

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN AUTOREGENERATIVO Y RADIANTE PARA PROCESOS DE ALTA TEMPERATURA EN PYMES

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN AUTOREGENERATIVE AND RADIANT COMBUSTION SYSTEM FOR HIGH TEMPERATURE PROCESS IN SME

ANDRÉS AMELL

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

HENRY COPETE

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia, elhcl897@udea.edu.co

FRANCISCO CADAVID

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia, fcadavid@udea.edu.co

Recibido para revisar 2 de Mayo de 2006, aceptado 3 de Agosto de 2006, versión final 16 de Agosto de 2006

RESUMEN: La búsqueda de tecnologías de calentamiento que reduzcan el consumo de combustible, disminuyan las emisiones contaminantes y mejoren la productividad de los procesos y calidad de los productos en procesos de alta temperatura, ha motivado la investigación y desarrollo tecnológico de sistemas térmicos. En este contexto el artículo presenta los resultados del proyecto “Desarrollo y Evaluación de un Sistema de Combustión Autoregenerativo y Radiante para Procesos de Alta Temperatura en Pequeñas y Medianas Empresas PyMES”, presentando la configuración, funcionamiento, caracterización, parámetros de operación y comportamiento de un prototipo desarrollado que opera con 28 kW de potencia térmica con base al poder calorífico inferior, factores de aireación de 1.05 y 1.20 y temperaturas de precalentamiento de aire hasta de 700°C.

PALABRAS CLAVE: Tubo radiante, Combustión, Quemador regenerativo, Radiación térmica, Transferencia de calor, Emisividad, Temperatura.

ABSTRACT: Searching for new heating technologies that reduce fuel consumption, contaminant emissions and to improve the process productivity and products quality of high temperature process, it has motivated the researching and technologic development of the thermal systems. In that context, this article displays the results of the project: “Development and evaluation of an autoregenerative and radiant combustion system for high temperature process in small and medium scale enterprises (SME)” presenting the configuration, operation, characterization, operation parameters and behavior of a developed prototype that operates with 28 kW of thermal power based to the lower heating value, excess air factors of 1.05 and 1.20 and temperatures of air preheating until 700°C.

KEYWORDS: Radiant tube, Combustion, Regenerative burner, Thermal radiation, Heat transfer, Emissivity, Temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Las industrias de transformación de materiales como las fundiciones, las de fabricación de vidrio, las de tratamientos térmicos y las de deformación plástica, son de gran importancia en el desarrollo económico de un país. Los procesos de estas industrias se caracterizan por

altos niveles de temperatura, en promedio en el rango de 400 °C a 1500 °C [1], por lo que son grandes consumidores de energía térmica, como también su productividad y calidad de los productos, se ven fuertemente afectados por los mecanismos de transferencia de calor y composición química de los productos de combustión.

La búsqueda de tecnologías de calentamiento que reduzcan el consumo de combustible, disminuyan las emisiones contaminantes y mejoren la productividad de los procesos y calidad de los productos, ha motivado la investigación y desarrollo tecnológico en procesos de alta temperatura, en los siguientes frentes [2, 3, 5]:

- Desarrollo de sistemas de recuperación de calor, para aprovechar la energía térmica contenida en los humos, debido a que salen del proceso a muy alta temperatura, precalentando el aire de combustión, con lo cual se mejoran significativamente la eficiencia de combustión y efectividad de transferencia de calor. Para ello se han venido desarrollando los recuperadores gas – gas, y los regeneradores gas – sólido – gas.
- La primera generación de tecnologías de recuperación se caracterizó por ser un sistema centralizado y ubicado al exterior de las cámaras de combustión, a donde se conducían los gases de combustión calientes, para transferir el calor al aire y posteriormente conducir este a los quemadores. Si bien con ello se lograba la recuperación de calor y en consecuencia la reducción de consumo de combustible, resultaban sistemas de gran tamaño y alto costo de inversión.
La incorporación de la recuperación de calor a la cámara de combustión, a través de arreglos compactos y de gran efectividad de transferencia de calor, ha dado origen a los autorecuperadores y autoregeneradores, como nuevas tecnologías de recuperación del calor [9].
- Desarrollar sistemas de calentamiento por radiación, para aprovechar las ventajas comparativas de este modo de transferencia de calor, tales como: no se requiere de un medio material para el transporte de energía, la radiación viaja a la velocidad de la luz por lo que se obtiene una rapidez de respuesta, se difunde uniformemente en el espacio obteniendo un calentamiento uniforme [4, 11].

