

ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNOS DE ALTA TEMPERATURA

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ON HEAT TRANSFER IN HIGH TEMPERATURE FURNACES

Alex M. García Vergara, Yefferson López Zuluaga, Andrés A. Amell Arrieta

Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía | GASURE.
Calle 67 N° 53 - 108, Medellín, Colombia. +57 (4) 2198545.
E-mail: alexmgv@outlook.com, yefferson.lopez@udea.edu.co, andres.amell@udea.edu.co

Resumen: En este trabajo se evalúa mediante simulaciones CFD un horno de calentamiento con el objetivo de estudiar el efecto que tiene la presión atmosférica sobre la transferencia de calor hacia la carga. El sistema fue evaluado para las presiones del nivel del mar y de la ciudad de Bogotá. Los flujos máxicos de aire y combustible fueron corregidos para mantener la potencia y el factor de aireación igual para los dos casos, debido a que estos varían con la presión. Se encontró que el calentamiento de la carga se afectó poco por el cambio en la presión, sin embargo, la forma en que fluye el calor hacia la carga si varia, teniendo que la radiación de los gases aporta un 34% de la energía total que llega a la carga a una presión de 1 atm, mientras que a una presión de 0.74 atm, pasa a aportar un 24%.

Palabras clave: Hornos de calentamiento, transferencia de calor, radiación, presión atmosférica, dinámica de fluidos computacional (CFD).

Abstract: In this paper, a reheating furnace was evaluated by mean of CFD simulations in order to study the effect of atmospheric pressure on the heat transfer to the load. The system was evaluated for the pressures of the sea level and the city of Bogotá. The mass flow rate of air and fuel were corrected to keep the thermal input and the air/fuel ratio equal for both cases, due to the change of these parameters with the pressure. It was found that the heating of the load was little affected by the pressure change, however, the way in which the heat flows through the load is affected, taking into account that the combustion gases transfer energy by radiation contributes 34% of the total energy that reaches the load at a pressure of 1 atm, while at a pressure of 0.74 atm, it passes to contribute 24%.

Keywords: Reheating furnaces, heat transfer, radiation, atmospheric pressure, computational fluid dynamics (CFD).

1. INTRODUCCIÓN

La energía térmica representa una parte importante de la demanda energética en Colombia. Pese a que en el país gran parte de la energía eléctrica se abastece con fuentes hidráulicas, el sector industrial es un gran consumidor de energía térmica proveniente de la combustión de combustibles fósiles (UPME, 2010). El sector

metal-mecánico se destaca por ser uno de los mayores consumidores de energía térmica dentro del sector industrial. Sus altos consumos se deben a los numerosos procesos de alta temperatura involucrados en la producción de piezas metálicas (Baukal Jr, 2000), por lo que estudiar los fenómenos involucrados en la operación de los hornos usados en estos procesos, resulta importante para poder realizar diseños que permitan una alta

eficiencia energética, bajas emisiones contaminantes y una mejor calidad de producción.

