

Método de evaluación del radio crítico de aislamiento y aplicación al horno de cubilote de la planta eco-eficiente de la Universidad de Antioquia

*Hector Daniel Mejía**, *Ricardo Aristizábal Sierra*** y *Claudia Silva****

(Recibido el 1º. de marzo de 2002)

Resumen

Se plantea, mediante la utilización de las ecuaciones básicas de transferencia de calor unidimensionales en estado estacionario, un método para la evaluación del radio crítico de aislamiento en un sistema cilíndrico y se presentan los resultados obtenidos en la determinación del radio crítico del horno de cubilote de la planta eco-eficiente de la Universidad de Antioquia.

----- *Palabras clave:* horno de cubilote, radio crítico, transferencia de calor.

Analitycal method for insulation critical radius evaluation and its application to a cupola furnace in the eco-efficient plant at the University of Antioquia

Abstract

This paper shows a method for evaluating the critical radius of a cylindrical system, based on well known heat transfer relations in one dimensional stationary state solution. The method developed is used to evaluate the critical radius of a cupola furnace in the eco-efficient plant at the University of Antioquia.

----- *Key words:* cupola furnace, critical radius, heat transfer.

* Grupo GIPIMME Universidad de Antioquia. Profesor titular. danme@jaibana.edu.co.

** Grupo GIPIMME Universidad de Antioquia. Estudiante Maestría en Ingeniería. calamaro70@hotmail.com.

*** Grupo GIPIMME Universidad de Antioquia. Estudiante Ingeniería Metalúrgica. clasilva13@hotmail.com.

Introducción

En los procesos que se realizan a temperaturas elevadas, el aislamiento térmico está relacionado directamente con las pérdidas de calor y por ende con la economía energética. Esta premisa lleva a incrementar el espesor de los materiales aislantes, sin considerar el hecho de que existe un espesor crítico que maximiza las pérdidas de calor. El estudio de este concepto para aislamientos cilíndricos es aplicable a una amplia gama de hornos de fundición, entre ellos se encuentran los cubilotes y los hornos de crisol, de uso generalizado en la industria de la fundición.

El grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales GIPIMME, en su línea de ecoeficiencia, ha realizado varias investigaciones para mejorar el rendimiento energético de los hornos de fundición, mediante la recuperación de calor a partir de los humos de chimenea y regeneradores de lecho empacado [1, 2]. En estos trabajos siempre está presente el tema del aislamiento térmico, que fue estudiado más detalladamente en un proyecto de pregrado en Ingeniería Metalúrgica [3].

Flujo de calor a través de un cilindro

Considérese un cilindro como el de la figura 1, de radio exterior r_2 , radio interno r_0 y longitud l , la temperatura en la pared exterior es T_2 , la temperatura en la pared interna es T_0 , los alrededores se encuentran a temperatura ambiente T_a . La conductividad térmica promedio del material del cilindro es k , el coeficiente de convección de la pared del cilindro es h_c , y la emisividad del material es ϵ . Se considera flujo radial y condiciones isotrópicas en la sección analizada. Los flujos de calor para este cilindro se definen de la siguiente manera, en el estado estable:

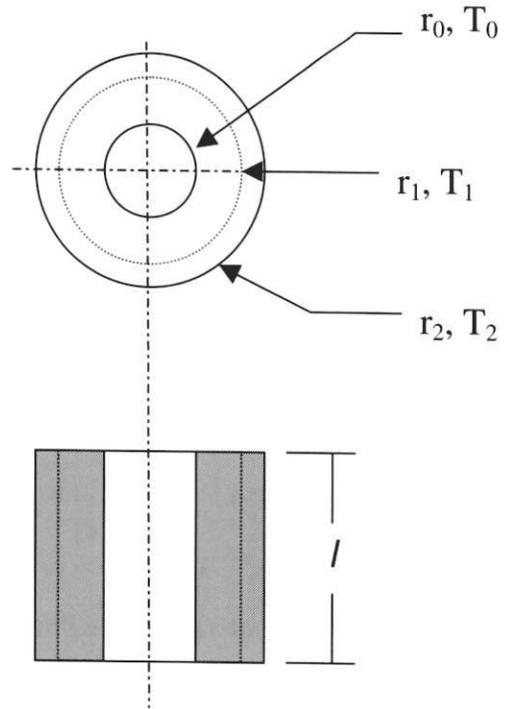


Figura 1. Cilindro hueco

Donde:

l : Longitud del cilindro.

