del prototipo y finalmente, se presentan la metodología experimental y los resultados más representativos obtenidos en su caracterización. La potencia emisiva con GLP fue en torno a 18% mayor que con gas natural en el prototipo construido, independientemente de la distancia de la fuente. El uso de aire forzado permitió igualmente duplicar la potencia emisiva respecto a un quemador radiante comercial y a un sistema radiante eléctrico, independientemente del gas empleado. El rendimiento térmico logrado con el prototipo fue mayor que con los demás sistemas radiantes usados, esta diferencia se acentuaba aún más a medida que la distancia de secado se aumentaba.

Palabras clave: Quemadores radiantes, infrarrojo, matriz cerámica, cerámica, gas natural, gas licuado de petróleo.

Abstract

This paper shows the characterisation of an infrared gas burner with ceramic matrix operating with natural gas or liquefied petroleum gas (LPG) as fuel. The burner was developed at the Atmospheric Combustion and Heat Engines laboratory, at the Universidad de Antioquia. The paper shows infrared thermal radiation advantages for applications in industry. Also the prototype design and construction processes are shown. It is also presented the test planning and relevant results. Prototype shows around 18% more emissive power when operating with LPG respect to natural gas, whatever distance. Emission power was duplicated with the prototype respect other tested radiant devices, due to the use of forced air. Prototype Thermal efficiency was better than other radiant devices used for comparison, the difference was bigger the most the distance from the font.

Key words: Radiant burners, infrared burners, ceramic matrix, ceramics, natural gas, liquefied petroleum gas

¹Ingeniero Mecánico, PhD en Termodinámica, e-mail: radian@udea.edu.co

²Ingeniero Mecánico.

³Ingeniero Mecánico

⁴Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Calle 67 no. 53-108. Universidad de Antioquia. Departamento de Ingeniería Mecánica. e-mail: grupogas@udea.edu.co

Introducción

Los equipos que utilizan la transferencia de calor por radiación, tienen la ventaja que al ser este un fenómeno de carácter electromagnético representado por ondas que pueden viajar en el vacío, sin requerir un medio material para su propagación, proporcionan un método de transferencia rápido, de enormes posibilidades para su aplicación en el ámbito industrial y residencial.

Actualmente entre el 35% - 45% de la energía suministrada en radiante, comparado con un artefacto radiante eléctrico que convierte cerca del 80% este rendimiento no es el principal factor que debe influir en la elección de un sistema u otro (Bullock, 1996). Se deben considerar aspectos como las aplicaciones específicas y los costos de la energía primaria, siendo este último punto de gran peso en nuestro medio, gracias a la introducción del gas natural como nuevo vector energético. El proceso de masificación del gas natural ha traído como consecuencia no sólo un ahorro representativo por parte de los consumidores de energía, sino el aumento del mercado de equipos que trabajen con gas. En el ámbito de gasodomésticos, Colombia cuenta con buenos fabricantes a nivel de artefactos para cocción de alimentos, pero en los campos comercial e industrial aún se tiene una estrecha dependencia de tecnologías extranjeras. Por ello, la familiarización con el fenómeno de transferencia de calor por radiación y la apropiación de la tecnología de quemadores radiantes a gas, son el punto de partida para el desarrollo de esos equipos, con criterios propios y acoplados a las necesidades colombianas, que puedan en un futuro servir a la industria nacional.

El gas natural juega un papel relevante en los equipos de nuevas tecnologías para transmisión de calor por radiación. La radiación infrarroja corresponde a aquellas longitudes de onda inmediatamente superiores a las correspondientes al espectro visible, entre 0,8 μm y 100 μm . La importancia de esta franja del espectro infrarrojo radica en la existencia de diversos materiales tales como el agua, algunos materiales orgánicos, varios tipos de óxidos y algunas sales; que presentan interacciones con esta radiación, debido a que la distancia media entre moléculas del material

Los quemadores atmosféricos de gas empleados comúnmente, transfieren la energía liberada en la combustión por conducción y convección. Aunque la radiación se encuentra presente allí, estos sistemas no están optimizados para calentar en el espectro electromagnético del infrarrojo, lugar donde se encuentra la mayor porción de energía térmica que puede ser transferida por radiación.

A este respecto, si bien es cierto que los quemadores radiantes convierten aproximadamente el 80% de la energía que coincide con las longitudes de onda del infrarrojo. La absorción de esta radiación genera una vibración en los átomos del material, la cual se transformará gradualmente en calor.