La presión atmosférica tiene un efecto significativo sobre varios aspectos del proceso de combustión. La velocidad de combustión laminar (S_L) es un parámetro característico del proceso de combustión, definido como la velocidad a la que se propaga el frente de llama hacia la mezcla de gases sin quemar. En la literatura se pueden encontrar varios trabajos en los que se estudia S_L a condiciones sub-atmosféricas. En estos se ha encontrado que el orden global de la reacción (n) es el parámetro responsable de la dependencia de S_L con la presión (P). Esta relación puede ser expresada como $S_L \sim (P)^\beta$, donde $\beta = (n/2)-1$ (Egolfopoulos y Law, 1991). Esto significa que la presión disminuye la velocidad de combustión laminar cuando el orden global de la reacción es $n < 2$ y lo contrario cuando es $n > 2$. El valor de n depende de la mezcla combustible-oxidante. (Egolfopoulos y Law, 1990) hicieron mediciones de S_L para mezclas CH_4 -aire a diferentes presiones. Para todas las mezclas estudiadas n fue menor a 2 por lo que S_L siempre disminuyó al aumentar la presión. El efecto de la presión fue mayor en el rango sub-atmosférico, obteniendo una disminución en el valor de S_L de 27% al pasar de 0.5 atm a 1 atm, para el caso estequiométrico. Por otro lado, (Burbano *et al.*, 2011) estudiaron mezclas $H_2/CO/N_2/CO_2$ -aire para las que S_L aumentó al aumentar la presión, excepto para mezclas pobres y muy ricas en las que el comportamiento fue contrario. La forma en que varía S_L con la presión tiene un efecto sobre la morfología de la llama. Como reporta (Amell, 2007) la altura del cono azul en una llama de premezcla de gas natural aumenta al disminuir la presión atmosférica, debido a que la velocidad de flujo crece más de lo que crece la velocidad de combustión. Para el caso de llamas no premezcladas, el trabajo de (Zeng *et al.*, 2013) muestra como para el caso de un jet de CH_4 en aire, la altura de la llama resultante es prácticamente independiente de la presión atmosférica, sin embargo, a menor presión la sección amarilla de la llama no premezclada disminuye y a su vez la radiación que esta emite, debido al efecto positivo de la presión sobre la formación de hollín.

En Colombia, como en otros países de Latinoamérica, algunas de las ciudades más importantes se encuentran localizadas a grandes alturas sobre el nivel del mar, como es el caso de Medellín a 1550 m.s.n.m o Bogotá a 2600 m.s.n.m. No obstante, la mayoría de los estudios y

desarrollos tecnológicos en el área de la combustión y calentamiento se hacen en centros de investigación ubicados en ciudades al nivel del mar; por lo que comúnmente no se consideran los efectos de variaciones en la presión atmosférica sobre su operación. En este trabajo se avalúa el efecto de la presión atmosférica sobre un horno de calentamiento, analizando la transferencia de calor hacia la carga. Se realizaron simulaciones CFD con las que se describe el proceso al interior del horno y se compararon los resultados correspondientes a la condición de presión de la ciudad de Bogotá con los resultados obtenidos al nivel del mar.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para este estudio, se tiene un horno de calentamiento de vigas caminantes, utilizado para el calentamiento de palanquillas en un proceso de templado. En la Fig. 1 se muestra un esquema del volumen al interior del horno, el cual se divide en dos zonas: una zona inicial donde se da el precalentamiento de las piezas (zona 1) y una zona donde las piezas se terminan de calentar hasta una temperatura alrededor de 1210 K (zona 2). La palanquilla (carga) tiene una longitud y espesor de 150 cm y 1.1 cm, respectivamente y se desplazan por el interior del horno mediante un movimiento intermitente de un paso cada 24 s a una velocidad media de 2.7 mm/s, correspondiente a una producción de 1.27 toneladas por hora (0.353 kg/s).

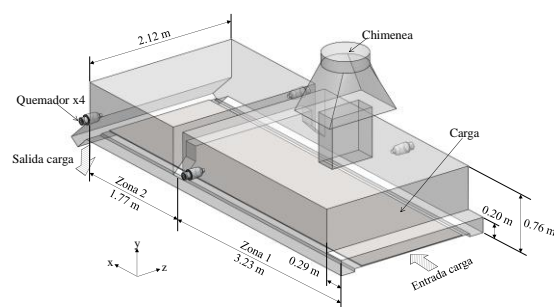


Fig. 1. Volumen interior del horno de calentamiento de vigas caminantes.

El horno opera con cuatro quemadores de alta velocidad marca Fives North American-Standard Tempest 4442 (Davies, 1972; fives north american, 2006), los cuales se encuentran en las caras laterales a una altura de 0.36 m de la base del horno y perpendiculares a la dirección de movimiento de la carga. Los cuatro quemadores están distribuidos en el horno de forma escalonada, dos en cada zona, a una distancia de la entrada de la carga de 1.82 m, 2.74 m, 3.88 m y 4.81 m.