T_0 : Temperatura en la pared interior del cilindro.

T_2 : Temperatura en la pared exterior del cilindro.

T_1 : Temperatura en un radio intermedio entre r_0 y r_2 .

r_0 : Radio interno del cilindro.

r_2 : Radio exterior del cilindro.

r_1 : Radio intermedio entre r_0 y r_2 .

Conducción

La conducción está dada por la ley de Fourier.

$$Q_k = \frac{2\pi l k (T_0 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right)} \quad (1)$$

Donde:

k : Conductividad térmica promedio del material.

Q_k : Flujo de calor por conducción.

La resistencia térmica para este flujo de calor es:

$$R_k = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right)}{2\pi kl} \quad (2)$$

Donde:

R_k : Resistencia térmica para el flujo de calor por conducción.

Convección

Para el área exterior.

$$Q_h = 2\pi r_2 l h_c (T_2 - T_a) \quad (3)$$

Donde:

h_c : Coeficiente para el flujo de calor por convección.

T_a : Temperatura ambiente.

Q_h : Flujo de calor por convección.

Radiación

La radiación se calcula con la ley de Steffan-Boltzmann.

$$Q_r = \sigma \epsilon A (T_2^4 - T_a^4)$$

Donde:

A : Área externa del cilindro.

σ : Constante de Boltzmann.

ϵ : Emisividad del material.

Q_r : Flujo de calor por radiación.

Esta relación puede llevarse a una expresión lineal:

$$Q_r = 2\pi r_2 l h_r (T_2 - T_a) \quad (4)$$

Donde:

h_r : Coeficiente lineal para flujo de calor por radiación.

h_r toma un valor de:

$$h_r = \sigma \epsilon (T_2 + T_a)(T_2^2 + T_a^2)$$

La ecuación (4) puede utilizarse con un porcentaje de error dado por la ecuación (5) [6]:

$$\%E = \frac{10^2 (T_2 - T_a)^2}{(2T_M)^2} \quad (5)$$

Donde T_M es:

$$T_M = \frac{T_2 + T_a}{2}$$

Además el efecto combinado de la radiación y la convección puede expresarse como:

$$Q_h + Q_r = 2\pi r_2 l (T_2 - T_a)(h_c + h_r) \quad (6)$$

Y la resistencia térmica será:

$$R = \frac{l}{A(h_c + h_r)} \quad (7)$$

Donde:

R : Resistencia térmica al flujo de calor combinado por radiación y convección.

El flujo de calor planteado como resistencias térmicas para todo el sistema del cilindro es:

$$Q_{total} = \frac{(T_2 - T_a)}{\sum R_i} \quad (8)$$

$$Q_{total} = \frac{(T_2 - T_a)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right)}{2\pi kl} + \frac{l}{2\pi r_2 l (h_c + h_r)}}$$

Si derivamos esta expresión con respecto al radio r_2 e igualamos a cero podemos hallar el máximo que corresponde al radio crítico, R_c :

$$\frac{dQ}{dr_2} = \frac{0 - (T_2 - T_a) \left[\frac{1}{2\pi k l r_2} - \frac{1}{2\pi l r_2^2 (h_c + h_r)} \right]}{\left[\frac{1}{2\pi k l} \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right) + \frac{1}{2\pi l r_2 (h_c + h_r)} \right]^2} = 0$$

Resolviendo:

$$R_c = \frac{k}{h_c + h_r} \quad (9)$$

El concepto de radio crítico

Es posible pensar que en un sistema con aislamiento, cualquier aumento en el espesor del refractario disminuirá las pérdidas de calor, pero al analizar con detenimiento las ecuaciones para el flujo de calor total a través del cilindro, se observa que el flujo de calor por conducción es inversamente proporcional al logaritmo natural del radio de éste; es decir, que las pérdidas por conducción disminuyen con el aumento del espesor en el refractario, mientras que para el efecto combinado de la radiación y la convección las pérdidas de calor son directamente proporcionales al radio exterior del cilindro; es decir que aumentan cuando se adiciona refractario.

Con base en lo anterior se puede pensar que existe un punto para el radio del cilindro en el cual las pérdidas de calor son máximas. Este punto se define como el radio crítico de aislamiento, y matemáticamente se expresa por la relación (9).

La figura 2 muestra la variación del flujo total de calor para diferentes radios exteriores.

