

Análisis de los parámetros para el diseño y optimización de un tubo radiante

Andrés Amell Arrieta, Henry Copete López, Juan Pablo Gómez*

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Apartado Aéreo 1226, Medellín, Colombia.

(Recibido el 10 de agosto de 2005. Aceptado el 15 de mayo de 2006)

Resumen

La necesidad de apropiar tendencias tecnológicas de última generación en equipos de combustión con aplicaciones en el sector productivo nacional, despierta el interés por estudiar los parámetros de diseño, optimización y caracterización de nuevos sistemas térmicos. En este artículo se presenta un método para el análisis de procesos de calentamiento con tubo radiante. El modelo se ha desarrollado planteando algunas hipótesis que ayudan a la caracterización de los parámetros más influyentes involucrados en su funcionamiento y tiene como objetivos servir de guía en la etapa de diseño en aplicaciones industriales y ser una herramienta adecuada para la selección de un sistema de combustión con tubo radiante.

----- *Palabras clave:* tubo radiante, combustión, radiación térmica, transferencia de calor, emisividad, temperatura.

Analysis of the relevant parameters for the design and optimization of a radiant tube

Abstract

The need for adopting the latest technological tendencies in combustion appliances, which have potential applications in the national industry, gives rise to an interest in studying the parameters of design, optimization and characterization of new thermal systems. A method for the analysis of heat transfer processes involving radiant tubes is presented in this article.

Some hypotheses used in the development of the model considered helpful for the characterization of the most influencing parameters involved in the model are presented. The model attempts to serve as a guide during the design phase in industrial applications, and to be an adequate tool for the selection of a combustion system with radiant tube.

----- *Key words:* radiant tube, combustion, thermal radiation, heat transfer, emissivity, temperature.

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+4+210 55 29, fax: +57+4+210 55 18, correo electrónico: anamell@udea.edu.co. (Andrés Amell Arrieta).

Introducción

Con la implementación del programa de masificación del gas natural en los sectores industrial, comercial y residencial en los últimos diez años, existe en Colombia la necesidad de desarrollar sistemas de combustión de alta eficiencia con repercusiones significativas en la productividad de los procesos y calidad de los productos, apropiando nuevas tendencias tecnológicas que permitan el diseño y optimización de los equipos de combustión en la pequeña y mediana empresa nacional.

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. 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.

Algunos procesos donde en el ámbito internacional se observa una fuerte penetración de los sistemas radiantes como fuente de calor, son los siguientes: secado en la industria textil, cuero, papel y pintura, fusión de materiales ferrosos y no ferrosos, tratamientos térmicos y la industria del vidrio.

Los materiales disponibles para el desarrollo de tubos radiantes son los aceros aleados con níquel-cromo y los cerámicos constituidos de carburo de silicio. Si bien con los aceros se alcanzan buenas propiedades emisivas, cuando experimentan cambios de temperatura se generan choques térmicos que afectan significativamente su vida útil [1]. Los materiales cerámicos poseen mejores propiedades emisivas y ante cambios de temperatura presentan una gran estabilidad; tienen el inconveniente que son muy frágiles en la presencia de esfuerzos mecánicos.

Para la apropiación de la tecnología del tubo radiante es conveniente conocer los parámetros

básicos para el diseño y optimización, de un sistema de calentamiento donde esta sea aplicada; con este propósito se realiza este artículo.

Naturaleza y características del calentamiento por radiación

La radiación térmica es una forma de transferencia de energía propagada por medio de ondas electromagnéticas, en determinada frecuencia y longitud de onda y donde no se requiere de ningún medio material para transferirla. Estas radiaciones se extienden dentro del conjunto del espectro electromagnético y están comprendidas entre 0,76 y 10 μm viajando a la velocidad de la luz y son relacionadas de la siguiente manera en función de la temperatura de superficie emisora [2]. Por la ley de desplazamiento de Wien.

$$\lambda \cdot T_s = 2,898 \quad (1)$$

Donde

λ : longitud de onda (μm).

T_s : temperatura superficial del tubo radiante (K).

Se conoce como cuerpo negro aquel que absorbe toda la radiación que le llega; es decir, totalmente opaco y con un factor de reflexión nulo para toda radiación en cualquier longitud de onda. También es el emisor ideal, $\epsilon = 1$ todo lo que absorbe lo emite y la radiación total es superior a la de cualquier otro cuerpo no negro a igual temperatura. Para el diseño de sistemas térmicos que utilizan este mecanismo de transferencia de calor se admite que los cuerpos se comporten como cuerpos grises, $\epsilon < 1$ dado que no es posible obtener materiales que se comporten totalmente como un cuerpo negro y una buena aproximación es la utilización de quemadores con tubo radiante de alta emisividad.