Principio de funcionamiento

Todos los quemadores de infrarrojo incluyen una matriz (placa), normalmente de material cerámico con mucha área específica (tipo esponja) y con suficiente porosidad que se puede lograr con múltiples perforaciones sobre la placa, con el fin de lograr que la mezcla aire-gas se quemara sobre su superficie y permitir así que gran parte del calor de la combustión sea aprovechado en calentarla, para que esta empiece a emitir radiación térmica en el espectro infrarrojo. El material cerámico debe tener gran capacidad de acumulación de calor y de emitirlo luego como energía radiante en el espectro infrarrojo.

En poco tiempo la placa cerámica alcanza temperaturas superficiales entre los 800°C y los 1200°C dependiendo del material, debido a que la inercia térmica de estos equipos es muy baja. Esto da lugar a longitudes de onda de máxima emisión (ley de Wien) entre 1,6 μm y 3 μm , propio de los paneles radiantes a gas (Sedigas, E-1 1999).

Existen también los emisores llamados de infrarrojo corto o cercano, que alcanzan temperaturas superficiales superiores a los 1500°C con longitudes de onda máximas inferiores a los 1,6 μm . Estos emisores suelen ser eléctricos (Sedigas, F-1 1999). Así, existen calentadores radiantes del espectro infrarrojo cercano (eléctricos) y del infrarrojo medio (a gas); su uso será función de los requerimientos específicos de cada aplicación. A continuación se mencionan algunas ventajas del uso de sistemas radiantes a gas para la industria.

Algunas ventajas de los sistemas radiantes infrarrojos a gas

Las principales ventajas de los quemadores radiantes a gas en comparación con otros sistemas convencionales de secado:

- Se consigue una transferencia de calor directa entre el equipo y el material a secar, logrando gran limpieza en el proceso ya que los gases de combustión no tienen que entrar en contacto con el material.
- Elevada modularidad y flexibilidad. Los quemadores radiantes se pueden instalar en rampas y se pueden activar todos o unos pocos cuando se desee.
- Elevada velocidad de secado con muy buenos resultados especialmente en procesos térmicos de secado sobre superficies.
- Poco requerimiento de potencia térmica mejorando así el retorno de la inversión.
- Baja inercia térmica, lo que permite alcanzar condiciones estacionarias de funcionamiento en cortos periodos de tiempo. Su funcionamiento en cargas parciales no afecta la vida útil de los quemadores.

Algunas de las aplicaciones más frecuentes son: cocción, secado, curado, deshidratación, precalentamientos y evaporaciones; de este modo las industrias que se podrían ver más beneficiadas por el uso de sistemas directos como los quemadores radiantes serían: textil, papel, agrícola, cerámica, comidas y calefacción de ambientes.

A continuación se describe el proceso de diseño y construcción de un quemador radiante a gas (gas natural o GLP) para aprovechar la emisión de ondas en el espectro de longitud de onda media en procesos de secado y calentamiento de espacios.

Diseño del prototipo

El diseño del quemador radiante a gas consta de dos partes: la cámara de premezcla que incluye el suministro aire-gas y la matriz cerámica. Siendo este último el elemento calefactor, su configuración

geométrica obedece a ciertos criterios de diseño que rigen su dimensión y forma. Para la aplicación específica de quemadores infrarrojos, se pueden encontrar dos tipos de sistemas de combustión: quemadores atmosféricos de aire inducido y quemadores de aire forzado.

Cálculo del quemador

Para el cálculo de este tipo de quemadores se ha seguido la metodología propuesta en la referencia (Amell *et al.*, 1996). Se partió de un valor de potencia de 2 kW, dado que esta es una potencia estándar en los equipos de calefacción de ambientes y cocción de alimentos. Con esa potencia se determina el diámetro del inyector, el diámetro del cuello del venturi, y finalmente todas las demás dimensiones del quemador.

Para calcular el diámetro del inyector (d_i), se empleó la ecuación de caudal descargado por un orificio, considerando el poder calorífico de los gases utilizados (Tablas 5 y 6).

La ecuación de potencia es:

$$P = C_d \times \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \times \frac{2\delta \cdot P}{1.293d_{\text{gas}}} \times \frac{P_o}{101325} \times \frac{273}{T_o} \times PC_{\text{gas}} \quad (1)$$

Donde:

- P : potencia térmica fijada (2 kW)
- C_d : coeficiente de descarga (0,90 -valor recomendado-)
- δP : presión de suministro (2000 Pa)
- d_i : diámetro de inyector (m)
- d_{gas} : densidad relativa del gas
- P_o : presión absoluta del gas en el inyector (2000 + 85200 Pa = 87200 Pa)
- T_o : temperatura absoluta del gas en el inyector (298 °K)
- PC_{gas} : poder calorífico del gas