El combustible utilizado es gas natural de Cusiana, cuya composición en volumen es: 82.8% CH₄, 10.0% C₂H₆, 3.6% C₃H₈, 1.2% >C₃, 1.9% CO₂ y 0.5% N₂. El poder calorífico superior del combustible a condiciones estándar es de 41153.0 kJ/m³ y el volumen de aire estequiométrico es de 10.45 m³_a/m³_f. Para las condiciones de carga descritas, el horno opera con una potencia total de 670 kW en base al PCS, distribuida en los cuatro quemadores. La potencia en la zona 1 es 57% de la potencia total y el restante corresponde a la zona 2. Los quemadores operan con un factor de aireación de 1.25.

Actualmente la chimenea del horno se encuentra cerrada, por cuestión de estabilidad de la combustión en los quemadores. Debido a esto, los gases de combustión salen del horno por las aperturas para la entrada y salida de la carga. Las paredes y el techo están aislados con un espesor de 24 cm de manta cerámica, mientras que el suelo tiene un espesor de 34 cm de ladrillo refractario. Las propiedades del material aislante se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del aislamiento a 1273 K

		Manta cerámica	Ladrillo refractario
Densidad	[kg/m ³]	128	2230
Calor específico	[J/kg K]	1130	960
Conductividad térmica	[W/m K]	0.25	1.66
Emisividad	[-]	0.68	0.75

El horno está instalado en la ciudad de Bogotá, Colombia, donde la temperatura ambiente y la presión atmosférica son de 297.15 K y 746.6 mbar, respectivamente.

3. MODELO NUMÉRICO

Para las simulaciones se utilizó el solucionador de doble precisión basado en la presión del software comercial ANSYS® - Fluent® versión 18.0. La mezcla de gases involucrada en el proceso se modela como un fluido Newtoniano, incompresible y que fluye en estado estable, por lo que su fluidodinámica se puede describir por las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con base al Reynolds (RANS). Los cambios en la densidad debido a la temperatura se tienen en cuenta siguiendo la ley de gases ideales. Para el acople presión-velocidad y para la interpolación de la presión se usan los algoritmos *Couple* y *PRESTO!*, respectivamente (ANSYS Inc., 2017). La turbulencia se modeló con el modelo k-ε realizable (Shih *et al.*, 1995) y para el cálculo del flujo en la región viscosa de la capa límite en la cercanía de

las paredes se usa el método *Enhanced Wall treatment* (EWT) (ANSYS Inc., 2017) en combinación con el modelo k-ε realizable, teniendo en cuenta los efectos térmicos. La combustión se modeló con el *Steady Diffusion Flamelet model* (Peters, 1984), usando el mecanismo cinético *UC San Diego* (University of California at San Diego, 2016). El calor específico de la mezcla de gases se calcula siguiendo la ley de mezclado, mientras que la viscosidad y la conductividad térmica se definieron como función de la temperatura usando dos polinomios de primer grado ajustados a partir de las propiedades de una composición de gases de combustión típica usando la teoría cinética de gases. La radiación se modeló con el *Discrete Ordinates model* (Raithby y Chui, 1990), junto con el *weighted-sum-of-grey-gases model* con los coeficientes de (Smith *et al.*, 1982) para el cálculo del coeficiente de absorción de los gases. Este conjunto de modelos han mostrado tener una muy buena capacidad para predecir el proceso de calentamiento en hornos de vigas caminantes (García y Amell, 2018; Han *et al.*, 2010; Prieler *et al.*, 2016).