- Uno de estos tipos de sistemas son los tubos radiantes, los que inicialmente se fabricaron de acero con alto contenido de Cromo – Silicio, pero que han venido siendo desplazados por los de carburo al silicio, debido a las ventajas que estos últimos presentan: mayor rapidez de calentamiento y enfriamiento, mayor coeficiente de emisividad, calentamiento más uniforme longitudinal y radial, no presentan corrosión en caliente, ni ruptura por gradientes de temperatura.

Mediante el acople de cámaras de combustión con autoregeneración incorporada y tubos radiantes, se puede obtener un sistema autoregenerativo y radiante, de alta eficiencia térmica, rapidez y calidad de calentamiento, el cual se constituye en una de las tecnologías más promisorias para los procesos de alta temperatura.

En Colombia las pequeñas y medianas empresas con procesos de alta temperatura, tienen un impacto importante en la generación de empleo. Ante la inminente firma del Tratado de Libre Comercio, este sector enfrenta grandes retos, tales como: aprovechar las posibilidades de exportación y/o conservar sus niveles en el mercado nacional, cualquiera que sea la opción, se requiere de la modernización tecnológica de sus procesos, para mejorar su competitividad. En este contexto, es de particular importancia la reconversión de sus sistemas de combustión y calentamiento, con la introducción de tecnologías autoregenerativas radiantes.

Como respuesta a lo anteriormente planteado el grupo, GASURE realiza actividades para la apropiación, divulgación, adaptación, diseminación y adecuación a la escala económica de PyMES, de tecnologías de combustión y calentamiento de nueva generación. En este contexto se presentan los resultados del proyecto: “Desarrollo y Evaluación de un Sistema de Combustión Autoregenerativo y Radiante para Procesos de Alta Temperatura en PyMES”.

2.CONFIGURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Este sistema se presenta como un paquete compacto constituido por dos quemadores trabajando cíclicamente en periodos mínimos de

30 segundos, de una pareja de regeneradores térmicos que acumulan calor de los productos de combustión y lo entregan al aire precalentándolo antes de la combustión, un tubo radiante de carburo de silicio de alta emisividad y un sistema de control, el cual asegura en cada ciclo las

conexiones necesarias entre un ventilador que impulsa el aire de combustión y el de los eyectores que extraen los productos de la combustión, el sistema desarrollado es mostrado en la Figura 1, se presenta a continuación una breve descripción de sus componentes.