Reemplazando valores para el gas natural en la ecuación 1 y despejando el diámetro del inyector, se obtiene un $d_i = 1,03 \text{ mm}$. Con este valor sustituido en la ecuación 2, se puede ahora calcular el diámetro del cuello de nuestro venturi:

$$D_c = \frac{n_p \times V_a}{\sqrt{d}} \times d_i \quad (2)$$

Donde:

- D_c : diámetro del cuello del venturi (mm)
 n_p : tasa de aireación primaria teórica (0,6)
 V_a : volumen estequiométrico de aire
 d : densidad relativa del gas

Reemplazando valores para el gas natural en la ecuación 2, se obtiene un $D_c = 7,92 \approx 8 \text{ mm}$. En la figura 1 se ilustran las principales dimensiones del mezclador del quemador atmosférico de premezcla y en la tabla 1 se reportan los valores de dichas dimensiones.

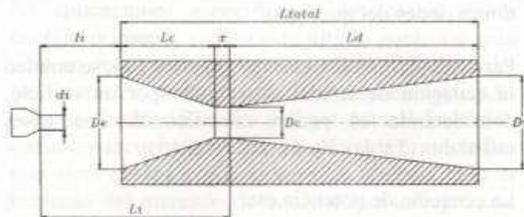


Figura 1 Dimensionamiento del quemador (Amell et al, 2000)

Tabla 1. Dimensiones del mezclador del quemador atmosférico de premezcla

Dimensión	Recomendado	Valor (mm)
D_i : diámetro inyector	-	1,03
D_c : diámetro cuello	-	8
l_i : distancia cuello-inyector	$l_i = 2,2 D_c + 15$	32,6
L_c : distancia libre arrastre aire	$L_c = l_i - L_c$	15
$D_e = D_c$: diámetro entrada aire libre	$D_e = 2,0 D_c$	16
L_c : longitud convergente	$L_c = 2,2 D_c$	17,6
L_d : longitud divergente	$L_d = 9 D_c$	72
x : zona transición	-	5
L_t : longitud total	$L_t = L_c + L_d$	95

Se emplearon dos tipos de gases: gas natural y gas licuado de petróleo (GLP). Los cálculos anteriores fueron para gas natural, al repetirlos para GLP se conservaron los datos del mezclador y se calculó nuevamente obteniéndose un diámetro de inyector de 0,9 mm.

Diseño de la cabeza del quemador

La complejidad en la fabricación de una cabeza o matriz cerámica perforada conlleva dos complicaciones: la primera en la geometría de las perforaciones que permiten el paso de la mezcla aire-gas, las cuales deberán ser del orden de 0,7 hasta 1,5 mm (Ahmady, 1994), de modo que se logre la combustión en la superficie de la placa. La segunda dificultad consiste en la selección adecuada del material de la placa, el cual en términos generales es una mezcla de sílice y óxidos de aluminio y magnesio entre otros; que requiere unas condiciones de prensado y secado precisas.

Se contaba con una placa cerámica importada que sirvió en principio como punto de comparación. Su composición química, determinada por Espectrofotometría de Absorción Atómica (llama) aparece en la Tabla 2. La placa cuenta con 2.875 perforaciones de 1 mm de diámetro cada una.

Tabla 2 Análisis elemental placa cerámica de referencia

Parámetro	Análisis Elemental	Oxidos (%)
Aluminio	0,925% Al	3,5 Al_2O_3
Magnesio	4,08% Mg	6,8 MgO
Calcio	28,05% Ca	40 CaO
Hierro	0,47% Fe	0,5 FeO
Silicio	62,6% Si	49 SiO_2

Los materiales más parecidos a esta composición eran la Cordierita y la Wollastonita. La gran dificultad que presentan este tipo de materiales es su proceso de conformación, normalmente requieren inyección o moldeo a elevadas presiones, por esta razón se procedió a utilizar un cemento refractario comercial bastante común en nuestro medio (Concrax 1300) del cual se tiene su composición en la Tabla 3. Este material permite fraguado en frío (Erecos)

Para lograr la estabilización de llama se optó por emplear ranuras longitudinales, en lugar de usar múltiples perforaciones, cuidando de conservar la potencia específica en $0,4 \text{ kW/cm}^2$ y que la distancia entre ejes medios de cada ranura fuera aproximadamente de 1,5 a 2,0 veces el espesor de la ranura (Cadavid y Ospina, 1998). Este diseño es nuevo, no se encontraron experiencias similares en la

literatura consultada, incluyendo el banco de patentes de IBM.