Para modelar el movimiento y calentamiento de la carga al interior del horno se usó la estrategia propuesta por (Huang *et al.*, 2008), debido a su fácil implementación y su buena relación precisión/costo-computacional. Esta estrategia se basa en modelar la carga como una lámina continua que atraviesa el horno, por la cual fluye un fluido de muy alta viscosidad (10⁶ kg/m s) con las propiedades termo-físicas del material de la carga. Esta estrategia permite simular el calentamiento de la carga como un proceso estacionario. El material de la carga es acero de medio carbono (0.49C - 0.8Cr [wt-%]). El calor específico y la conductividad térmica del material se definieron en función de la temperatura, debido al efecto de ésta sobre estas propiedades, como se muestra en la Fig. 2. Para la emisividad de la superficie fue de 0.85, ya que este es el valor promedio alrededor del cual varía la emisividad del acero al cromo debido a la temperatura y la oxidación. (Touloukian y DeWitt, 1989)

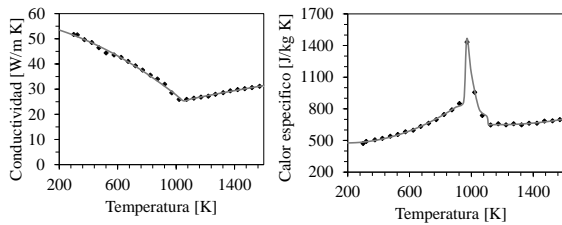


Fig. 2. Conductividad térmica y calor específico de la carga en función de la temperatura (British Iron and Steel Research Association, 1953).

Para considerar las pérdidas de energía a través de las paredes y el suelo del horno, estas se modelan mediante la ecuación de conducción en una dimensión, teniendo en cuenta el espesor de las paredes y las propiedades del material aislante (Tabla 1). Las paredes externas del horno tienen una emisividad de 0.5 y el coeficiente de transferencia de calor por convección natural se calculó mediante las correlaciones del número Nusselt propuestas por (Churchill y Chu, 1975; Lloyd y Moran, 1974).

3.1 Mallado

El mallado usado para realizar las simulaciones numéricas fue construido por medio del software Icem CFD, el cual se muestra en la Fig. 3. El dominio de interés para la simulación, comprende el volumen al interior del horno donde pueden fluir los gases de combustión, el volumen correspondiente a la carga y dos volúmenes de aire a la entrada y salida del horno. El mallado utilizado para las simulaciones tiene cerca de 990000 elementos, para el cual se hizo un análisis de independencia del mallado, comparando los resultados con los de otros dos mallados de 560000 y 1950000 elementos.

4. RESULTADOS

Los efectos de la presión atmosférica sobre la operación de un horno de calentamiento se pueden separar en dos tipos. El primero son los efectos sobre el desempeño de los sistemas auxiliares, es decir, los componentes que interviene en la operación del horno. Estos efectos se manifiestan antes de la entrada al horno. El segundo tipo corresponde a los efectos sobre la fluidodinámica, la combustión y la transferencia de calor al interior del horno.

Los componentes que se afectan por la presión atmosférica son: el ventilador que suministra el aire de combustión y el sistema de suministro de combustible. Para el caso del flujo de aire, un

ventilador que trabajando a un régimen de giro constante suministra el mismo caudal sin importar la presión atmosférica, no obstante, a menor presión menor densidad del aire y por lo tanto, menor flujo másico suministrado por el ventilador. Por otro lado, el flujo másico de combustible inyectado por una boquilla es función de la densidad del gas y la presión manométrica a la que se haga la inyección. A menor densidad del combustible debido a una disminución en la presión atmosférica se obtiene una disminución en el flujo másico inyectado por la boquilla y por lo tanto de la potencia suministrada por el quemador. Los flujos másicos de aire y combustible están dados por las Ecuaciones **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.**, respectivamente. Donde Q es el caudal suministrado por el ventilador, C y A son el coeficiente de descarga y el área del inyector de combustible, p es la presión manométrica con la que se inyecta el combustible y ρ_a y ρ_g son la densidad del aire y el combustible.