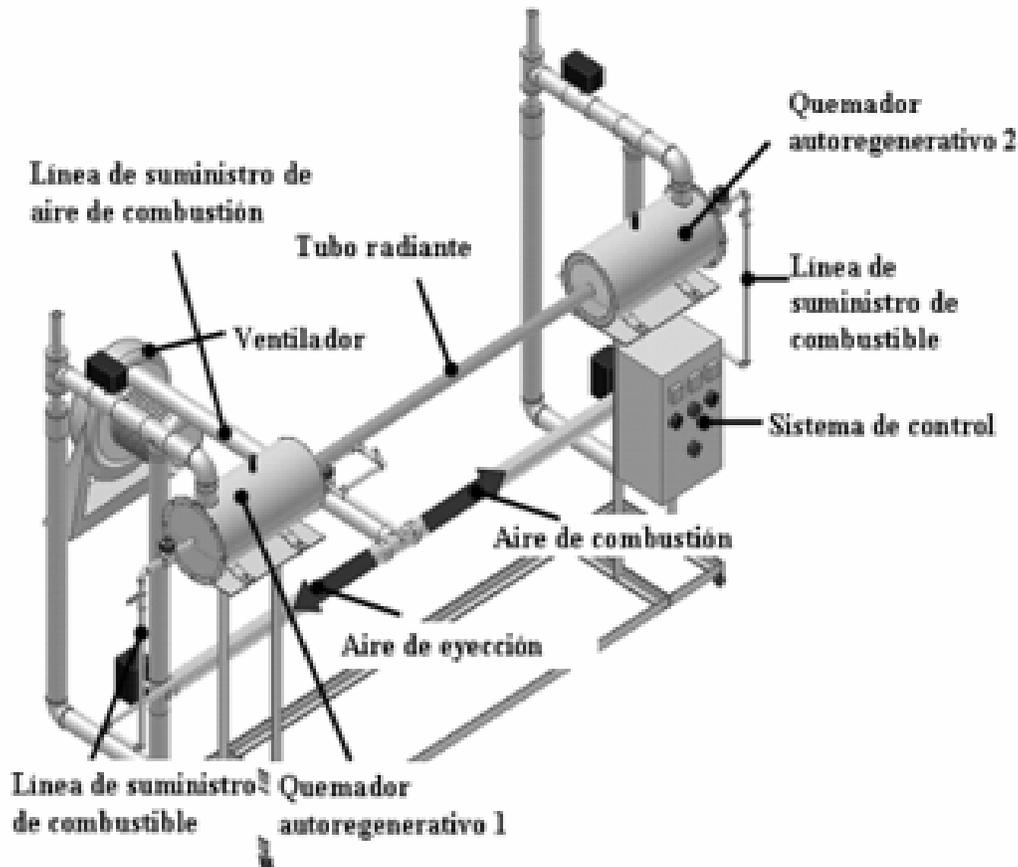


Figura 1. Sistema de Combustión Autoregenerativo y Radiante
Figure 1. Autoregenerative and radiant combustion system

Sistema regenerativo. La constante y creciente demanda por mejoramientos de eficiencia han llevado a la utilización de recuperadores de calor en sistemas térmicos de alta temperatura, en los cuales se aprovecha parte de la energía contenida en los humos para precalentar el aire que se dirige hacia la combustión [14].

Los regeneradores térmicos gas – sólido, sólido – gas, son intercambiadores de calor constituidos de una masa acumuladora de calor, formando una matriz refractaria, a través de la cual el calor perdido de los gases y el aire de la combustión frío se pasan alternadamente.

El calor transferido al refractario de los gases calientes, es almacenado y subsecuentemente entregado al aire de combustión, el cual de esta manera es precalentado antes de entrar al quemador de gas. Este material tiene la propiedad de absorber y entregar el calor rápidamente [12].

El material utilizado en el sistema regenerativo son esferas de diámetro 12.7 mm provenientes de la China, conocidas comercialmente como “Thermal storage balls”, una fotografía del lecho regenerativo incorporado a la cámara de combustión se presenta en la Figura 2, cuya masa es de 8.5 kg.

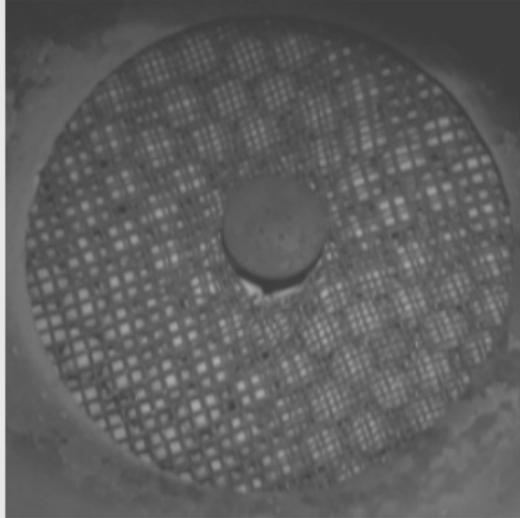


Figura 2. Lecho regenerativo en cámara de combustión.

Figure 2. Regenerative bed in combustion chamber.

Cámaras de combustión autoregenerativas. Las cámaras de combustión autoregenerativas, llamadas así porque el lecho regenerativo está integrado a estas antecediendo la zona de combustión, presentan una configuración geométrica cilíndrica, sus paredes fueron construidas en material refractario “Concrax 1700” con una cubierta exterior de acero para reforzar y proteger el material cerámico. En la

Figura 3 se muestra la configuración de una de las cámaras autoregenerativas, el lecho regenerativo es empacado en una primera zona de la cámara en la cual se recupera el calor de los productos de combustión provenientes de la cámara del frente y se le entrega al aire que se dirige hacia la combustión una vez las válvulas hallan conmutado y sea su turno de actuar como quemador; una malla en acero inoxidable separa este lecho regenerativo de la zona de combustión, donde el gas natural es inyectado por medio de cuatro orificios con diámetro de 1.58 mm cada uno, el inyector de configuración geométrica cónica permite que las descargas formen un ángulo de 30° con el eje axial de las cámaras.