Tabla 3. Análisis elemental Concrax 1300

Parámetro	Oxidos (%)
Al ₂ O ₃	40,5
SiO ₂	40,7
Fe ₂ O ₃	5,7
TiO ₂	2,0
CaO	10,0
MgO	0,4
Alcalis	0,3

La relación entre la potencia nominal y el área de salida de la premezcla lista a ser quemada es conocida como *potencia específica*, y es un parámetro de diseño determinante en los quemadores atmosféricos, debido a:

- Es una relación inversamente proporcional a la tasa de aireación: a menor potencia nominal, mayor tasa de aireación primaria.
- Determina de que manera se distribuye la potencia del quemador en la cabeza, buscando que las temperaturas generadas estén lo más uniformemente distribuida en la cabeza. Este punto es de interés para los quemadores radiantes, los cuales poseen bajas potencias específicas; denotando que para una potencia nominal dada, el área de salida es muy grande. Ello se evidencia por la enorme cantidad de perforaciones en las matrices cerámicas empleadas para este tipo de aplicaciones.

Para las cabezas de quemadores atmosféricos, Cadavid y Ospina encontraron experimentalmente que para potencias específicas menores o iguales a $0,4 \text{ kW/cm}^2$ no es necesario la implementación de sistemas de estabilización de llama; además que para diámetros de inyectores máximo de $1,3 \text{ mm}$, las tasas de aireación máximas son de $0,6$ (Amell et al., 1999).

Luego de la fabricación de esta matriz en cemento refractario Concrax 1300, se obtuvieron dos zonas ranuradas separadas entre sí $1,5\text{--}2,0 \text{ cm}$, aproximadamente. Cada zona tenía 20 ranuras con un espesor de $0,5 \text{ mm}$ y longitudes entre $45\text{--}60 \text{ mm}$. Bajo estos parámetros el área total calculada de la cabeza fue de $10,70 \text{ cm}^2$.

Ahora bien, con este valor de área de salida, la placa tomó valores de potencias específicas que oscilaron entre $0,165 \text{ kW/cm}^2$ y $0,234 \text{ kW/cm}^2$, ambos valores inferiores al límite de $0,4 \text{ kW/cm}^2$ fijado por diseño. Desafortunadamente cuando se inició la combustión, la llama formaba un penacho que evitaba la combustión superficial y en consecuencia el calentamiento del área de la placa y las zonas que alcanzaban el color rojo, eran pocas. La formación del penacho obedece a la ausencia del aire primario necesario para mantener la combustión en la superficie de la placa. A pesar de que el mezclador posee venturi, la geometría de la cabeza y la cámara de premezcla, generaban una contrapresión tal que evitaba el fácil acceso de aire primario. Esta situación puede ocasionar tasas de aireación de hasta $0,3$ y obligó a que el sistema recibiera aire forzosamente mediante un compresor.

Sistema modificado para aire forzado

En vista de lo anterior, se modificó el quemador adicionándole aire por medio de un compresor. Con ello se logró optimizar la combustión en la superficie de la placa, logrando que esta se distribuyera por todo el área. Efectivamente, el exceso de aire eliminó el penacho y logró que la combustión fuera superficial.

Se midió la cantidad de oxígeno en la premezcla y se alcanzaron valores de hasta un 20%. Para el cálculo de la tasa de aireación se empleó la siguiente expresión:

$$n_p = \frac{1}{V_a} \times \left(Y''O_2 \text{ premezcla} - Y'O_2 \text{ aire} \right) \quad (3)$$

Donde:

n_p : Tasa de aireación primaria.

V_a : Volumen estequiométrico de aire (Tabla 4).

$Y''O_2$ premezcla: % volumen de oxígeno en la premezcla. (20%).

$Y'O_2$ aire: % volumen de oxígeno contenido en el aire, ambiente (20,8%).

Reemplazando estos valores, la tasa de aireación promedio es $2,52$; es decir, un 152% de exceso de aire.

Experimentación

Los experimentos fueron diseñados de forma que se pudieran establecer las siguientes comparaciones:

1. Efecto del tipo de gas y la distancia de medición con la termopila de Moll sobre la potencia emisiva del prototipo
2. Efecto de la distancia sobre la potencia emisiva y el rendimiento térmico de los equipos radiantes a gas y eléctricos

3. Potencia emisiva de diferentes equipos radiantes a gas y eléctricos
4. Rendimiento térmico de diferentes equipos radiantes a gas y eléctricos.

En la tabla 4 se resume el diseño experimental empleado. La reproducibilidad de los resultados se garantizó tomando 10 mediciones, una cada 2 minutos para cada dispositivo en las zonas radiantes correspondientes.