El radio crítico de aislamiento es un parámetro que se tiene en cuenta, generalmente, en el diseño de sistemas donde es necesario controlar la temperatura de un material, para que conserve las características que lo hacen apto para el trabajo específico. Se define como el radio del aislante necesario para que la transferencia de calor a través de la pared sea máxima.

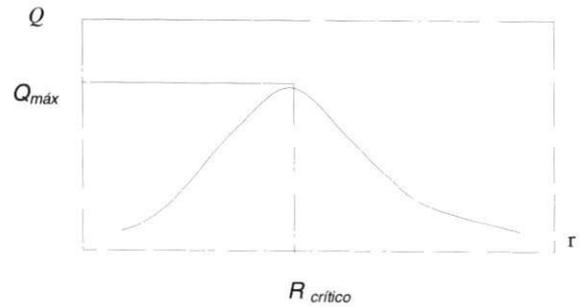


Figura 2 Gráfico de variación teórica del flujo de calor con respecto al radio exterior

Cuando un sistema está por debajo de este valor, cualquier aumento en el radio del aislante aumentará las pérdidas de calor, hasta llegar al radio crítico de aislamiento, a partir del cual las pérdidas empezarán a disminuir.

Por ejemplo, en sistemas de conducción eléctrica, donde la conductividad disminuye con el aumento de la temperatura, es necesario trabajar con espesores de material aislante en el radio crítico, con el fin de mantener la temperatura lo más baja posible.

El caso práctico inverso es el de aquellos sistemas en los cuales se desea minimizar las pérdidas de calor, por ejemplo en hornos cilíndricos de fundición.

La determinación del radio crítico de un sistema es un problema de ingeniería que implica la determinación de los coeficientes de la ecuación (9).

Para la mayoría de los sistemas es relativamente complejo y dispendioso determinar sobre todo el coeficiente de convección¹ y el coeficiente de radiación.² Sin embargo, mediante las ecuaciones básicas de transferencia de calor y algunas consideraciones, es posible calcular el radio crítico de aislamiento sin necesidad de determinar cada uno de los coeficientes de la ecuación (9), de la siguiente manera:

1 Ya que éste depende de la temperatura, del fluido comprendido en la convección, del área de transferencia de calor, etc.
 2 Ya que este depende de la temperatura, del acabado de la superficie, de las propiedades ópticas, etc.

Consideramos de nuevo el cilindro de la figura 1 y un radio cualquiera r_1 en donde la temperatura es T_1 . El flujo de calor por conducción entre r_1 y r_2 será:

$$Q_k = \frac{2\pi lk(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (10)$$

Y el efecto combinado de la radiación y la convección, continúa siendo el mismo (ecuación 5).

Se considera que en el estado estable no hay acumulación de calor en la pared del cilindro, por tanto todo el calor que entra por conducción se debe disipar por convección y radiación (figura 3).

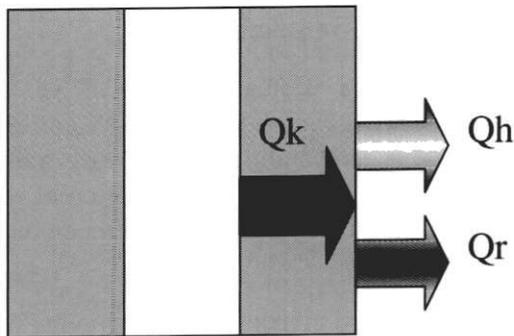


Figura 3 Esquema del flujo de calor

La afirmación anterior se puede expresar como:

$$Q_k = Q_h + Q_r \quad (11)$$

Reemplazando las ecuaciones (10) y (6) en la ecuación (11), se obtiene:

$$\frac{2\pi lk(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2\pi r_2 l(T_a - T_2)(h_c + h_r) \quad (12)$$

Y despejando:

$$\frac{K}{h_c + h_r} = \frac{r_2(T_2 - T_a)}{(T_1 - T_a)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \text{radio crítico} \quad (13)$$

Que es una expresión para el radio crítico que involucra solo la determinación de los gradientes

de temperatura entre el radio r_1 y el radio r_2 , y entre el radio r_2 y el ambiente.

Caso práctico

Con miras a la ejecución del proyecto de producción de hierro nodular se realizaron algunas reformas en el horno de cubilote de la planta eco-eficiente de la Universidad de Antioquia [4]. Entre ellas, se aumentó el espesor del refractario, con el fin de utilizar ladrillos de dimensiones comerciales. Estas reformas produjeron una disminución en los niveles de temperatura alcanzados en piqueta. Se pensó inicialmente en la posibilidad de que el aumento en el espesor del aislante podría haber puesto el sistema en la zona del radio crítico, aumentando las pérdidas de calor. Con el fin de descartar esta posibilidad se propuso la evaluación mediante la ecuación (13) del sistema del horno de cubilote.