$$\dot{m}_a = Q \cdot \rho_a = Q \cdot \frac{M_a P_{atm}}{R T} \quad (1)$$

$$\dot{m}_g = C A \sqrt{2 \cdot p \cdot \rho_g} = C A \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{M_g (P_{atm} + p)}{R T}} \quad (2)$$

Al analizar las dos ecuaciones se observa que mientras el flujo de aire es directamente proporcional a la presión atmosférica, el flujo de combustible es proporcional a la raíz cuadrada de la suma entre la presión atmosférica y la presión manométrica

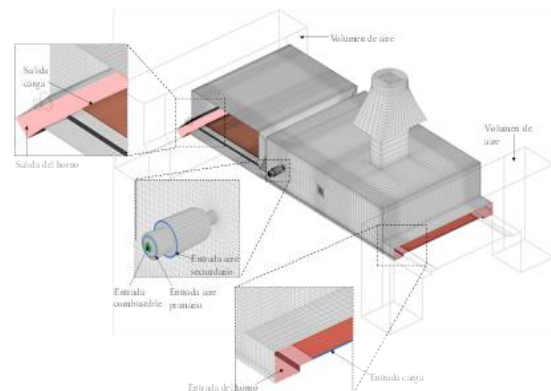


Fig. 3. Ejemplo del mallado realizado para las simulaciones numéricas.

Debido a esto, al variar la presión atmosférica, el flujo de aire de combustión se va a ver más afectado que el flujo de combustible. Esto hace que además de la caída en la potencia, también haya una reducción en el factor de aireación. En la Fig. 4 se muestra como es la variación de la presión atmosférica con la altura sobre el nivel del mar para tres temperaturas ambiente. Con estas presiones se calculó cuanto varían los flujos máscicos de aire y combustible y el factor de aireación respecto a las condiciones al nivel del mar (1 atm).

En la Fig. 4(b) se observa como al pasar del nivel del mar a la altura de Bogotá (0.74 atm), sin hacer ninguna modificación sobre el sistema, los flujos máscicos de aire y combustible se reducen en 26% y 14%, respectivamente. Lo que implica, por un lado, una reducción de más del 10% en la potencia de operación del horno, lo que conlleva a una reducción del calentamiento de la carga al haber menos energía disponible. Por otro lado, al disminuir el flujo de aire más que el de combustible, se modifica también la tasa de aireación con la que se da la combustión, tendiendo a mezclas más ricas disminuye la presión. La reducción de la tasa de aireación ocasiona problemas en la combustión, especialmente los asociados a combustión incompleta que impactan de forma negativa tanto la eficiencia como las emisiones contaminantes.

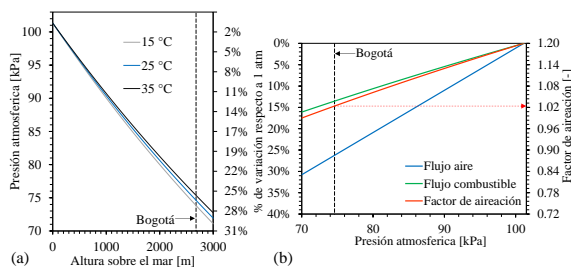


Fig. 3. (a) Variación de la presión con la altura sobre el nivel del mar (b) Variación del flujo máscico de aire, de combustible y del factor de aireación con la presión atmosférica ($p = 4 \text{ kPa}$).

Los efectos sobre los sistemas auxiliares pueden ser evitados al hacer correcciones sobre el sistema. Para el flujo de aire se puede aumentar la velocidad de rotación del ventilador que suministra el aire de combustión. Para el flujo de combustible se puede aumentar la presión manométrica con la que se inyecta el combustible o aumentar el diámetro de descarga del combustible. Para las simulaciones

numéricas se consideró que al variar la presión atmosférica se hicieron sobre el sistema las modificaciones necesarias para mantener constante los flujos máscicos de entrada del aire y el combustible (igual potencia y factor de aireación).