Tabla 4. Diseño experimental. Las variables respuesta fueron la potencia emisiva (pila de Moll) y el rendimiento térmico (tasa de evaporación de agua).

Dispositivo	Combustible		Distancia (cm)		Potencia suministrada (kW)
	Gas Natural	GLP	10	15	
Prototipo	x	x	x	x	1,7
ENCIMED	---	x	x	x	1,7
Parrilla eléctrica	---	---	x	x	1,8

Las mediciones de la emisividad de la placa se obtuvieron por medio de una termopila de Moll, el muestreo se hizo montando la placa en un quemador de aire forzado el cual permitió mantener la tasa de aireación primaria en un valor constante durante la medición, la potencia del quemador se varió por medio de la presión de suministro manteniendo el diámetro del inyector del gas fijo, se usaron dos gases en las mediciones, gas natural y GLP. En las tablas 5 y 6 se presentan los resultados de las cromatografías de ambos gases. La aireación primaria del quemador también se varió para cada potencia y gas utilizado. Debido a la variación de la emisividad con la distancia, la termopila se colocó a dos distancias de 10 y 15 cm de la placa.

En las mediciones de secado, empleadas para el cálculo del rendimiento térmico, se utilizó un trapo de algodón mojado y escurrido para evitar el goteo que pudiera alterar la medición, este se pesó seco, se mojó con un atomizador, y se volvió a pesar, el montaje del trapo de algodón fue sobre una parrilla vertical en la cual la tela quedaba totalmente abierta y expuesta al calor de la placa a una distancia fija y por un tiempo determinado. Se realizaron mediciones previas que garantizaron que en el tiempo de exposición de la tela, esta siempre tuviera

humedad. El proceso se repitió varias veces, variando la distancia de la placa a la tela.

Las pruebas comparativas se hicieron contra una placa cerámica de un calentador de ambiente (marca ENCIMED), el sistema de admisión de aire de esta placa es atmosférico de gas inductor. La presión de suministro se modificó de forma que su potencia fuera de 1,7 kW para poder establecer comparaciones con los otros dispositivos.

Montaje y equipos de medición utilizados

El montaje utilizado consistió de los siguientes elementos:

- *Cilindros de gas natural a alta presión.* Se utilizó gas natural de Guajira, almacenado en cilindros a 200 bar. En la Tabla 5 se muestran la composición y principales propiedades de dicho gas.
- *Cilindros de GLP convencional.* Se utilizó gas licuado de petróleo suministrado por la empresa Gases de Antioquia, almacenado en cilindros a 40 libras. En la Tabla 6 se muestran la composición y principales propiedades de dicho gas.

- *Regulador de alta presión.* Empleado para garantizar las presiones de suministro a los quemadores desde 0,05 bar hasta 1,35 bares.
- *Medidor volumétrico de diafragma para gas.* empleado para medir volumen de gas natural y GLP. Rango de medición 16 dm³ a 2 m³.
- Regulador de segunda etapa marca Slumberger de 140 a 5 mbar.
- Pirómetro marca Sensycon, Hartmann modelo IR-X4. Rango -30 a 900 °C.

Tabla 5. Composición y propiedades del gas natural empleado en los ensayos.

Componente	Concentración molar (%)
Metano	97,76
Etano	0,38
Propano	0,2
n- Butano	0
i- Butano	0
n- Pentano	0
i- Pentano	0
Hexano	0
Heptano	0
N ₂	1,29
CO ₂	0,37
Propiedades	
Va	9,4177
Poder calorífico inferior	9,3277 kw-h / m ³ _(st) 33,57972 MJ/ m ³ _(st)
Grav. Específica	0,5665
%CO ₂ máx.	11,7782

- Balanza digital marca Ohaus Scout .Rango 0.1-400gr.
- Parrilla eléctrica. Marca HACEB. Potencia 1.8kw.
- Calentador de ambiente ENCIMED. Modelo I-40
- Termopila de Moll, marca Phywe No. 08479.00

En la figura 1 se observa esquemáticamente el montaje experimental para la determinación de la potencia emisiva.

Tabla 6. Composición y propiedades del gas licuado de petróleo -GLP- empleado en los ensayos.