La zona estudiada fue la zona de la cama de coque, en dos lugares:

1. Zona del crisol
2. Zona de la segunda fila de toberas

Para determinar las temperaturas se ubicaron termopares tipo "K" en el refractario y en la carcasa del horno como se ve en la figura 4. En la figura 5 se muestra un esquema del horno de cubilote de la Universidad de Antioquia, para más detalles se remite al lector a las referencias [10] y [11].

Con los datos obtenidos, se construyeron las gráficas de las figuras 6 y 7 de variación de temperatura contra tiempo para cada termopar y de diferencia de temperatura entre r_1 y r_2 (delta de temperatura) en cada zona.

Para la evaluación del radio crítico se tomaron los intervalos de tiempo de estabilización de las temperaturas y del delta de temperatura, indicio de que se ha llegado a una condición estacionaria de transferencia de calor.

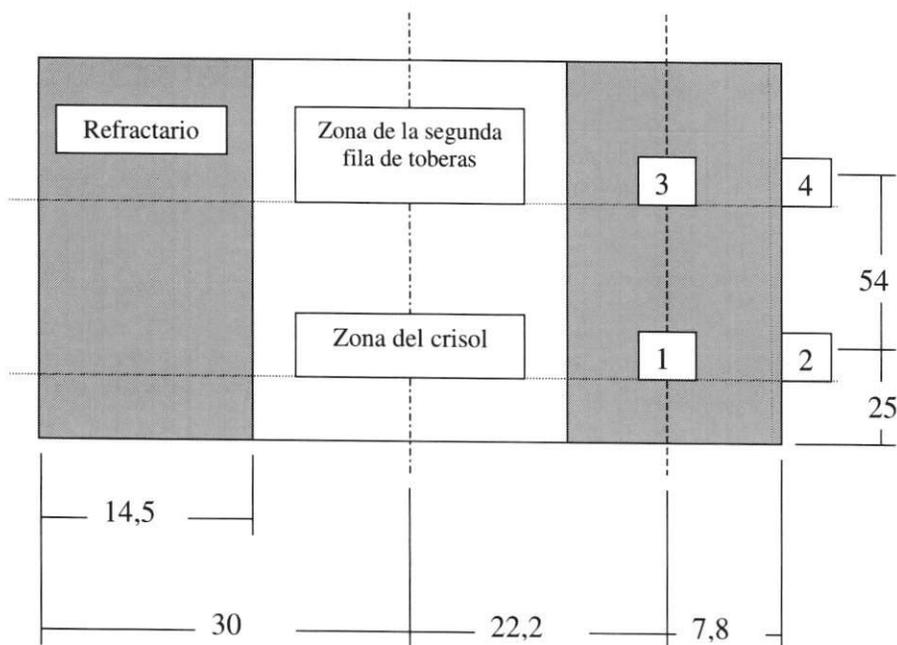


Figura 4 Esquema de ubicación de las termocuplas. Medidas en cm

Además se considera que la resistencia térmica de la carcasa metálica del horno es despreciable comparada con la del refractario.

Los tiempos de estabilización térmica para las zonas evaluadas, se tomaron de las gráficas de las figuras 6 y 7. Estos rangos corresponden al intervalo de tiempo entre 3,2 y 4,0 h, correspondiente a una zona de flujo de calor estacionario, luego de la cual ocurre un aumento en las temperaturas que se refleja en el aumento en las pendientes de las curvas, debido a que el desgaste en el refractario comienza a ser representativo.