La llama presente es de difusión por suministrarse el gas combustible y el aire de combustión en forma separada creándose la mezcla por difusión turbulenta. Un transformador de ignición permite que se genere la chispa en la bujía localizada al interior de la cámara de combustión para generar el inicio de la combustión una vez se han mezclado el combustible y el comburente. El tubo radiante es ensamblado al finalizar la zona de combustión de cada cámara, recibiendo los productos de la combustión para radiar al proceso.

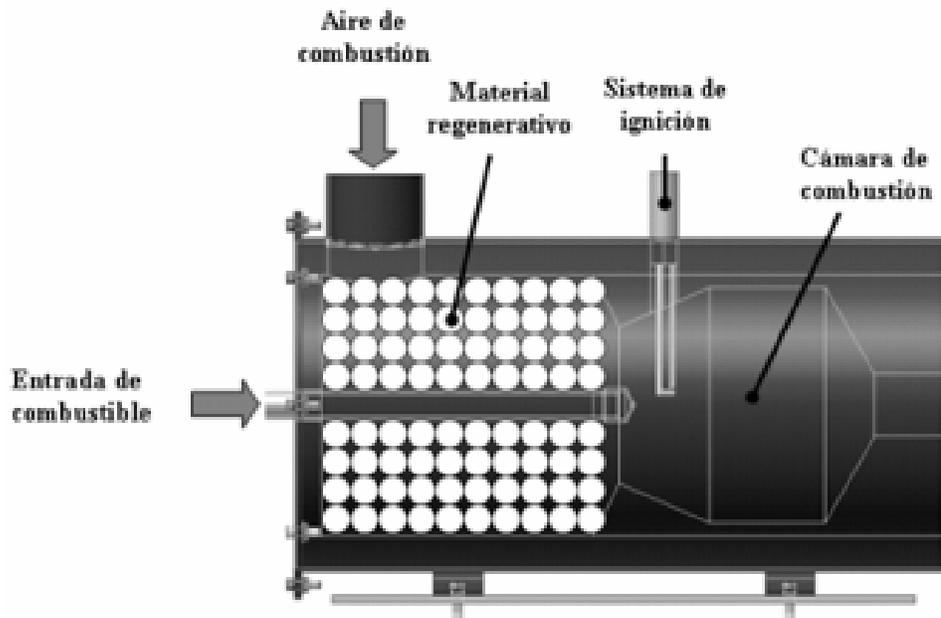


Figura 3. Cámara de combustión autoregenerativa
Figure 3. Autoregenerative combustion chamber

Sistema radiante. Está constituido por un tubo radiante de carburo al silicio de 38 mm de diámetro, 3 mm de espesor y 1.5 m de largo acoplado en sus extremos a las cámaras de combustión.

La superficie externa del tubo se calienta debido a la transferencia de calor convectiva de los gases de combustión provenientes de una cámara, cuando esta trabaja en modo quemador y la otra funciona en modo eyector para lograr la extracción de los gases por el efecto de eyección.

Los tubos radiantes son utilizados en aplicaciones industriales en procesos de calentamiento indirecto donde la llama o los productos de combustión no deben estar en contacto con la carga o producto a calentar, evitando su contaminación y garantizando una transferencia de calor uniforme [10]. Por medio de una combustión confinada se hacen pasar los productos de combustión por el interior del tubo calentándolo hasta alcanzar una determinada temperatura para transferir calor por radiación a los procesos.