Componente	Composición molar (%)
Etano	3,55
Propanos	74,81
Butanos	21,54
Pentanos	0,11
PROPIEDADES	
Poder calorífico inferior	25,306 kw-h / m ³ _(st) 91,10 MJ/ m ³ _(st)
Factor de compresibilidad	0,9782
Densidad relativa (st)	1,6457
Peso Molecular Promedio	46,650

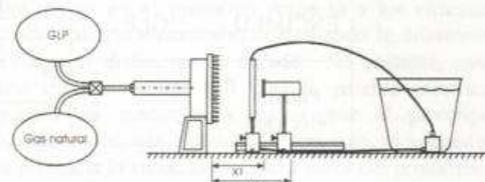


Figura 1. Montaje para la determinación de la potencia emisiva.

En la figura 2 se observa el montaje experimental para la determinación del rendimiento térmico a través de la eliminación de agua.

X₁ y X₂ son las dos distancias utilizadas para medir la potencia emisiva y la prueba de secado

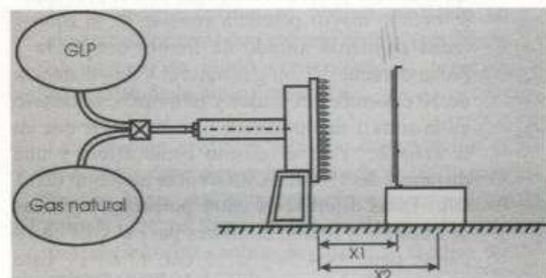


Figura 2. Montaje para las pruebas de secado.

Resultados

En la Tabla 7 se presentan los resultados más relevantes de la experimentación.

Tabla 7. Resumen de resultados experimentales

Dispositivo	Combustible	Distancia de ensayo (cm)	Potencia emisiva (W)	Rendimiento térmico
Prototipo	Gas natural	10	32,35 ± 0,03	0,103
		15	26,37 ± 0,02	0,0744
	GLP	10	38,07 ± 0,03	0,1232
		15	31,58 ± 0,03	0,0857
ENCIMED	GLP	10	19,17 ± 0,04	0,075
		15	13,23 ± 0,04	0,0516
Parrilla eléctrica	---	10	15,7 ± 0,02	0,1165
		15	13,75 ± 0,02	0,076

Discusión

La cabeza cerámica construida consta de dos zonas perforadas (figura 3), por esta razón, se midió la potencia emisiva en cada una de las zonas, de modo que la potencia total es la suma de cada zona. A continuación se mencionan los resultados más relevantes.

- En todas las pruebas realizadas con el prototipo, se obtuvo mayor potencia emisiva en la zona 1 (zona izquierda mirado de frente) que en la 2 (zona derecha). Con gas natural y una distancia de 10 cm entre quemador y termopila, se obtuvo en la zona 1 una potencia 13,5 % mayor que en la zona 2. Para el mismo combustible y una distancia de 15 cm, la diferencia aumentó (22,1 %). Estas diferencias entre potencias emisivas de cada zona fueron similares para el GLP, a 10 cm se tiene 14,4 % y a 15 cm, 17,8 %. Esto pudo deberse a inconsistencias en la construcción de la placa, dando lugar a algunas asimetrías, también pudo influir la heterogeneidad del sistema de homogeneización de la mezcla aire-gas antes de llegar a la placa.
- Con gas natural, la potencia emisiva en la zona 1 aumentó 18,6 % al pasar de 15 cm a 10 cm., en la zona 2 fue mayor (27,7 %). En promedio la potencia total aumentó un 22,7 % al reducir la distancia de 15 cm a 10 cm.

- Con GLP, la potencia emisiva en la zona 1 aumentó 18,9 % al pasar de 15 cm a 10 cm., en la zona 2 fue mayor (22,4 %) al experimentar el mismo cambio en la distancia. En promedio la potencia total aumentó un 20,5 % al reducir la distancia de 15 cm a 10 cm.



Figura 3. Placa cerámica del prototipo de quemador radiante a gas.

- La potencia emisiva fue en promedio 18% mayor con GLP que con gas natural independiente de la zona y de la distancia de medición.
- En el quemador radiante ENCIMED® la potencia a 10 cm fue 44,9 % mayor que la obtenida a 15 cm.