Resultados

La tabla 1 muestra los resultados extraídos del análisis de las gráficas en cuanto a las temperaturas de evaluación y los valores calculados para el radio crítico bajo estas condiciones, mediante la ecuación (13). Los porcentajes de error promedio correspondientes para el flujo de calor por radiación, evaluados mediante la ecuación (5) son 9,3% para la zona del crisol y 7% para la zona

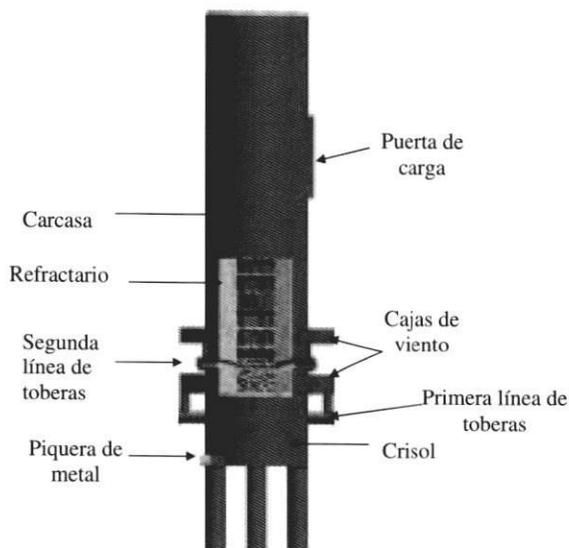
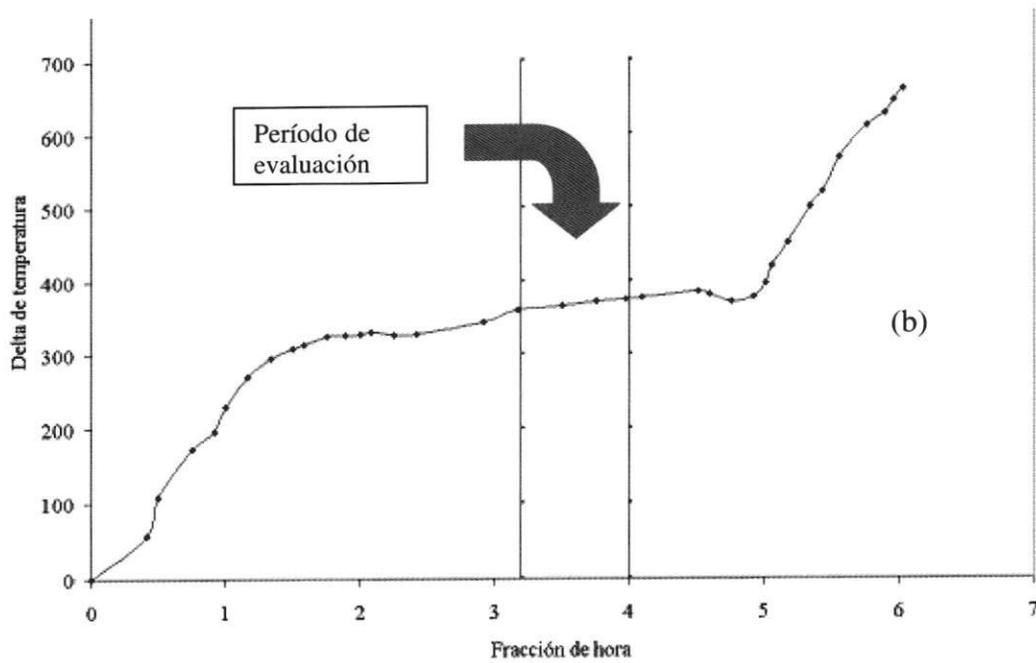
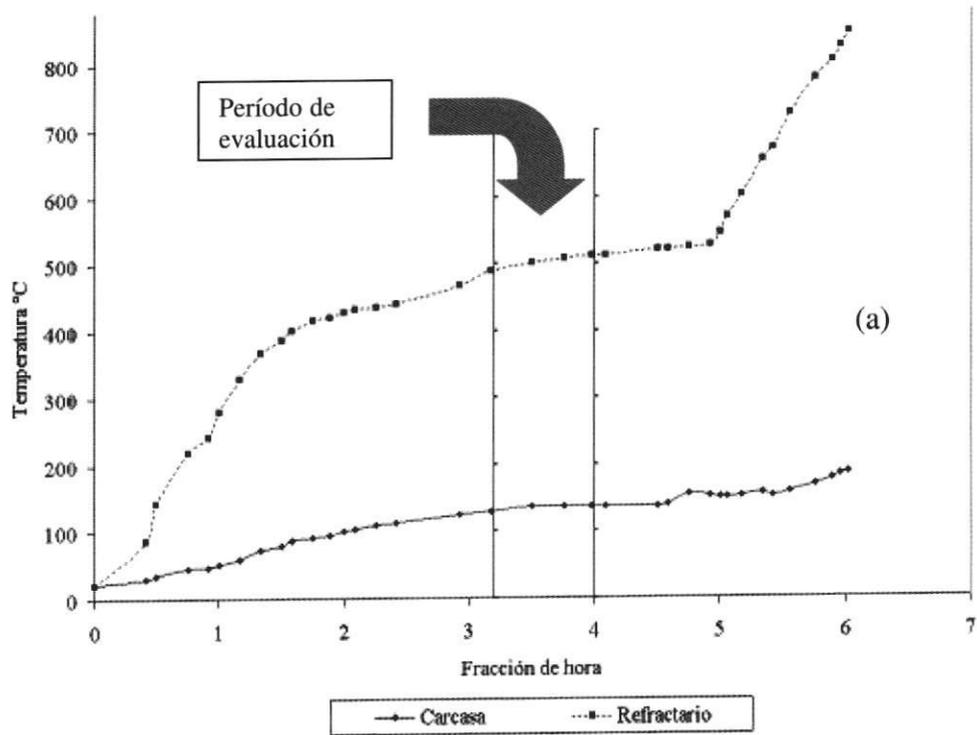


