

Diseño y construcción de un quemador de tubo radiante regenerativo

*Diego Alberto Henao V., Carlos Andrés Cano C.,
Andrés A. Amell Arrieta**

(Recibido el 25 de octubre de 2001)

Resumen

El desarrollo tecnológico de la industria del gas en Colombia, para el uso eficiente y seguro del gas natural, requiere la asimilación y adaptación de tecnologías de nueva generación, es por ello que en este artículo se presentan los resultados sobre el diseño, construcción y caracterización de un prototipo de quemador de tubo radiante regenerativo de una potencia térmica de 9,94 kW y un factor de aireación 1,05. Este sistema aprovecha la alta temperatura de salida de los humos de combustión, después que estos realizan un recorrido por un tubo metálico donde transfieren el calor en forma de radiación, para calentar un lecho cerámico que tiene la capacidad de absorber una parte del calor de los humos para luego transferirlo a una corriente de aire frío. Los beneficios que trae el calentamiento del aire son el ahorro de combustible, comparado con otros procesos que no incorporan recuperación de calor de los gases de combustión.

En este trabajo se ha logrado poner a prueba una metodología para el diseño de este tipo de quemadores y para alcanzar temperaturas máximas de calentamiento del aire de combustión de 377,9 °C, mediante la utilización de un material disponible en el mercado nacional, cuyas propiedades regenerativas deben estudiarse a profundidad.

----- *Palabras clave:* quemador radiante regenerativo, recuperación de calor, gas natural, combustión, eficiencia, transferencia de calor.

Design and construction of a regenerative radiant tube burner

Abstract

The technological development of the gas industry in Colombia, aiming at efficient and safe use of the natural gas, requires the assimilation and adaptation of new generation, technologies for this purpose in this article results are

* Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía de la Universidad de Antioquia.
anamell@udea.edu.co.

presented on the design, construction and characterization of a prototype of a burner of regenerative radiant tube with a thermal power of 9,94 kW and a factor of air 1,05. This system takes advantage of the high exit temperature of the combustion smokes, after they go through a metallic tube where they transfer the heat by radiation, to heat a ceramic channel that has the capacity to absorbing a part of the heat of the smokes and then transferring them to a current of cold air. The benefits of air heating are a saving in fuel, compared with other processes that don't incorporate the recovery of heat from the combustion gases.

In this work it was possible to probe a methodology for the design of this type of burners and to reach maximum temperatures of heating of combustion air of 377,9 °C, using a material available in the national market, whose regenerative properties should be studied in depth.

----- *Key words:* regenerative radiant burner, recovery of heat, natural gas, combustion, efficiency, transfer of heat.

Introducción

En Colombia, como resultado de la falta de conocimiento acerca del uso racional de la energía y de la no aplicación de nuevas tecnologías, no se están utilizando eficientemente los recursos energéticos; para superar esta situación es determinante la asimilación y adaptación, al contexto colombiano, de tecnologías de conversión energética de alta eficiencia que recientemente han venido apareciendo.

Para el uso energético del gas natural, particularmente en procesos a temperaturas superiores a 400 °C, la aplicación de sistemas de combustión radiante regenerativo representa importantes ahorros de energía, calidad de productos y flexibilidad en la operación de los sistemas. En este contexto el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas ha venido realizando investigaciones acerca de estas tecnologías que permitan identificar metodologías de diseño, adaptación a la escala económica de pequeñas y medianas empresas y la utilización de materiales disponibles en el mercado nacional, como resultado de estos esfuerzos se ha realizado el proyecto “diseño y construcción de un quemador de tubo radiante regenerativo”, con lo cual se pretende iniciar las investigaciones sobre los sistemas regenerativos en el país, ya que estos permiten obtener un mejor aprovechamiento, para los procesos, de la energía disponible en los combustibles.

Con este sistema se logra almacenar el calor de los humos de combustión en un material cerámico regenerativo que permite el calentamiento de un flujo de aire frío como comburente, con lo cual se obtiene mejor aprovechamiento de la energía, de acuerdo con la temperatura que se alcance.

Para establecer una metodología de diseño y evaluar los parámetros característicos de este tipo de sistema se examinaron experimentalmente fenómenos relacionados con la combustión, la radiación, la regeneración y el control integrados en este tipo de quemadores.

Configuración y funcionamiento

Un quemador de tubo radiante regenerativo es una combinación de un lecho regenerativo y de un tubo radiante que transmite calor por radiación. Se presenta bajo la forma de un sistema compacto y consta de una pareja de quemadores que funcionan cíclicamente, de tal manera que cuando uno actúa como quemador, el otro expulsa los gases de combustión. En cada quemador se encuentra un lecho de material que actúa como regenerador, funcionando en cada ciclo como un intercambiador de calor de tipo gas/sólido (recupera el 90% del calor contenido en los humos) y como un sólido/gas (precalienta el aire de combustión cediendo más del 60% del calor contenido en los gases de combustión).

Un sistema de control asegura en cada ciclo las conexiones necesarias entre los ventiladores que impulsan el aire de combustión y las que extraen los humos a fin de asegurar su funcionamiento.