La potencia radiada por el emisor hacia todo el espacio circundante varía proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura superficial y de la emisividad del material; se calcula por la ley de radiación:

$$PR = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T_s^4 \quad (2)$$

Donde

P_R : potencia radiada por la superficie emisora (kw).

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($w/m^2.K^4$).

ϵ : emisividad del tubo radiante.

A : área superficial del tubo radiante (m^2).

En esta fórmula se deduce de forma evidente que la energía radiada en la superficie aumenta de forma muy significativa con la temperatura. Esto explica cómo es posible, con un tubo radiante a alta temperatura, radiar la misma energía que un sistema de calentamiento convectivo convencional operando a menor temperatura [3, 4].

Presenta una mayor densidad de potencia, una baja inercia térmica que caracteriza su rapidez de calentamiento y enfriamiento, una elevada adaptabilidad puesto que la energía radiada puede ser concentrada, localizada y dirigida de forma análoga a la luz y genera beneficios significativos en la calidad del producto terminado.

Esta tecnología de calentamiento es especialmente interesante para tratar productos de pequeño espesor y que puedan ser irradiados sobre casi todas sus superficies. Se utiliza actualmente en operaciones de secado, cocción, polimerización de revestimientos, deshumidificación de productos, tratamientos térmicos a diferentes temperaturas, etc. [2].

La figura 1 muestra esquemáticamente la configuración de un tubo radiante de carburo de silicio de 38 mm de diámetro, 3 mm de espesor y 1,5 m de largo acoplado a una cámara de combustión y en el cual se han desarrollado estudios de caracterización en laboratorio.

Existen muchas configuraciones para implementar un sistema de combustión con tubo radiante, pero generalmente los componentes principales son:

- Un circuito para el suministro y regulación del combustible gaseoso.

- Un ventilador que suministra el aire de combustión y garantiza una cabeza de presión para la circulación de los productos de combustión al interior del tubo radiante.
- Una cámara de combustión donde se realiza la combustión y se generan los gases para calentar principalmente por convección la superficie interna del tubo radiante.
- Un tubo radiante que debido a la transferencia de calor desde los gases de combustión se calienta su superficie externa, para transferir calor por radiación debido a su alta emisividad.
- Un sistema de ignición y control de llama, para iniciar la combustión y garantizar la seguridad detectando la llama durante el proceso de combustión.

Parámetros para el diseño y caracterización de un tubo radiante

Para diseñar y optimizar un sistema térmico que aplique esta tecnología, se requiere de un análisis detallado de los siguientes parámetros [5, 6].

- La potencia térmica P_T necesaria para compensar las pérdidas de calor, irreversibilidades y la potencia radiada al receptor. Es suministrada por la energía disponible en el combustible gaseoso y depende de su poder calorífico.
- Factor de aireación n , relación entre las cantidades de aire y combustible en el proceso de combustión comparadas con la relación estequiométrica.
- Propiedades del tubo radiante: material, emisividad, geometría y temperatura máxima de operación.
- Potencia radiada P_R o energía transmitida desde la superficie del tubo a la superficie del producto, es función de las temperaturas.
- Eficiencia de radiación η_r , definida como la cantidad de energía transmitida por radiación respecto a la energía proporcionada por el combustible.