Sistema de control. Para obtener un óptimo funcionamiento del sistema de combustión se utilizaron los instrumentos adecuados de control para garantizar: la cantidad adecuada de aire de combustión y eyección, la inyección del combustible y la ignición para cada ciclo en un determinado tiempo. Este sistema cuenta con un sistema de seguridad, el cual permite detectar si existe combustión por medio de detectores de llama, en caso contrario suspende el suministro de combustible. Para controlar la temperatura de proceso, este controlador recibe la señal de una termocupla y acciona las electroválvulas abriéndolas o cerrándolas si la temperatura es inferior o superior a la programada respectivamente.

Sistema de eyección. Utiliza parte del aire impulsado por el ventilador para evacuar los gases de combustión ayudando a vencer la resistencia al flujo producida por el lecho regenerativo. Dada las diferencias en las propiedades físicas de una y otra corriente, la cantidad de movimiento de la corriente de los

gases es pequeña comparada con la del aire. El aire se suministra a presión en una boquilla de tipo convergente generando el efecto "Venturi" donde se alcanzan niveles críticos de velocidad que producen un vacío para arrastrar los humos a través del lecho regenerativo y evacuar posteriormente hacia la atmósfera.

3. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Parámetros básicos de diseño del sistema. Las especificaciones técnicas para el diseño fueron las siguientes: potencia térmica 28 kw con base al poder calorífico inferior, potencia específica 160 kw/m² factores de aireación de 1.05 y 1.20, presión de suministro del gas de 115 mbar, tiempo de conmutación modo quemador y eyector 30 segundos, combustible utilizado gas natural.

Para la caracterización del prototipo se tuvieron en cuenta las siguientes variables respuesta: diagnóstico de la combustión, temperatura y caída de presión en el lecho regenerativo, temperatura de precalentamiento del aire de combustión, distribución de temperatura superficial en el tubo radiante y eficiencia de radiación.

Diagnóstico de la combustión. Con un analizador de gases tipo infrarrojo no dispersivo marca Maihak se monitorearon los productos de combustión, tomando lecturas para O₂, CO, CO₂ y CH₄ buscando caracterizar el sistema para trabajar con dos factores de aireación 1.05 y 1.20, los cuales se midieron a partir de la composición de O₂ y CO₂ en humos secos y usando el software Combugas desarrollado por el grupo GASURE. La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos durante este monitoreo para un factor de aireación de 1.05 y la Tabla 2 los presenta para un factor de aireación de 1.20. El tiempo de conmutación del sistema para este ensayo fue de 99 segundos para garantizar el tiempo de lectura del analizador.

Como puede observarse la combustión en ambas cámaras para los dos factores de aireación utilizados fue óptima, con muy baja formación de CO y reducidas concentraciones de CH₄ sin quemar. En particular es conveniente señalar que con factor de aireación de 1.05 se garantiza una

óptima combustión, lo cual es conveniente en este tipo de sistemas porque a menor exceso de aire se aumenta la eficiencia de radiación.

Tabla 1. Ensayo de emisiones 28 kW y n = 1.05

Table 1. Emissions test 28 kW y n = 1.05

rpm del ventilador:	1668	Humedad relativa %:	74,1	Presión atmosférica (mbar):	852							
Tiempo de ciclo (seg):	99	Presión de suministro (mbar):	115	Temperatura atmosférica °C:	19							
Cámara de combustión 1												
Cámara de combustión 2												
MEDICIÓN	P_T	n	CO₂	CO	O₂	CH₄	P_T	n	CO₂	CO	O₂	CH₄
Nº	kw		%	%	%	%	kw		%	%	%	%
1	28,50	1,04	11,20	<100ppm	0,96	0,16	27,50	1,07	11,00	<100ppm	1,40	0,17
2	27,80	1,06	11,00	<100ppm	1,38	0,17	27,50	1,06	11,10	<100ppm	1,32	0,15
3	28,20	1,06	11,10	<100ppm	1,30	0,19	27,80	1,03	11,20	<100ppm	0,86	0,16
Promedio	28,17	1,05	11,10	<100ppm	1,21	0,17	27,60	1,05	11,10	<100ppm	1,19	0,16