El ahorro de gas en estos sistemas se ve representado tanto en la temperatura de calentamiento del aire de combustión, como en la eficiencia de la combustión [1].

El regenerador. Consiste en un arreglo de pasajes en un sólido, formando una matriz refractaria, a través de la cual los productos de combustión calientes y el comburente frío fluyen alternadamente. El calor transferido de los gases calientes al refractario es almacenado y luego transferido al aire de combustión, el cual se calienta de esta manera antes de entrar al quemador de gas.

El problema de diseño, que incluye la elección de materiales es complejo y está muy influido por los costos de la inversión y las condiciones de uso. La conductividad térmica y la capacidad térmica por unidad de volumen del refractario deben ser altas. Para una eficacia alta de calor transferido se requiere que los coeficientes de transferencia de calor y el área del refractario, sean grandes. Esto significa que el flujo de masa

de gases a través de los conductos del refractario debe ser lo más alto posible, pero con una caída de presión satisfactoria [2].

El sistema de extracción (eyectores) [3] utiliza el aire para evacuar gases o vapores, siendo el caso más representativo el del evector aire/gas. En este caso, y dada las diferencias en las propiedades físicas de una y otra corriente, la cantidad de movimiento de la corriente del gas es pequeña comparada con la del aire. En general, el fluido primario se suministra a presión a una boquilla de tipo convergente; que se descarga hacia una zona convergente donde se alcanzan niveles críticos de velocidad que producen un vacío para arrastrar los humos a través del lecho y posteriormente hacia la atmósfera.

Ventilador centrífugo suministra el aire al quemador para llevar a cabo la combustión, y a los eyectores, para realizar el efecto de vacío con el fin de arrastrar los humos de combustión hacia el material regenerativo y enviarlos luego a la atmósfera.

Válvulas de control de flujo de aire (válvulas de bola de 90°) permiten dirigir el flujo del aire a través de un agujero calibrado, para realizar las operaciones de suministro de aire para el quemador y para el evector.

Lecho regenerativo. Este material cerámico es de una configuración geométrica definida de diferentes tamaños.

Válvula de regulación de gas (válvula de bola). Esta válvula está constituida por un agujero calibrado, mucho más pequeño que el correspondiente a una válvula de bola común del mismo tamaño.

El quemador de gas [4]. Tiene las características de un quemador de rotación, en el cual el suministro de gas se realiza de manera axial, esto requiere de un elemento generador de turbulencia para efectuar la mezcla de aire/gas, una cabeza estabilizadora de llama y de un sistema de ignición encargado de generar el arco eléctrico.

Para el caso del quemador diseñado, el suministro de gas se realiza con un par de inyectoras ubicados de tal manera que el flujo de gas es perpendicular al flujo de aire, con lo cual no se hace necesario el uso de un generador de turbulencia, pero sí de la cabeza estabilizadora de llama.

Tubo radiante. Es un tubo de acero inoxidable de bajo calibre que tiene la propiedad de radiar calor cuando se encuentra en contacto con los humos de combustión.

Estos tipos de quemadores tienen dos modos de operación, modo quemador y el modo evector, estos modos de operación son los que se repiten en cada ciclo, a continuación se describen detalladamente cada uno de estos ciclos.

Modo quemador. Este modo de funcionamiento se presenta cuando uno de los quemadores se encuentra encendido, y el flujo de aire caliente proviene del lecho regenerativo.

Modo evector. En este modo, mientras que uno de los lados se encuentra realizando la operación del modo quemador, el otro se encuentra arrastrando los humos de la combustión después de su recorrido por el tubo radiante, hacia el lecho regenerativo y posteriormente evacuándolos hacia la atmósfera. La figura 1 es una representación de los modos de operación.

La figura 2 es una representación del quemador de tubo radiante regenerativo desarrollado, la secuencia de funcionamiento de este tipo de sistema de combustión puede describirse en los siguientes términos:

Lo primero es encender el ventilador centrífugo (1), que se mantendrá encendido todo el tiempo de funcionamiento. Luego se elige cuál de los dos lados va a realizar el modo quemador; para esto se requiere, cerrar las válvulas (12 y 13), ajustar la válvula (14) de tal forma que el suministro del caudal de aire sea el adecuado para mantener las emisiones de humos dentro del rango previamente establecido, luego se abre la vál-