Figura 5 Esquema del horno de cubilote de la planta eco-eficiente de la Universidad de Antioquia

de la segunda fila de toberas. Los márgenes de error para el cálculo del radio crítico se calculan con la propagación del error en las medidas. La comparación de los resultados obtenidos en ambas zonas permite establecer otro porcentaje de



Figuras 6 a) Variación de las temperaturas con el tiempo en la zona del crisol. b) Variación del delta de temperatura en la zona del crisol

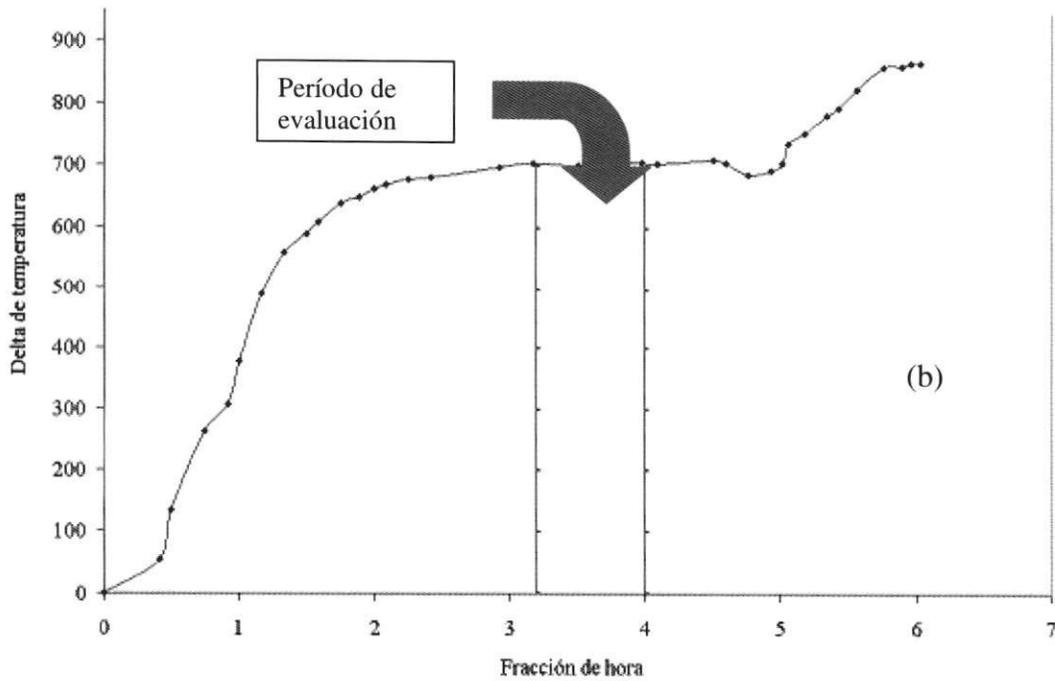
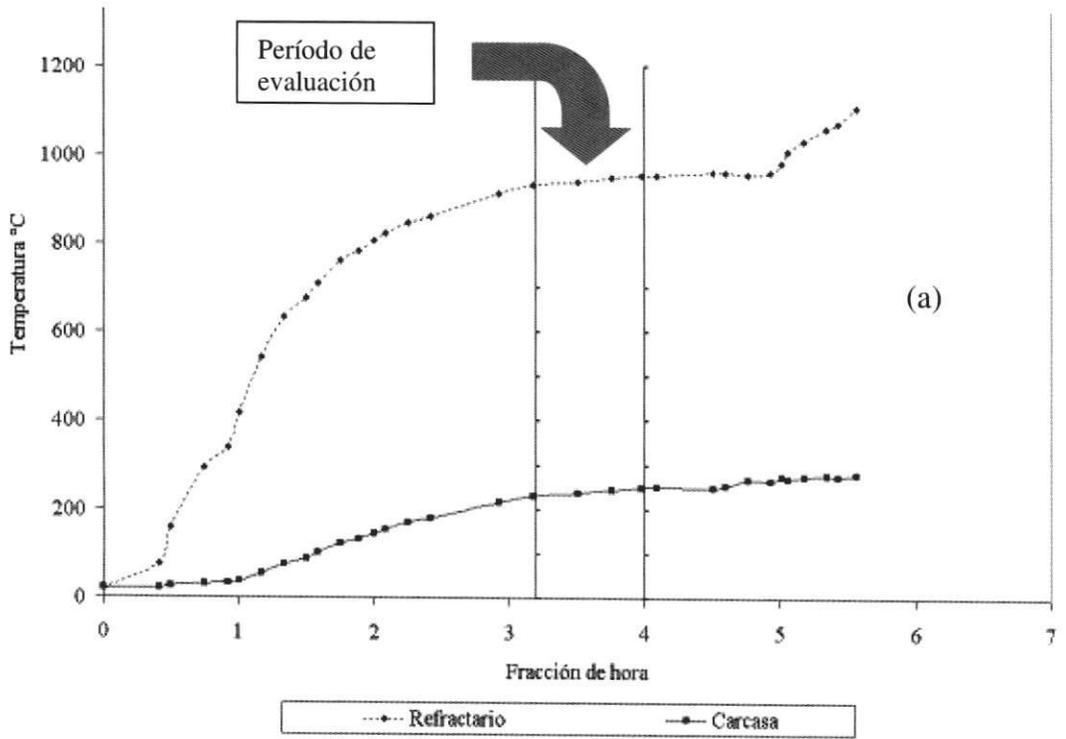