- En la parrilla eléctrica se presentó un aumento de 14,2 % en la potencia emisiva al pasar de 15 cm a 10 cm.
- El prototipo logró potencias emisivas superiores (120% en promedio con GLP y 85% en promedio con gas natural) a la del quemador ENCIMED® (al aumentar la distancia la potencia del quemador ENCIMED® disminuyó mucho más que la del prototipo).
- Con GLP se alcanzaron potencias emisivas en torno a 145% superiores a la de parrilla eléctrica HACEB®. Al usar gas natural se alcanzaron potencias emisivas en promedio 100% mayores que con la parrilla eléctrica HACEB®.
- El GLP dio 19,6% más rendimiento que el gas natural a 10 cm y 15,2% a 15 cm.
- Con gas natural el rendimiento térmico aumentó 38,4 % al pasar de 15 cm a 10 cm. Con GLP el aumento fue del 43,8 %.
- En el quemador ENCIMED® el rendimiento térmico aumentó 45,3 % al disminuir la distancia de 15 cm a 10 cm.
- En la parrilla eléctrica HACEB® aumentó el rendimiento 53,3 % al pasar de 15 cm a 10 cm.
- Al comparar el quemador ENCIMED® con el prototipo a GLP, se observó que el último tenía en promedio 65% más rendimiento, independiente de la distancia, con gas natural, fue superior en un 40% aproximadamente.
- La parrilla eléctrica HACEB® mostró un rendimiento 13,1 % mayor que el del prototipo funcionando con gas natural a una distancia de 10 cm. Cuando se incrementó la distancia a 15 cm esta diferencia disminuyó notablemente (2,1 % mayor el de la parrilla).
- Al cambiar a GLP el rendimiento térmico del prototipo superó en 5,8 % al de la parrilla eléctrica.

Análisis de resultados y conclusiones

La potencia emisiva del prototipo desarrollado operando con GLP fue en torno a un 18% mayor que con gas natural, independientemente de la distancia. El prototipo logró duplicar la potencia emisiva comparada con un dispositivo radiante a gas existente (quemador radiante ENCIMED), esto pudo deberse al uso de aire forzado en el primero. También duplicó la potencia emisiva respecto a un sistema radiante eléctrico ensayado. El rendimiento térmico, medido a partir de la capacidad de secado, fue mayor en el prototipo respecto a los sistemas usados para comparación, aumentando la diferencia a mayores distancias de secado. No obstante, para una distancia corta (10 cm) la parrilla eléctrica mostró un rendimiento mayor que el prototipo operando con gas natural, sin embargo, al aumentar la distancia la situación volvió a favor del prototipo.

- El material de la placa de referencia analizado mediante un difractograma de rayos X, reveló tener unas características muy similares a la cordierita. Como agente de porosidad se construyó la cabeza en Concrax 1300 mezclado con 2,5% de carbón vegetal, obteniendo resultados bastante buenos comparativamente con otros dispositivos probados.
- La geometría óptima se obtuvo mediante un sistema de ranuras con soporte central (ver figura 3), la cual se eligió conservando la potencia específica de la matriz cerámica.
- La aireación primaria a la que debe trabajar el quemador debe de ser aproximada al 100% para que la llama sea muy pequeña e intensa. Con esto lo que se logra es que la llama este muy superficialmente sobre la placa y facilite su calentamiento.
- La geometría de los puertos puede ser circular o rectangular cuidando siempre que la relación perímetro/área sea lo más grande posible, esto se logra con puertos muy pequeños y lo que se obtiene es que haya un mejor calentamiento de la placa.
- Si el mezclador que se va a usar en el quemador es atmosférico de gas inductor se debe tener en cuenta en su diseño que los puertos muy

pequeños dan mayor caída de presión que los puertos grandes, lo que trae como resultado una disminución en el arrastre de aire primario.

- El gas licuado de petróleo (GLP) mostró mejores resultados de potencia emisiva que el gas natural, debido a su mayor poder calorífico, en las mediciones realizadas, las potencias emisivas con GLP fueron del orden de 18% más elevadas que las medidas con gas natural independientemente de la distancia.
- La potencia emisiva es fuertemente dependiente de la distancia, al pasar de una distancia de 10 cm a 15 cm se perdió en promedio un 20% de potencia emisiva, lo que se reflejó inmediatamente en las pruebas de secado, pasando de cerca de 4,3 g_{H_2O}/min a 10 cm de distancia de la fuente hasta llegar casi 3 g_{H_2O}/min al duplicar la distancia.

Reconocimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Comité para el Desarrollo de la Investigación de la Universidad de Antioquia -CODI- por su financiación al proyecto. Igualmente expresan su reconocimiento al profesor Lorenzo Barraza por su orientación con los materiales cerámicos. Agradecen a las empresas ECOLVE y ERECOs por su apoyo en la consecución de materiales y puesta a punto de algunas pruebas. Finalmente al Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales GIPPIME y al Laboratorio de Petróleos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín; por su cooperación valiosa al desarrollo del proyecto.

Referencias

- AHMADY, FARSHID. Gas - fired IR burners are worth considering. Solaronics Inc. Process Heating. July/August 1994.
- AMELL, ANDRES; BARRAZA, LORENZO; GÓMEZ, ELIAS. Tecnología de la combustión de los gases y quemadores atmosféricos de premezcla. Modulo 2. *Centro de Extensión Académica -CESET-*, Universidad de Antioquia, Medellín, 1996.