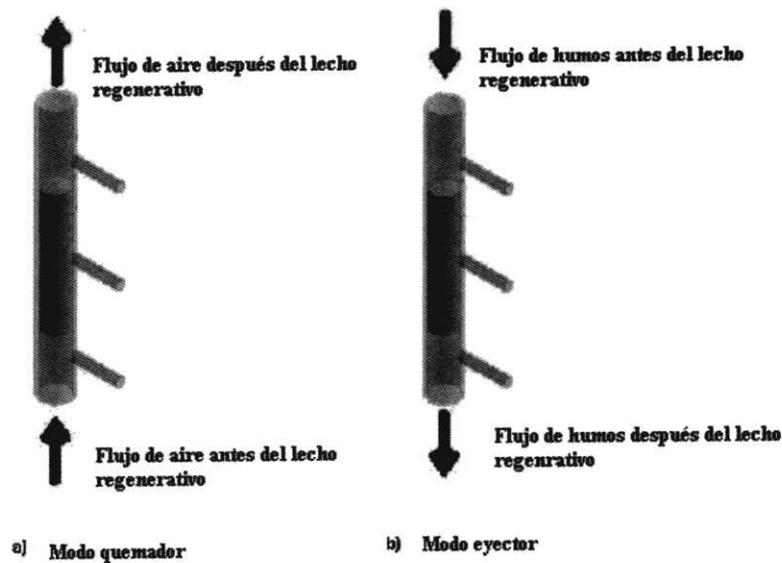


Figura 1 Modos de operación

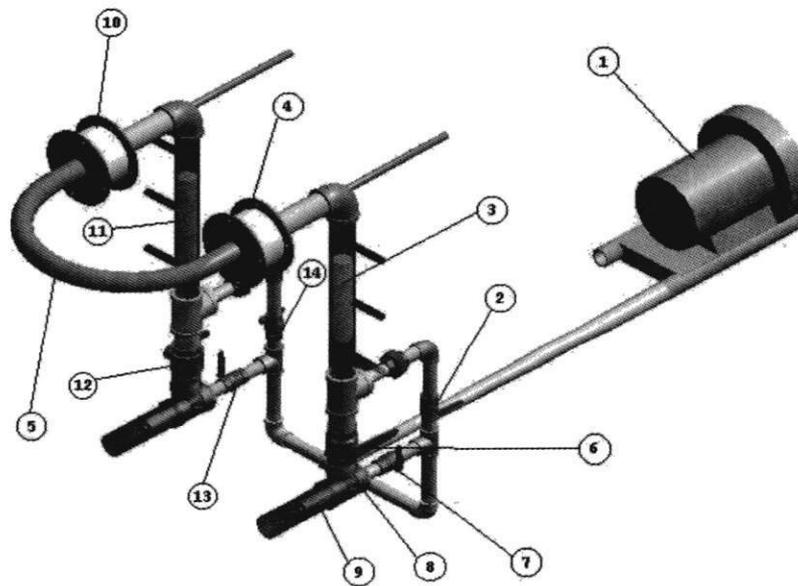


Figura 2 Quemador de tubo radiante regenerativo

vula de suministro de gas y se genera el arco eléctrico en la zona (10), para encender el quemador.

Como se ha mencionado con anterioridad, cuando uno de los lados está realizando la operación

de modo quemador el otro lado debe estar realizando la operación de modo eyector, para este ejemplo el modo eyector lo está realizando el lado izquierdo. En este modo se deben abrir completamente las válvulas (6 y 7) y cerrar la válvula (2), es así como el flujo de humos que provienen

del quemador de la zona (10) pasa por el tubo radiante (5) y por el lecho regenerativo (3), en este modo de operación el flujo de aire proveniente del ventilador se descarga por medio de la boquilla (8) hacia el eyector (9) lo que produce el vacío necesario para arrastrar los humos por el lecho regenerativo (3) y así ser descargados los humos diluidos con aire hacia la atmósfera. Cuando se cumple un ciclo de funcionamiento determinado, se intercambian los modos de operación para cada uno de los lados del prototipo, llevándose a cabo las mismas operaciones.

Cálculo del quemador de tubo radiante regenerativo

A continuación se describe el procedimiento de diseño que se aplicó en el proyecto desarrollado [5].

Sistema de combustión. Se diseñó considerando una potencia térmica de 8 kW según el poder calorífico inferior, un factor de aireación de 1,1 y teniendo en cuenta las propiedades de combustión del gas de la Guajira. Para la geometría de los inyectores se aplicó la ecuación de caudal de descarga a baja presión [6], asumiendo una presión de suministro del gas de 25 mbar, y utilizando para cada quemador una pareja de inyectores dispuestos en forma perpendicular, con el fin de generar una turbulencia para obtener una correcta mezcla del gas y del aire; además, se utilizó una cabeza de estabilización de llama, sus dimensiones se calcularon a partir de la teoría de quemadores de rotación [4], eligiéndose para ello el tipo de abertura cónica, debido a que es esta la que mejor permite obtener una llama de recirculación interna referida sobre ella misma.

Para este tipo de abertura se recomienda seguir esta regla empírica:

$$h > \frac{R_c}{2 - \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

Donde:

h : longitud recta de divergencia (altura del tronco de cono).

R_c : radio de la sección de entrada de divergencia.

α : ángulo a la cumbre del cono.

El ángulo de divergencia del cono no debe exceder de 120° , además se debe cumplir la siguiente relación:

$$h > R_s/2$$

Donde:

R_s : es el radio de la sección de salida de divergencia.

En la figura 3 se presenta en detalle el acople de la cabeza de estabilización de llama.