Figura 7 a) Variación de la temperatura con el tiempo en la zona de la segunda fila de toberas. b) Variación del delta de temperatura con el tiempo en la zona de la segunda fila de toberas

error sabiendo que las mediciones realizadas con termopares tipo k son más confiables a alta temperatura y por ende la medición en la zona de la segunda fila de toberas es más confiable. Calculando el porcentaje de error de esta forma, se obtiene:

$$\%E = \frac{2,77 - 2,66}{2,77} \times 100 = 3,25\%$$

Análisis

Las condiciones de trabajo del sistema del cubilote no permiten la estabilización completa de las temperaturas en la carcasa y en el refractario, debido a fluctuaciones en el interior del horno que afectan la combustión del coque y que son inevitables durante la marcha. Estas fluctuaciones pueden ser cambios en el caudal del soplo, cambios en la temperatura de entrada del aire, variaciones en la altura de la cama de coque, etc.

Se eligió la primera etapa de estabilización porque no presenta desgaste del refractario. Además los deltas de temperatura en estos tiempos son muy estables.

Conclusiones

Se comprobó que el radio del cubilote está muy por encima del radio crítico de aislamiento, por tanto las pérdidas de calor a través del refractario están bien controladas en cuanto a espesor de aislante. Sin embargo la comparación de la cantidad de refractario con respecto al horno anterior demuestra que es necesario un tiempo de estabilización mayor porque existe más masa para calentar. Es decir que el cambio resulta favorable en la condición estable de operación, pero desfavorable en el estado transitorio inicial. Se recomienda aumentar el tiempo de calentamiento de la cama de coque para comenzar la operación en una condición más próxima a la térmicamente estable.

El método de evaluación del radio crítico es muy sencillo y puede utilizarse en otros sistemas como hornos de crisol (en los cuales no hay un desgaste significativo del refractario) y en general en sistemas donde se tengan dudas sobre el espesor de refractario adecuado y se deseen evaluar las pérdidas de calor.