Tabla 2. Ensayo de emisiones 28 kW y n = 1.20

Table 2. Emissions test 28 kW y n = 1.20

rpm del ventilador:	1700	Humedad relativa %:	63,4	Presión atmosférica (mbar):	850							
Tiempo de ciclo (seg):	99	Presión de suministro (mbar):	115	Temperatura atmosférica °C:	23							
Cámara de combustión 1												
Cámara de combustión 2												
MEDICIÓN	P_T	n	CO₂	CO	O₂	CH₄	P_T	n	CO₂	CO	O₂	CH₄
Nº	kw		%	%	%	%	kw		%	%	%	%
1	28,50	1,20	11,86	<100ppm	3,96	0,19	27,50	1,20	11,80	<100ppm	3,96	0,20
2	27,80	1,24	11,82	<100ppm	4,60	0,17	27,50	1,25	11,30	<100ppm	4,40	0,20
3	28,20	1,22	11,84	<100ppm	4,30	0,19	27,80	1,22	11,50	<100ppm	4,20	0,20
Promedio	28,17	1,22	11,84	<100ppm	4,29	0,18	27,60	1,22	11,53	<100ppm	4,19	0,20

Comportamiento del lecho regenerativo. En el sistema se monitorearon las temperaturas de los humos y del aire de combustión antes y después de pasar por el lecho regenerativo respectivamente, el valor promedio de las mediciones se presentan en las Figuras 4 y 5 para los factores de aireación utilizados.

Estos parámetros permiten examinar el grado óptimo de operación de un sistema regenerativo de recuperación de calor.

Como puede observarse, temperaturas elevadas de precalentamiento del aire de combustión del

orden de 710 °C y 610 °C para factores de aireación de 1.05 y 1.20 respectivamente, fueron alcanzadas.

La efectividad de un regenerador se define como la relación entre la temperatura de precalentamiento del aire de combustión y la temperatura de los gases calientes a la entrada del regenerador. Los valores que se obtuvieron para este parámetro fueron de 0.9 y 0.8 para factores de aireación de 1.05 y 1.20 respectivamente, lográndose una importante recuperación de calor, particularmente cuando el exceso de aire se disminuyó, garantizándose

con ello incrementos en la eficiencia de combustión y radiación del sistema, como se mostrará mas adelante.

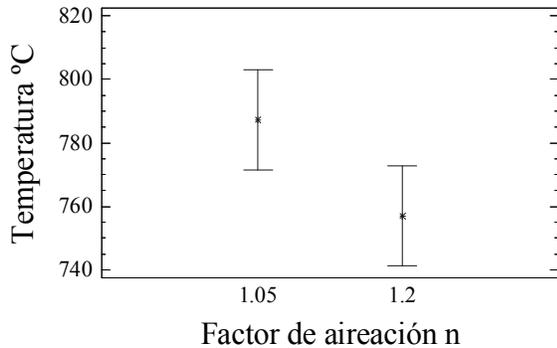


Figura 4. Temperatura de humos entrantes al lecho regenerativo

Figure 4. Gas temperature at the entrance of the regenerative bed

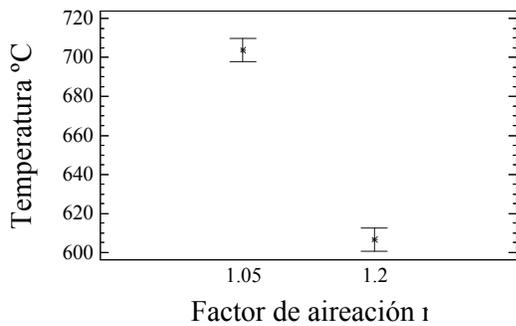


Figura 5. Temperatura de aire a la salida del lecho regenerativo

Figure 5. Air temperature at the exit of the regenerative bed

Temperatura superficial del tubo radiante. Para la potencia nominal y los dos factores de aireación especificados, se monitorearon con un termómetro infrarrojo marca SENSYCON, las temperaturas a lo largo de la superficie del tubo radiante, para las dos cámaras de combustión en operación alternando cada 30 segundos, los resultados se muestran en las Figuras 6 y 7.