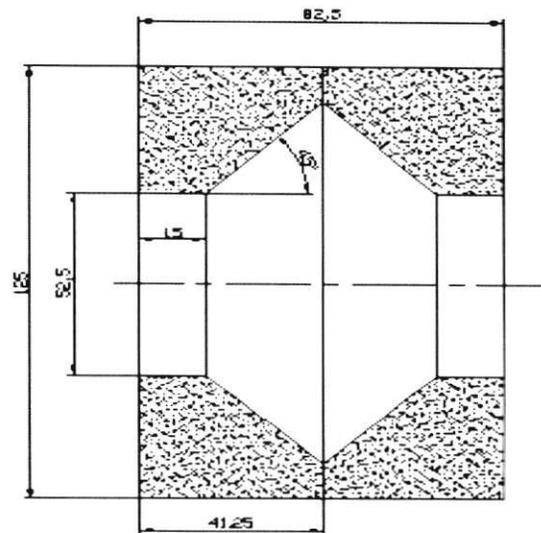


Figura 3 Configuración de la cabeza de estabilización de llama (medidas en mm)

Tubo radiante. Los parámetros básicos para determinar el tubo radiante son, principalmente, el diámetro y la longitud, así para la determinación del diámetro del tubo se utilizó la teoría de tubos

inmersos [7], que proporciona el diámetro del tubo de acuerdo con la potencia. Se hace necesario establecer una ecuación que determine el comportamiento de estas dos variables a fin de hallar el diámetro requerido de acuerdo con la potencia de trabajo:

$$D = 1,68 + 1,58 \cdot 10^{-2} P_T$$

Donde:

P_T : potencia térmica.

Para la longitud del tubo se toma la teoría de quemadores radiantes [8] la cual según el área disponible y la potencia específica, nos permite obtener la longitud del tubo radiante mediante el uso de las siguientes ecuaciones.

$$P_E = P_T / A_S$$

$$l = A_S / \pi * D$$

P_E : potencia efectiva.

P_T : potencia térmica.

A_S : área del tubo radiante.

l : longitud de tubo radiante.

D : Diámetro del tubo radiante.

De esta forma se obtiene un diámetro de 0,0508 m y una longitud del tubo radiante de 1,50 m. Este se muestra en la figura 4.

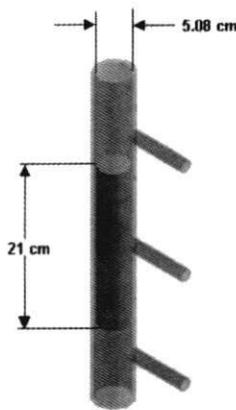


Figura 4 Configuración del sistema regenerativo

Sistema regenerativo. Se utilizó un material cerámico de diversa configuración geométrica, con la capacidad de retener y entregar calor rápidamente al aire que será utilizado posteriormente en el proceso de combustión descrito anteriormente. Se encuentra ubicado en una región anterior al sistema de combustión. En la figura 4 se muestra la configuración del sistema de regeneración.

Sistema de extracción de humos. Este sistema cumple la función de evacuar los humos de la combustión; para su diseño se aplicó la teoría de los mezcladores de aire inductor [9], estos permiten que el aire que fluye por una boquilla al ser descargado hacia una sección convergente arrastra los productos de combustión. El funcionamiento de los mezcladores de aire inductor, se basa en la siguiente ecuación fundamental.

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

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

ρ_m : densidad de la mezcla (kg/m³).

A_c : área seccional del cuello del mezclador (m²).

ξ : es el coeficiente global de pérdidas de presión (adimensional).

I : es el impulso del chorro de aire descargado a través del inyector (N).

Δp : es la diferencia de presión entre la admisión de gas y el medio aguas abajo del quemador.

Ahora bien, los pasos que se deben tener en cuenta para determinar cada una de las dimensiones que constituyen el sistema de extracción de humos son los siguientes:

- a. Determinar los parámetros de diseño.
 - Potencia térmica del quemador.
 - Gas que se utilizará.

- Tasa de aireación total.
- b. Establecer los parámetros básicos de funcionamiento.
- Propiedades del gas.
- Condiciones atmosféricas de presión y temperatura de sitio.
- c. Calcular los caudales de gas, aire, humos y relación aire/humos (R) en los estados de referencia.
- d. Calcular la densidad del aire y los caudales de aire y humos equivalentes en sitio de acuerdo a las condiciones establecidas en los ensayos previos.
- e. Utilizar la configuración de funcionamiento en la cual la presión de humos sea igual a la presión del aire en la que:

$$R \approx 0.8\sqrt{d} \frac{A_c / S_h}{\frac{A_c}{A_a} - 0.3} \quad (3)$$

- f. Realizar las consideraciones dimensionales de la configuración del quemador.

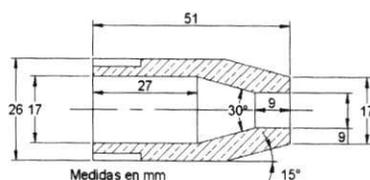
- g. Calcular los coeficientes de pérdida de carga en el mezclador en cada uno de los componentes y trayectos del mezclador, realizando las consideraciones que se requieren.