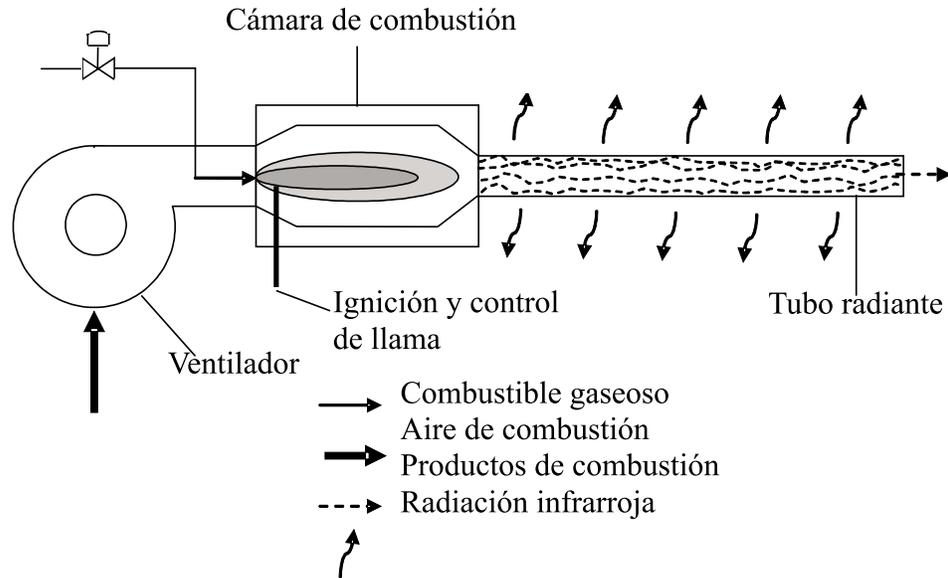


Figura 1 Quemador de tubo radiante

- En los procesos en los que se involucre la radiación como fuente de calor principal, es de alta importancia la determinación de la absorbancia (α) de la carga, y de ser posible, pensar en su máximo valor alcanzable, para llevar a cabo así un diseño optimizado desde un comienzo.
- Factor de forma F , relaciona la cantidad de energía realmente interceptada por el receptor respecto a la energía emitida por el emisor, depende de la geometría de construcción del sistema.
- Temperatura superficial T_s , la condiciona la calidad del material a emplear para la fabricación del tubo y de su valor depende la cantidad de energía radiada.
- Temperatura del proceso T_p es la temperatura conseguida por el producto a calentar, depende de varios factores como la cantidad de energía recibida, absorbancia, calores específicos, conductividad térmica, entre otros.

Realizando un balance de energía al sistema, con una potencia térmica suministrada por el aporte calórico resultante de la combustión del gas, las

pérdidas de calor en los productos de la combustión y asumiendo pérdidas por conducción nulas, el flujo neto de potencia radiada queda definido como:

$$\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot F (T_s^4 - T_p^4) = P_T - \dot{m}_h \cdot C_{ph} \cdot T_h \quad (3)$$

Con

P_T : potencia térmica suministrada por el combustible (kw).

\dot{m}_h : Flujo másico de productos de combustión (kg/s).

C_{ph} : Calor específico de los productos de combustión (kJ/kg.K).

T_h : temperatura de los productos de combustión a la salida del proceso (K).

F : Factor de forma entre el emisor y receptor.

T_p : Temperatura del receptor (K).

El flujo másico de los productos de combustión puede ser expresado en función del flujo másico de combustible, la relación estequiométrica de aire combustible y del factor de aireación, esto es:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_g \cdot (n \cdot A/C_{st} + 1) \quad (4)$$

$$T_h \approx T_s \quad (6)$$

Donde:

A/C_{st} : Relación aire combustible estequiométrica.

\dot{m}_g : Flujo másico de gas (kg/s).

La eficiencia de radiación se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia térmica, para la cual se obtiene la siguiente expresión:

$$\eta_R = \frac{P_T - \dot{m}_H \cdot C_{ph} \cdot T_h}{P_T} \quad (5)$$

Para caracterizar el funcionamiento de un tubo radiante ideal se emplean algunas hipótesis como que el intercambio calórico entre los gases de combustión y la superficie es perfecto, entonces la temperatura de humos tiende a ser la temperatura superficial del tubo.

Además se supone el tubo radiante como cuerpo negro $\varepsilon = 1$ y el factor de forma en su máximo valor posible $F = 1$.

La potencia específica se define como la relación entre la potencia térmica del sistema y el área superficial del tubo radiante, obteniéndose la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{P_T}{A} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y (7), las hipótesis planteadas anteriormente y considerando como combustible gaseoso metano puro, se obtienen las relaciones entre los parámetros básicos que caracterizan el comportamiento de un tubo radiante, las cuales se muestran en las figuras 2, 3, 4 y 5; son validas cuando no se introducen sistemas de recuperación de calor.