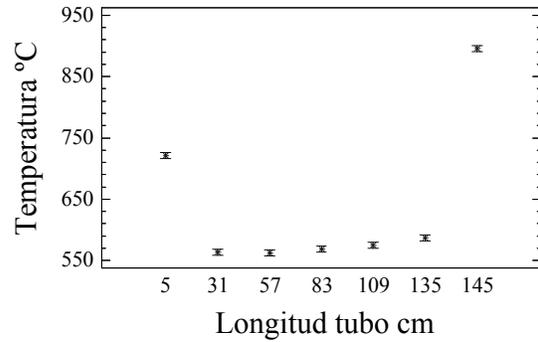
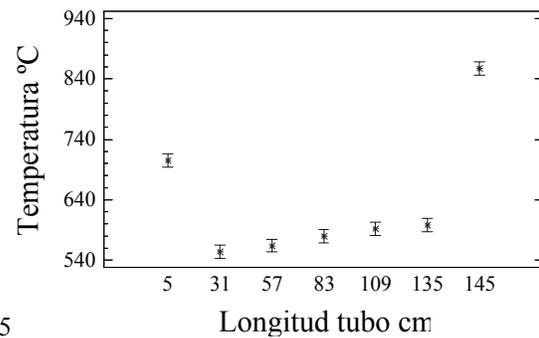


Figura 6. Temperatura superficial tubo radiante, n = 1.05

Figure 6. Surface temperature of radiant tube, n =



1.05

Figura 10. Temperatura superficial tubo radiante, n = 1.20

Figure 10. Surface temperature of radiant tube, n = 1.20

Exceptuando los extremos del tubo, se observa que en un largo tramo las variaciones de temperatura superficial son muy pequeñas, obteniéndose un valor promedio de 570 °C, con lo que se garantiza un patrón de radiación uniforme. La temperatura hacia los extremos del tubo es mayor debido a que los gases de combustión están mas calientes en esa zona, cuando una determinada cámara de combustión esta encendida. No se observan diferencias significativas del efecto del exceso de aire sobre la distribución longitudinal de la temperatura superficial, es probable que ello se explique porque si bien a menor factor de aireación los gases de combustión están mas calientes, cuando el factor de aireación es mayor la temperatura se hace menor pero la velocidad promedio del flujo es mayor, por lo que el efecto neto sobre la variación del coeficiente global de transferencia de calor sea significativa. Otro factor que afecta la distribución de temperatura es la conmutación del encendido de las cámaras de combustión, si el tiempo se reduce la distribución de temperatura tiende a ser mas uniforme.

Eficiencia de radiación. Definida como la cantidad de energía transmitida por radiación respecto a la energía proporcionada por el combustible, su medición se realizó de manera indirecta a partir de la medición de la eficiencia de combustión. Para este sistema de calentamiento, en la Figura 11 se presenta la comparación trabajando sin recuperación de calor S.R y la recuperación regenerativa de calor C.R.

Puede observarse que la recuperación regenerativa de calor tiene un efecto muy positivo sobre la eficiencia de radiación, lo cual genera una reducción considerable en el consumo de combustible y de las emisiones contaminantes, al salir los gases a la atmósfera a menor temperatura. De otro lado, se observa cuando el exceso de aire se disminuye la eficiencia de radiación se aumenta.

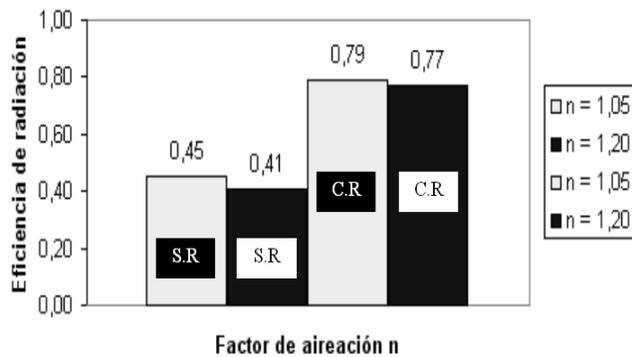


Figura 11. Comparación de la eficiencia de radiación con y sin regeneración

Figure 11. Comparison of the radiation efficiency with and without regeneration

4. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un sistema de combustión autoregenerativo radiante con una potencia nominal de 28 kw y factores de aireación de 1.05 y 1.20 el cual puede operar hasta una temperatura superficial promedio 570 °C con una eficiencia de radiación del 79 %, con un tiempo de conmutación de modo eyector a modo quemador de 30 segundos.
- El sistema autoregenerativo desarrollado, presenta óptimos parámetros de operación al alcanzar eficiencias de regeneración de 0.9 y 0.8 para factores de aireación de 1.05 y 1.20

respectivamente. Se demuestra con ello, que la utilización de materiales cerámicos y configuración geométrica esférica, se constituyen en condiciones imprescindibles para lograr sistemas autoregenerativos de alta efectividad y compactos.