- h. Calcular el diámetro del cuello despejándolo de la ecuación:

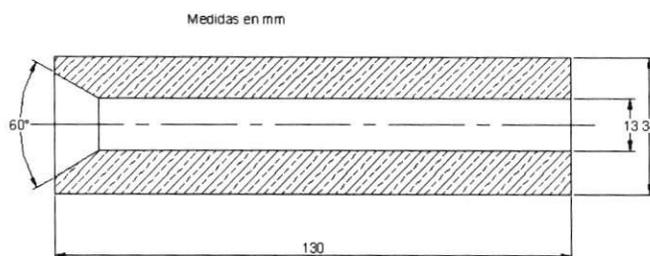
$$A_c = \frac{Q_a \sqrt{\frac{\delta p_a \left(1 + \frac{1}{R}\right) \left[\xi_{a/c} + (\xi_{m/c} + \xi_{b/c} + \xi_{t/c}) \left(1 + \frac{d}{R}\right)\right]}{2(p_a - p_s)}}}{\quad} \quad (4)$$

- i. Dimensionar el mezclador según las consideraciones dimensionales.
- j. Determinar el diámetro del inyector.
- k. Dimensionar el inyector y la tubería de aire.
- l. Calcular la sección circular interna de humos según el paso e.

En la figura 5 se representan las dimensiones de cada uno de los elementos del sistema de extracción.



Inyector



Mezclador

Figura 5 Configuración del sistema de extracción de humos

Caracterización de prototipo y análisis de resultados

Para obtener los principales parámetros característicos del sistema, se realizaron varios ensayos para diferentes geometrías del material regenerativo, ciclos de operación y potencia térmica. A continuación se presentan los resultados obtenidos para estos parámetros:

- *Comportamiento de la temperatura de los humos calientes.* Las mediciones se realizaron antes y después del lecho regenerativo, los resultados se registran en la tabla 1.

En la tabla 1 ΔT representa la diferencia de temperatura de los gases entre la entrada y la salida del lecho, dada una potencia en un ciclo determinado. Se observa cómo el material regenerativo absorbe mayor cantidad de calor para una geometría pequeña, ciclos menores de funcionamiento y mayores potencias, con lo cual se logran mayores temperaturas de calentamiento del aire de combustión.

- *Comportamiento regenerativo del material cerámico.* Se consideró que la variación de la temperatura del lecho cerámico, cuando este cambia de modo quemador a modo eyector, es una buena indicación de las características de regeneración de éste, debido a que la diferencia de temperaturas entre estos dos modos de operación es relativamente pequeña, en la tabla 2 pueden observarse estos resultados.

De la tabla 2 se puede decir que para ciclos pequeños de funcionamiento del quemador se logra obtener mayor estabilidad de la temperatura del material regenerativo, puesto que la velocidad de disipación de calor a los alrededores es menor.

- *Comportamiento de la temperatura de calentamiento del aire.* Esta temperatura fue medida a la salida del lecho regenerativo, en la tabla 3 se presentan los resultados.

De acuerdo con la información de la tabla 3 se observa que hay mayor calentamiento del

Tabla 1 Temperatura de los humos de combustión

| | | <i>Ciclos</i> | | | | | | | | | | | | |
|------------|--|---|-------|-------|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|------|-----------|
| | | <i>40 seg</i> | | | | <i>60 seg</i> | | | | <i>2 min</i> | | | | |
| | | <i>Temperatura de los humos de combustión (° C)</i> | | | | | | | | | | | | |
| | | <i>Potencia (Kwatt)</i> | | | | <i>Potencia (Kwatt)</i> | | | | <i>Potencia (Kwatt)</i> | | | | |
| | | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | Geometría |
| Antes | | 336,6 | | | | 331,7 | | | | 310,7 | | | | Grande |
| Después | | 70,6 | | | | 55,9 | | | | 105, | | | | |
| Antes | | 376,9 | | | | 385,4 | | | | 381,8 | | | | Pequeño |
| Después | | 44,6 | | | | 45,6 | | | | 57,1 | | | | |
| Antes | | 344,6 | | | | 408,4 | | | | 439,4 | | | | Grande |
| Después | | 116,2 | | | | 98,13 | | | | 106 | | | | |
| Antes | | 420,3 | | | | 415,2 | | | | 404,4 | | | | Pequeño |
| Después | | 106,3 | | | | 115,8 | | | | 175,4 | | | | |
| ΔT | | 266 | 332,3 | 228,4 | 314 | 275,8 | 339,8 | 310,3 | 299,4 | 205,7 | 324,7 | 333,4 | 229 | |

Tabla 2 Temperatura del lecho finalizando los diferentes modos de operación

| | Ciclos | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------------------|------|------|-------|-------------------------|------|------|------|-------------------------|------|-------|-------|-----------|
| | 40 seg | | | | 60 seg | | | | 2 min | | | | |
| | Temperatura | | | | | | | | | | | | |
| | Potencia (Kwatt) | | | | Potencia (Kwatt) | | | | Potencia (Kwatt) | | | | |
| Modo | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | Geometría |
| Eyector | 150,8 | | | | 122 | | | | 223,2 | | | | Grande |
| Quemador | 103,4 | | | | 70,6 | | | | 74,2 | | | | |
| Eyector | 285,8 | | | | 272,8 | | | | 269,6 | | | | Pequeño |
| Quemador | 264,4 | | | | 244,4 | | | | 190,4 | | | | |
| Eyector | 173,4 | | | | 185,1 | | | | 279,3 | | | | Grande |
| Quemador | 118,9 | | | | 107,2 | | | | 88 | | | | |
| Eyector | 212,6 | | | | 249 | | | | 321,5 | | | | Pequeño |
| Quemador | 196,5 | | | | 198,7 | | | | 131,8 | | | | |
| ΔT | 47,4 | 21,4 | 54,5 | 161,1 | 51,4 | 28,4 | 77,9 | 50,3 | 149 | 79,2 | 191,3 | 189,7 | |