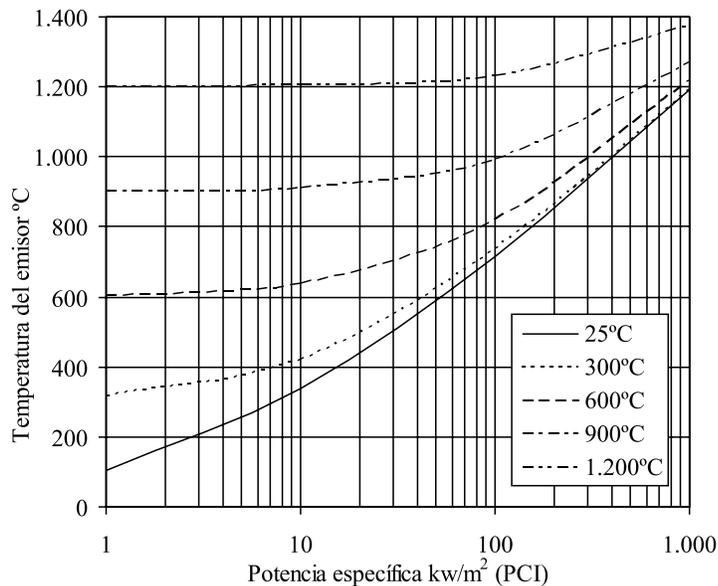


Figura 2 Temperatura del emisor de un tubo radiante ideal en función de la potencia específica para diferentes temperaturas del ambiente (relación estequiométrica)

La figura 2 muestra las variaciones de la temperatura superficial del tubo en función de la potencia específica con base al poder calorífico inferior del combus-

tible, para diferentes temperaturas del receptor y un factor de aireación estequiométrico. De esta figura se observan los siguientes comportamientos:

- A mayor diferencia entre la temperatura del emisor y la temperatura del receptor se requiere de mayor potencia específica.
- A medida que la temperatura del proceso es mayor, el incremento de la temperatura superficial con la potencia específica es más leve.

Estas tendencias se explican porque a mayor diferencia de temperatura entre emisor y receptor, las irreversibilidades termodinámicas en la transferencia de calor se incrementan y viceversa, como también a que el calor intercambiado por radiación depende de la temperatura a la cuarta potencia, tanto del emisor como del receptor.

En la figura 3 se presentan las variaciones de la eficiencia de radiación en función de la potencia específica para diferentes temperaturas del receptor y el factor de aireación estequiométrica. Al respecto se observan las siguientes tendencias:

- Dada una potencia específica, el aumento de la temperatura del receptor disminuye la eficiencia de radiación. Esto se debe a que la energía radiada se disminuye, como resultado de la disminución de la diferencia de temperatura entre el emisor y el receptor, también puede ser explicado porque los gases de combustión salen ahora más calientes, generándose una mayor pérdida de calor sensible.
- Dada una temperatura del receptor, con menor potencia específica se alcanza una eficiencia de radiación mayor.
- A potencias específicas menores a 10 kw/m^2 , la eficiencia de radiación no presenta variaciones significativas, situación que se hace más evidente a medida que aumenta la temperatura del receptor.

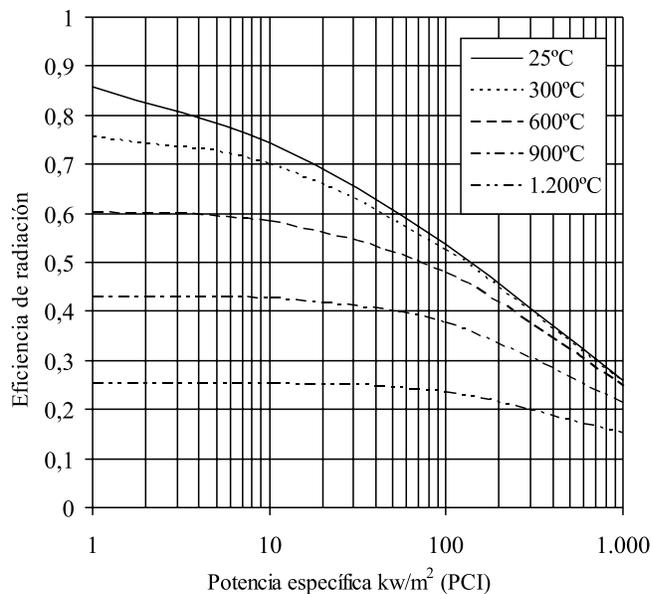


Figura 3 Eficiencia de radiación de un tubo radiante ideal en función de la potencia específica para diferentes temperaturas del ambiente (relación estequiométrica)

Las dos últimas tendencias se pueden explicar por lo siguiente: al aumentarse excesivamente la potencia específica, se incrementa el flujo másico de gases de combustión, con lo que el tiempo de residencia de estos al interior del tubo se disminuye y no se logra un incremento significativo

en la temperatura superficial, en consecuencia la energía radiada disminuye y por lo tanto la eficiencia de radiación también.