AMELL, ANDRES; GIL, EDISON; CADAVID, FRANCISCO; Incidencia de los parámetros geométricos y de flujo sobre la aireación primaria en un quemador atmosférico a gas. *Revista Energética*, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, número 21(Agosto de 1999), pp. 65.

AMELL, ANDRES; HERNÁNDEZ, JAIME; CORTES, JAIME. Influencia de los parámetros geométricos y de flujo en la rata de aireación primaria y emisiones de monóxido de carbono en quemadores atmosféricos de mediana y alta presión. *Revista Energética*, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, número 23 (Julio de 2000), p. 113-119.

BULLOCK, STEVE. Gas Infrared. Present Research and Industrial Applications. www.gasnz.org/trade/gasnews/297/art4.htm 1996

CADAVID, FRANCISCO; OSPINA, JUAN. "Mecanismos de estabilización de llama". Tesis de Grado. Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. Diciembre de 1998.

JONES, J. B., Y DUGAN, R. E. Ingeniería termodinámica. Tabla A6.3. Primera edición. Prentice Hall, México, 1997.

SEDIGAS, Manual del gas y sus aplicaciones. "Paneles radiantes a gas en el secado del papel E-1", 1999

SEDIGAS, Manual del gas y sus aplicaciones. "Aplicaciones directas de gas en la industria textil F-1", 1999

WARK, KENNETH Y RICHARDS, DONALD E. Termodinámica. Tablas A12, A13, y A15. Sexta edición. McGrw-Hill, Madrid, 2001.

Anexo

Determinación del rendimiento térmico

Para evaluar el rendimiento térmico de los dispositivos mencionados se emplean los datos de las pruebas de secado.

El rendimiento térmico se evaluará como la potencia obtenida dividida por la potencia suministrada. Esta

última es la potencia térmica en el caso de los quemadores, y la primera se obtiene de los flujos de agua evaporados y de los respectivos cambios entálpicos del agua. De este modo:

$$\eta_t = \frac{Q_{OBTENIDO}}{Q_{SUMINISTRADO}} \quad (4)$$

Prototipo

Gas natural como combustible

Distancia entre quemador y paño: 10 cm

$$m_{H_2O} = 4,075 \frac{g}{min} \times \frac{1kg}{10^3g} \times \frac{1min}{60s} \Rightarrow m_{H_2O} = 6,7917 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

$$Q_{OBTENIDO} = m_{H_2O} \times q_{OBTENIDO} \quad (5)$$

De donde la energía térmica obtenida por el agua se puede obtener en función de los cambios entálpicos del agua así:

$$q_{OBTENIDO} = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} = h_2 - h_1 + h_{fg2} \quad (6)$$

En esta ecuación los subíndices se refieren a los estados de un diagrama h-s correspondientes a un calentamiento desde líquido subenfriado y luego incluyendo cambio de fase hasta vapor saturado a las condiciones ambiente del laboratorio (859 mbar). El último término es el calor latente o entalpía de vaporización del agua en las condiciones específicas de cada caso.

El punto 2 en la figura es el estado de líquido saturado, por tanto, en este caso:

$$h_2 = h_{f2} = h_f(859mbar) \Rightarrow h_2 = 399,62 \frac{kJ}{kg}$$

La entalpía en el estado 1 se ve determinada por las condiciones iniciales del ensayo en las cuales el agua se encuentra como líquido subenfriado (temperatura más baja que la de saturación a 859 mbar), por tanto:

$$h_1 = h(859mbar \text{ y } 22,7^\circ C)$$

Interpolando linealmente en las tablas respectivas (Jones y Dugan, 1997), se encuentra que $h_1 = 95,92$ kJ/kg. Donde $\Delta h_{1-2} = 303,7$ kJ/kg.

La entalpía de evaporación a 859 mbar es (Wark y Richards, 2001): $h_{fg} = 2269,144$ kJ/kg.

Reemplazando estos valores en la ecuación 6 se tiene $q_{OBTENIDO} = 2572,844$ kJ/kg

Reemplazando este valor junto con el flujo de agua evaporada en la ecuación 5 se encuentra la potencia obtenida así: $Q_{OBTENIDO} = 0,1747$ kW. Como la potencia suministrada fue 1,7 kW, se tiene:

$$\eta_t = 0,1165$$

Este procedimiento se aplica a cada dispositivo para determinar el rendimiento térmico en cada caso