Tabla 3 Temperatura de calentamiento del aire a la salida del lecho

| | Ciclos | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|------|------|------|---------------|------|------|------|--------------|------|------|------|-----------|
| | 40 seg | | | | 60 seg | | | | 2 min | | | | |
| | Potencia (Kwatt) | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura de calentamiento (°C) | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | 5,97 | 6,81 | 8,82 | 9,94 | Geometría |
| | 277,6 | | | | 243,6 | | | | 226,4 | | | | Grande |
| | 353,1 | | | | 348,3 | | | | 309,7 | | | | Pequeño |
| | 245,4 | | | | 291,9 | | | | 287,6 | | | | Grande |
| | 377,9 | | | | 346,1 | | | | 323,2 | | | | Pequeño |

aire cuando se tiene menor duración del ciclo, mayores potencias de funcionamiento y geometría pequeña del lecho regenerativo, esta situación se explica por las siguientes razones:

— Dado que manteniendo el volumen del lecho constante y tamaños menores del lecho regenerativo el área de transferencia de calor es mayor, esto permite retener y entregar mayor cantidad de calor de los

humos de combustión al aire que posteriormente será utilizado en el proceso de combustión.

- A mayor potencia se tiene más calor disponible en los humos y mayor flujo másico con lo cual se incrementa la transferencia de calor hacia el lecho regenerativo.
- A menor duración del ciclo de operación se tendrá menor disipación de calor desde el lecho hacia los alrededores.

— Determinación de la rapidez de aireación. Con la composición de O_2 y CO_2 en los humos secos y aplicando el *software* Combugas se determinó el factor de aireación en cada ensayo, en la figura 6 se presentan los resultados obtenidos, como puede observarse siempre se obtuvieron combustiones con un bajo exceso de aire. Para estas condiciones la composición promedio de los gases de combustión fue: O_2 1,48%, CO 0,048 %, CO_2 11,03 % y CH_4 0,018%, obteniéndose en cada ensayo combustión de buena calidad.

- *Eficiencia de combustión sin regeneración y con regeneración.* La determinación de este factor permite mostrar desde otro punto de vista cuáles son las ventajas que presentan los sistemas regenerativos comparados con los sistemas que no utilizan la regeneración. En la figura 7 se muestran las diferentes eficiencias de combustión sin regeneración y con regeneración.

Del análisis de estos resultados se obtiene que el sistema presenta incremento de la eficien-

cia de combustión con regeneración en promedio de 20% mayor, lo cual implica que se tiene mayor energía disponible cuando se utiliza este tipo de sistema.

- *Comportamiento de la temperatura superficial y del fenómeno de radiación en el tubo radiante.* El comportamiento de la temperatura a lo largo del tubo solo muestra un comportamiento estable en la zona media de este, situación que no se presenta en los extremos del tubo radiante, debido a los modos de operación quemador y eyector que se presentan al operar el sistema.

En la figura 8 se ilustra uno de los casos donde se muestra el comportamiento descrito anteriormente.

Para el fenómeno de radiación se consideraron los resultados obtenidos anteriormente, con respecto a la zona media del tubo radiante, lográndose determinar que el aumento de la potencia de radiación se da a medida que aumenta el tiempo de funcionamiento, hasta llegar a un valor estable. En la tabla 4 se muestran estos resultados.