Para diferentes factores de aireación en el proceso de combustión, en la figura 4 se muestra las va-

riaciones de la temperatura superficial del tubo en diferentes escalas de potencia, dejando constante la temperatura del receptor en 25 °C. En esta se pueden observar las siguientes tendencias:

- Para una temperatura superficial dada, se requiere de mayor potencia específica, cuando se incrementa la tasa de aireación.
- Dada una potencia específica cuando se disminuya la tasa de aireación se alcanzará una mayor temperatura en el emisor alcanzándose su máximo cuando se encuentre en la relación estequiométrica, esta tendencia es más significativa cuando la potencia específica es mayor de 10 kw/m².

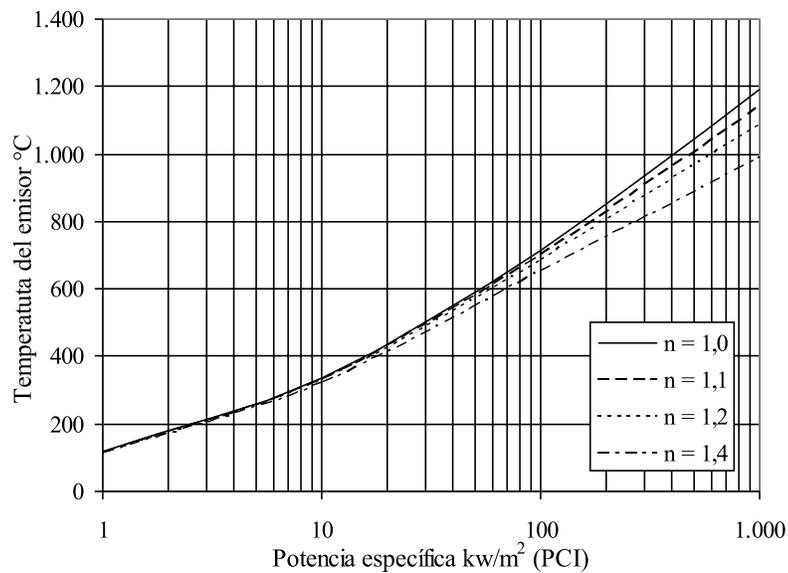


Figura 4 Temperatura del emisor en función de la potencia específica para diferentes factores de aireación, 25 °C la temperatura del receptor

Lo anterior se explica porque al aumentar la potencia específica, a una determinada tasa de aireación, la temperatura de los gases de combustión y el coeficiente global de transferencia de calor se incrementan, con lo que el flujo de calor hacia el tubo se aumenta y en consecuencia su temperatura superficial. De otro lado, la disminución del exceso de aire hasta la condición estequiométrica, trae como consecuencia incrementos en la temperatura de humos, aumentándose la temperatura superficial del tubo.

La figura 5 representa las variaciones de la eficiencia de radiación en función de la potencia específica para diferentes factores de aireación, permaneciendo constante la temperatura del receptor en 25 °C.

De la figura 5 se puede concluir entonces que dada una potencia específica, la eficiencia de radiación se incrementa, cuando se disminuye el factor de aireación, alcanzándose el máximo valor de eficiencia cuando se trabaja con relación estequiométrica.

En relación con el efecto combinado de algunas variables incidentes sobre la eficiencia de radiación y la temperatura superficial, se encuentra que:

- El aumento simultáneo del factor de aireación y la potencia específica, disminuye la eficiencia de radiación.
- Si simultáneamente se disminuye el exceso de aire y se aumenta la potencia específica,

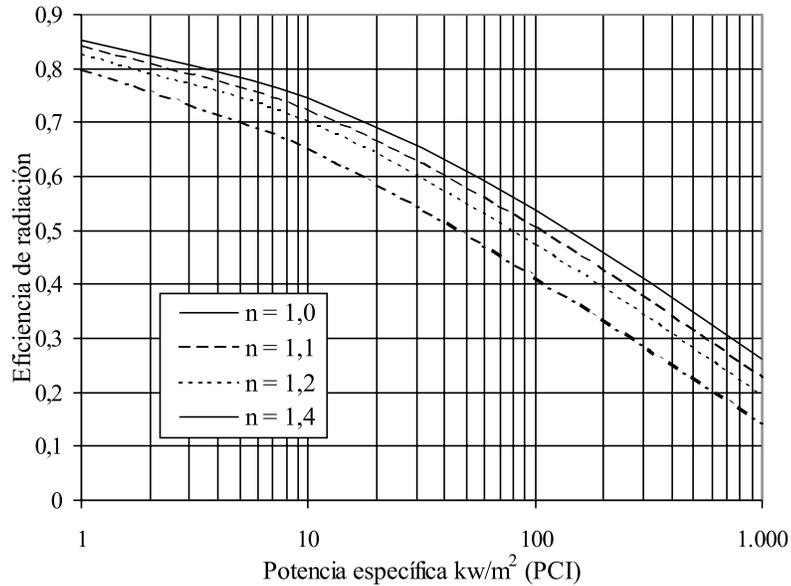


Figura 5 Eficiencia de radiación en función de la potencia específica para diferentes factores de aireación, 25 °C la temperatura del receptor