Tabla 1 Resultados

| Zona | T_1 (°C) | T_2 (°C) | Delta | T_a (°C) | Radio crítico (cm) |
|--------------|------------|------------|-------|------------|--------------------|
| Crisol | 490 | 130,0 | 360,0 | 24,5 | 2,65 ± 0,06 |
| | 502 | 137,0 | 365,0 | 24,5 | 2,78 ± 0,06 |
| | 508 | 137,0 | 371,0 | 27,0 | 2,68 ± 0,06 |
| | 512 | 138,0 | 374,0 | 27,0 | 2,68 ± 0,06 |
| | 513 | 137,0 | 376,0 | 27,0 | 2,64 ± 0,06 |
| Promedio | 505 | 135,8 | 369,2 | 26,0 | 2,68 ± 0,06 |
| Segunda fila | 933 | 229,0 | 704,0 | 24,5 | 2,62 ± 0,08 |
| | 940 | 238,0 | 702,0 | 24,5 | 2,75 ± 0,08 |
| | 950 | 245,0 | 705,0 | 27,0 | 2,79 ± 0,08 |
| | 955 | 248,0 | 707,0 | 27,0 | 2,82 ± 0,08 |
| | 955 | 251,0 | 704,0 | 27,0 | 2,87 ± 0,08 |
| Promedio | 946,6 | 242,2 | 704,4 | 26,0 | 2,77 ± 0,08 |

Nota. T_1 : Temperatura en el refractario. T_2 : Temperatura en la carcasa. T_a : Temperatura ambiente.

Tabla 2 Nomenclatura y unidades

| Variable | Sistema | |
|--|--|----------------------------------|
| | Inglés | s.i. |
| Q_c . Flujo de calor por conducción | BTU/h | Watts |
| Q_h . Flujo de calor por convección | BTU/h | Watts |
| Q_r . Flujo de calor por radiación | BTU/h | Watts |
| k . Conductividad térmica | BTU/h.pie ² . F | Watts/m. K |
| h_c . Coeficiente de transferencia de calor por convección | BTU/h.pie ² . F | Watts/m ² . K |
| h_r . Coeficiente de transferencia de calor por radiación | BTU/h.pie ² . F | Watts/m ² . K |
| R_i . Resistencia térmica | Pie/h F BTU | K/Watts |
| ϵ . Emisividad | Adimensional | |
| σ . Constante de Boltzman | BTU/h.pie ² .R ⁴ | W/m ² .K ⁴ |
| r_i . Radio i. | Pies | Metros |
| T_i . Temperatura en el punto i. | °F | °C |

El mismo método puede ser utilizado para evaluar el coeficiente de convección en sistemas donde las pérdidas por radiación sean despreciables, mediante la determinación de la conductividad del material refractario y la ecuación (13).

Referencias bibliográficas

- Rivero, Pedro y Mejía, Héctor Daniel, *Optimización de la Planta Piloto Eco-eficiente en la Universidad de Antioquia*. Informe de proyecto Grupo DRAGÓN-Grupo GIPIMME. Universidad Nacional sede Medellín y Universidad de Antioquia. Medellín. Febrero, 2001.
- Mejía Álvarez, Ricardo; Rivero, Pedro; Mejía Arango, Héctor Daniel. "Propuesta de Número Adimensional para Optimización de Procesos Termomecánicos". *Revista Facultad de Ingeniería*. Junio, 2000 N° 20, pp. 48-55.
- Aristizábal, Ricardo. *Modelo matemático para la temperatura del metal en horno de cubilote de sople caliente*. Tesis de grado en Ingeniería Metalúrgica. Grupo GIPIMME, Universidad de Antioquia. Medellín. Agosto, 2001.
- Mejía, Héctor Daniel. *Producción de hierro nodular en cubilote eco-eficiente*. Informe de proyecto, Universidad de Antioquia, Grupo GIPIMME. Medellín, 2001.
- Kreith, Cornwell. *Transferencia de calor*. Primera edición. México. Editorial Limusa. 1981.
- Karlekar, B. *Transferencia de calor*. Segunda edición. México. Editorial McGraw-Hill. 1995.
- Kreith Franck. *Principles of heat transfer*. Second edition. Pennsylvania. International text book. 1965.
- Osizik, Necati. *Transferencia de calor*. Traducción de la primera edición. Bogotá. McGraw-Hill. 1979.
- AFS. *Cupola Handbook*. 6th Edition. U.S.A. AFS. 2000.
- Mejía, Héctor Daniel; Gómez, Álvaro. *Planta piloto Eco-eficiente para Horno de Cubilote*. Convenio Propel-Universidad de Antioquia. Medellín, 1996.
- Mejía, Héctor Daniel. "Horno de cubilote Eco-eficiente". *Revista Carta Metalúrgica*. No. 396. Medellín. Octubre, 1996.