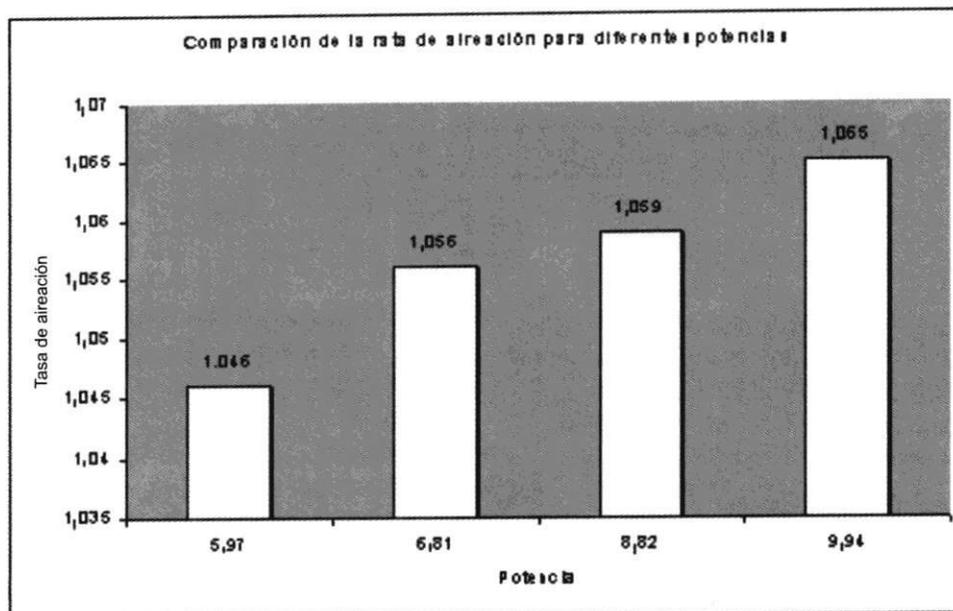


Figura 6 Tasas de aireación

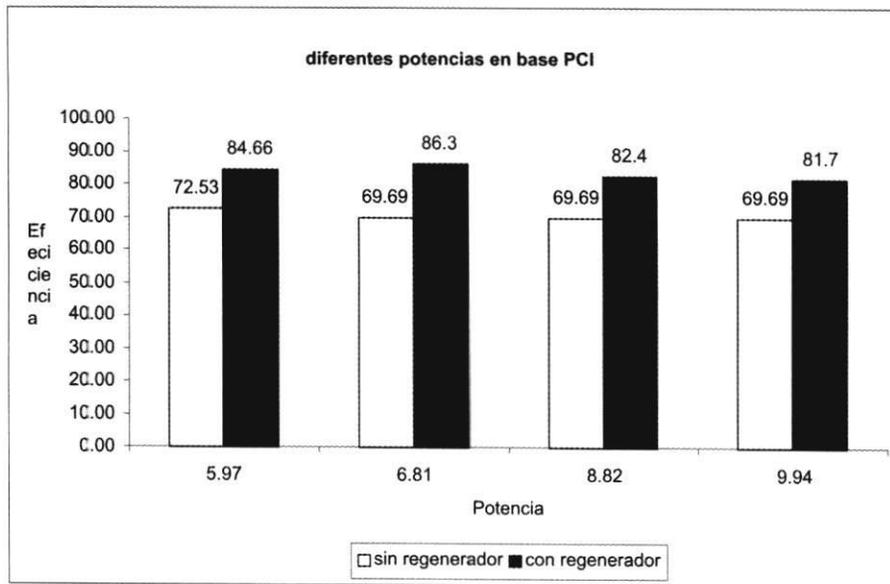


Figura 7 Eficiencia de combustión sin regeneración y con regeneración

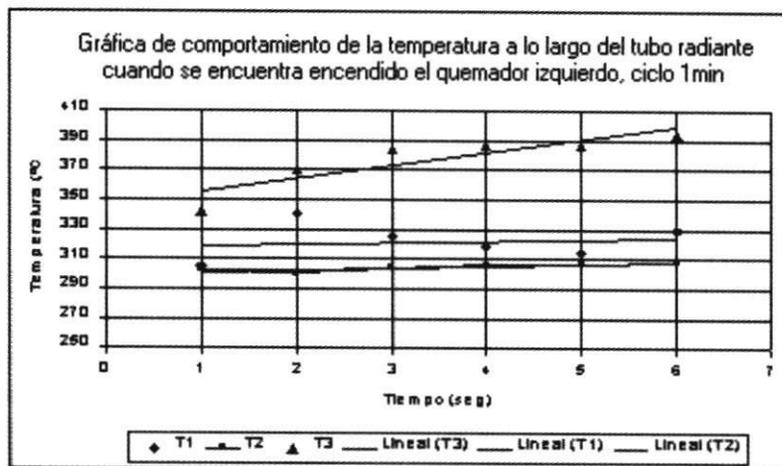


Figura 8 Temperatura a lo largo del tubo radiante

Tabla 4 Comportamiento de la eficiencia de radiación

| Ciclo (seg) | Potencia de radiación P_r (kWatt) |
|-------------|-------------------------------------|
| 60 | 0,1980 |
| 40 | 0,2227 |
| Promedio | 0,2100 |

Conclusiones y recomendaciones

- En un sistema de combustión con regeneración las variables principales para el diseño y operación óptimo dado un material con propiedades regenerativas son: el tiempo de duración del ciclo, la geometría del material regenerativo y la potencia térmica. Cuando

el ciclo de operación se disminuye, la complejidad de la geometría del material se disminuye y la potencia se aumenta, la cantidad de calor recuperado es mayor y la temperatura de calentamiento del aire de combustión se eleva con lo cual se obtiene mayor eficiencia de combustión.

- Para la realización del diseño de un quemador de tubo radiante regenerativo, es necesario definir:

— En primer lugar la potencia térmica del sistema y el factor de aireación, para determinar cuál es el caudal de gas, aire y humos. Con estos parámetros es posible dimensionar los sistemas de suministro de combustible, mezclador, cámara de combustión y el de extracción de humos.

— El sistema de radiación con base en la potencia de radiación que se desea emitir.

— El sistema de combustión adecuado a la constitución física del prototipo de combustión.

— Un sistema de suministro de aire que tenga la cabeza de presión suficiente para vencer las pérdidas de fricción tanto por la tubería, el quemador y el lecho regenerativo.