la temperatura superficial del tubo radiante se incrementa.

- Para aumentar la temperatura del proceso, se requiere incrementar la temperatura del emisor, lo cual se logra con el incremento simultáneo de la potencia específica y la disminución del exceso de aire hasta la relación estequiométrica.

Metodología de diseño de un sistema de calentamiento por tubo radiante

En el diseño de este tipo de sistemas se sugiere seguir aplicando el siguiente procedimiento [7]:

- Determinar la temperatura y energía necesaria para el calentamiento del material, conocer la frecuencia óptima de absorción de la radiación infrarroja, para poder determinar la temperatura ideal del emisor.
- Asumir la eficiencia de radiación deseada para el sistema a diseñar, lo cual conociendo también la energía necesaria para el calen-

tamiento del material, permite encontrar la potencia térmica necesaria.

- Asumir el factor de aireación (exceso de aire) con que debe operar el sistema de combustión que produce los gases de combustión para calentar el tubo radiante. Se recomienda diseñar el sistema de combustión para un exceso de aire no mayor al 10% con gas natural, dado que el incremento de este disminuye la eficiencia de radiación.
- Con la temperatura del emisor, el factor de aireación del sistema de combustión y la temperatura de calentamiento del receptor se determina la potencia específica utilizando un ábaco como el presentado en la figura 3. Debe tenerse en cuenta que este ábaco debe estar elaborado para la respectiva temperatura de calentamiento.
- Conocidas la potencia térmica, la potencia específica necesaria (kw/m^2) obtenida del paso anterior, se obtiene el área de la superficie radiante, con base a la cual y teniendo en cuenta la configuración geométrica del

recinto donde se realiza el calentamiento, se puede obtener el diámetro y longitud del tubo radiante requerido.

- El sistema de combustión puede ser un quemador de premezcla total o uno de llama de difusión, garantizando el factor de aireación deseado, la combustión completa del combustible y unas condiciones fluidodinámicas de los gases calientes, para garantizar un calentamiento uniforme del tubo radiante.

Conclusiones

- Los parámetros básicos a tener en cuenta en el diseño de un tubo radiante son: la temperatura del proceso, la potencia específica, el factor de aireación del sistema de combustión y la temperatura máxima que puede resistir el emisor.
- El parámetro que permite definir la condición óptima de operación de un tubo radiante es la eficiencia de radiación, la cual se aumenta a medida que el sistema de combustión tienda a operar con una mezcla estequiométrica de aire gas.
- Para temperaturas superficiales muy altas del emisor se tienen bajas eficiencias de radiación debida a las altas pérdidas de calor sensible en los humos cuando no se cuenta con recuperación de calor.
- 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.

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 Autorregenerativo y Radiante, siendo los resultados presentados parte de este proyecto.

Referencias

1. K. Yoon, D. Jeong. "Oxidation failure of radiant heater tube". *Engineering failure analysis*. Vol. 6. 1999. pp. 111-112.
2. A. Pérez, J. Alonso. *Radiación Infrarroja y Ultravioleta*. España. McGraw-Hill. 1998. pp. 113-140.
3. C. Baukal. *Heat transfer in industrial combustion*. New York. CRC Press Boca Raton. 2000. pp. 296-311.
4. F. Xi, R. Viskanta, J. Gore. "Combustion and heat transfer interaction in a pore scale refractory tube burner". *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. Vol. 12. 1998. pp. 164-171.
5. S. Leonardi, R. Viskanta, J. Gore. "Radiation and thermal performance measurements of metal fiber burner". *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. Vol. 73. 2002. pp. 491-501.
6. H. Nichols, V. Buskirk. "A new concept in radiant tube design application". *Iron and Steel Engineer*. Vol. 40. 1963. pp. 135-138.
7. A. Amell, H. Copete. *Optimización de un Sistema de Combustión Autorregenerativo y Radiante*. Documento impreso 2004.