- Las variables principales para el diseño y operación óptima de este sistema de calentamiento son: el tiempo de duración del ciclo, las propiedades del material regenerativo, la potencia térmica, el factor de aireación, la temperatura del proceso a calentar y la temperatura superficial límite del emisor.
- La calidad de los productos se ve notoriamente mejorada con la utilización de la radiación como mecanismo para su calentamiento, gracias a no existir contacto directo entre los productos de combustión y la carga.
- Con esta tecnología de calentamiento se reducen notablemente los tiempos de calentamiento y se cuenta con un rápido arranque, en minutos desde frío y hasta la temperatura de operación.
- La aplicación de este sistema térmico se enfoca a procesos de alta temperatura por la relación existente entre la cantidad de energía radiada y la temperatura superficial del tubo radiante.
- El diseño, construcción y optimización de un sistema de combustión autoregenerativo y radiante, requiere del manejo de los siguientes conocimientos:
 - Recuperación y transferencia de calor en sistemas regenerativos.
 - Sistemas de combustión con llama de difusión.
 - Parámetros característicos de un tubo radiante.
 - Instrumentación y control automático.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan sus más sinceros agradecimientos al Comité para el Desarrollo de la Investigación de la Vicerrectoría de Investigación y la Oficina de Gestión Tecnológica de la Vicerrectoría de Extensión, quienes con recursos del Fondo de Investigación

Aplicada, financiaron el proyecto “Optimización de un Sistema de Combustión Autoregenerativo y radiante”, siendo los resultados presentados parte de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BAUKAL CHARLES, Jr. Heat transfer in industrial combustion. CRC Press Boca Raton New York. 2000.
- [2] SCHALLES, D.G “The nex generation of combustion technology for aluminium melting”. Bloom Engineering Company, Inc. 5460 Homing Road. Pittsburgh Pennsylvania.
- [3] Aplicaciones avanzadas del gas natural en procesos industriales de alta temperatura. Serie Tecnológico Energética. Serie A – I.
- [4] INCROPERA, FRANK P, DE UIT DAVID. P. Introduction to heat Transfer. John Wiley and Sons, Inc
- [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] FU, Xi, VISKANTA, Ri y GORE, JP. Combustion and heat transfer interaction in a pore scale refractory tube burner. Journal of Thermophysics and Heat Transfer. N° 12(2). 1998 p 164-171.
- [7] NEWBY JOHN N. Heat – performance heat recovery with regenerative burner. Iron Steel Engineer, abril 1987. p. 20 – 24.
- [8] LEONARDI, S.A y VISKANTA, Ri y GORE, JP. Radiation and thermal performance measurements of metal fiber burner. Journal of Quantitive Spectroscopy and Radiative Transfer. N° 73(2-5), 2002 p 491-501.
- [9] GETTING, M. The regenerative burner in the metal industry. Gas Warne International . Band 35. Heft5, Julio 1986 p. 292 – 296.
- [10] NICHOLS, H.H y BUSKIRK, VAN. A new concept in radiant tube desing aplicacion. Iron and Steel Engineer. 1963. N° 40(6) p. 135-138.
- [11] PEREZ, ANGEL Y ALONSO, JESUS MARIA. Radiación Infraroja y Ultravioleta. Mc Graw Hill, España. 1998.
- [12] ROMANO GREGORIG. Regeneradores. Cambiadores de calor. Enciclopedia de la Tecnología Química. Tomo II p. 256 – 263.
- [13] LONGAIRE, S. Using infrared to dry paper and its coating. Process Heating 4(2), p. 45 – 49, 1977.
- [14] TRILLEROS, VILLAVERDE y otros. Regeneradores de calor: Fundamentos de transporte de energía. Ingeniería Química. Vol 114. N° 158, mayo 1982 p. 181.
- [15] WUENNING J. Burners for flameless oxidation. Industrial Heating, noviembre 1995.