- El quemador en sí utilizado en este prototipo, es de una configuración que reúne las características de los quemadores de mezcla en el cabezal, basado en quemadores de aire inductor y rotativos, ya que el gas es arrastrado por un flujo de aire y la estabilización de la llama se hace por medio de una cabeza de un quemador de llama a rotación. El quemador diseñado funciona para el prototipo, debido a que proporciona una buena estabilización de llama, pero se presenta el problema de la ubicación de los inyectores de gas. Se recomienda realizar un suministro de gas de tal forma que la corriente de gas sea paralela a la corriente de aire, y que estén ubicados cerca de la cabeza de estabilización de llama, ya que

esta configuración dio como resultado una formación de llama mucho antes de la cabeza de estabilización de llama. Es bueno considerar otros mecanismos de estabilización de llama para optimizar este tipo de quemador.

- El sistema de extracción de humos empleado requirió, para su diseño, tomar como referencia la metodología de diseño de los mezcladores de aire inductor, debido a que se tenía que realizar una extracción de humos, con el fin de inducir un sentido de flujo de humos hacia el regenerador y hacer que la longitud de la llama se alargue más dentro del tubo, como resultado del efecto vénturi que este genera. Se logró el propósito esperado, ya que se obtuvo un buen arrastre de los humos.
- Los ensayos realizados mostraron mayor temperatura de calentamiento del aire, al aumentar la potencia, disminuir la intensidad del ciclo y mantener un área pequeña del material regenerativo, manteniendo aproximadamente constante el factor de aireación.
- De acuerdo con la teoría que se ha analizado acerca de una combustión confinada, se tiene que la tasa de aireación debe estar alrededor de 1,2. Según los resultados obtenidos se puede obtener combustión de buena calidad con tasas de aireación de 1,05.
- Se encontró que la distribución de temperatura a lo largo del tubo radiante no fue uniforme, ya que se encuentra entre dos fuentes de calor que son los quemadores que funcionan de una manera cíclica, pero se observa que después de un determinado tiempo de operación, la temperatura tiende a estabilizarse por zonas; como la zona cercana a los quemadores y en especial la parte media del tubo radiante.
- La capacidad que tiene un material regenerativo de absorber y entregar calor rápidamente, incide directamente entre otros aspectos en el ahorro de combustible utilizado para un proceso de combustión, es decir cuanto mayor sea el calentamiento del aire,

mayor será el ahorro energético, esta disminución en el consumo de combustible se ve reflejada especialmente en factores económicos. Es importante resaltar el hecho de haber encontrado un material con propiedades regenerativas en nuestro medio, debido a que el material utilizado presenta buenas propiedades regenerativas, es conveniente caracterizar más a fondo dicho material en lo referente a sus propiedades térmicas (conductividad térmica, calor específico y densidad), coeficiente convectivo de transferencia de calor, perfiles de temperaturas, eficiencias regenerativas y pérdidas de presión de acuerdo con características de volumen, masa y condiciones de operación en general.

El diseño y la construcción de un sistema radiante regenerativo requiere de materiales con buenas propiedades regenerativas en lo relacionado con absorber y entregar calor rápidamente, para obtener buen calentamiento del aire que ha de utilizarse en el proceso de combustión, de igual forma se hace necesario instaurar el uso de elementos con propiedades radiantes que permitan transmitir el calor generado por el sistema a un proceso específico. Para llevar a cabo estas expectativas y obtener buen rendimiento del sistema, se debe implementar un sistema de control que reduzca los tiempos muertos que incurren por la cantidad de variables a manejar en el funcionamiento del equipo.

Referencias

1. *Aplicaciones avanzadas del gas natural en procesos de alta temperatura*. Serie Tecnológico-Energética. Serie A-1. pp. 25-29.
2. Pritchard, R. J, Guy. "Methods of heat recovery". *Handbook of industrial gas utilization*. pp. 457-469.
3. Pedroni, Jose M. "Eyectores de vacío a aire o líquido y otras aplicaciones". *Ingeniería Química Española*. Madrid, marzo, 1979. pp. 71-78.
4. Association Technique de l'industrie de gaz en France. *Calcul, conception et utilisation de bruleurs industriel a gaz*. Collection de techniques gazières. Deuxième partie. París, 1983. pp. 81-87.
5. Cano, Carlos y Henao, Diego. Tesis: *Diseño y construcción de un quemador de tubo radiante regenerativo*. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. 2001.
6. Amell, Andrés y otros. *Tecnología de la combustión de los gases. Modulo 4 y 5: Quemadores atmosféricos con llama de premezcla y quemadores de aire inductor*. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Centro de Extensión Académica CESET. Medellín, 1998.
7. Association Technique de l'industrie de gaz en France. *Calcul, conception et utilisation de bruleurs industriel a gaz*. Collection de techniques gazières, Troisième partie. París, 1983. p. 119.
8. Association Technique de l'industrie de gaz en France. *Calcul, conception et utilisation de bruleurs industriel a gaz*. Collection de techniques gazières. Sixième partie. París 1983. pp. 238-248.
9. Martínez, Camilo y Cardona, Mario. Tesis: *Diseño y construcción de un quemador de aire inductor* Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. 2000.