La Fig. 5 muestra los contornos de temperatura en el plano vertical y en el plano horizontal a la altura de los quemadores, para la condición de 0.74 atm. Como se observa en la figura, el proceso de combustión comienza en los quemadores y continua mientras estos son inyectados a alta velocidad al interior del horno, induciendo una succión de flujo máscico del gas que rodea al jet debido a la conservación del momento lineal, lo cual genera corrientes de recirculación al interior del horno.

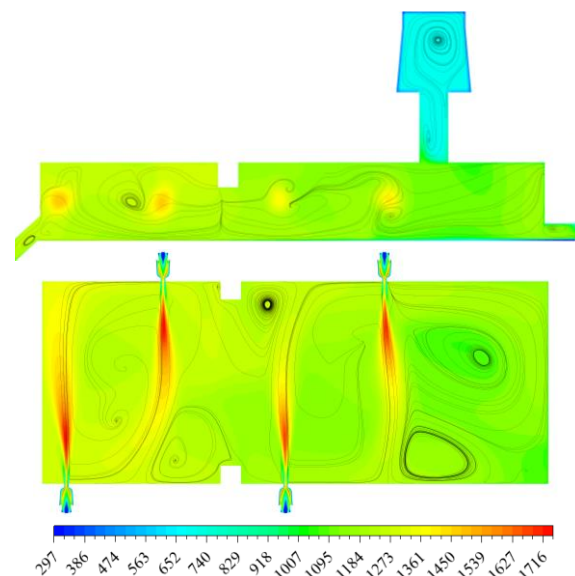


Fig. 4. Contornos de temperatura [K]. 2600 m.s.n.m.

Al disminuir la presión atmosférica, disminuye la densidad de los gases en igual proporción. Para un mismo flujo máscico, la disminución en la densidad implica un aumento en la velocidad a la que se inyectan los gases y por lo tanto en el impulso del jet. Una mayor velocidad de flujo promueve una mayor transferencia de calor por convección tanto hacia las paredes del horno como hacia la carga. No obstante, la variación en el flujo de calor por convección hacia la carga no fue muy significativo. Esto se debe a que para procesos de alta temperatura ($>800^{\circ}\text{C}$) la mayoría de la energía se transfiere por medio de la radiación (Trinks *et al.*, 2004).

La Ecuación (3) describe el flujo de energía total a través de la superficie de la carga expuesta al interior del horno, donde q_{Rad} es el flujo neto de

energía por radiación y q_{conv} es el flujo de energía por convección. El flujo neto de energía por radiación es igual a la diferencia entre la porción de la energía incidente que es absorbida por la carga, proveniente tanto de las paredes ($Q_{R \text{ paredes}}$) como de los gases de combustión ($Q_{R \text{ gases}}$), y la radiación emitida nuevamente por la superficie de la carga ($\epsilon \sigma_{\text{SB}} T^4$), como se muestra en la Ecuación (4).

$$q_T = q_{\text{Rad}} + q_{\text{Conv}} \quad (3)$$

$$q_{\text{Rad}} = Q_{R \text{ paredes}} + Q_{R \text{ gases}} - \epsilon \sigma_{\text{SB}} T^4 \quad (4)$$

El flujo de calor hacia la carga varía a causa del cambio en la presión atmosférica. El flujo neto de energía por radiación y convección hacia la carga para las dos condiciones de presión atmosférica se presenta en la Fig. 6(a). En la Fig. 6(b) se muestra como es la distribución de los flujos de energía por radiación y convección respecto al flujo total, separando la radiación entre la que proviene de las paredes del horno y la que proviene de los gases, las cuales se calcularon siguiendo la metodología descrita por (García y Amell, 2018).

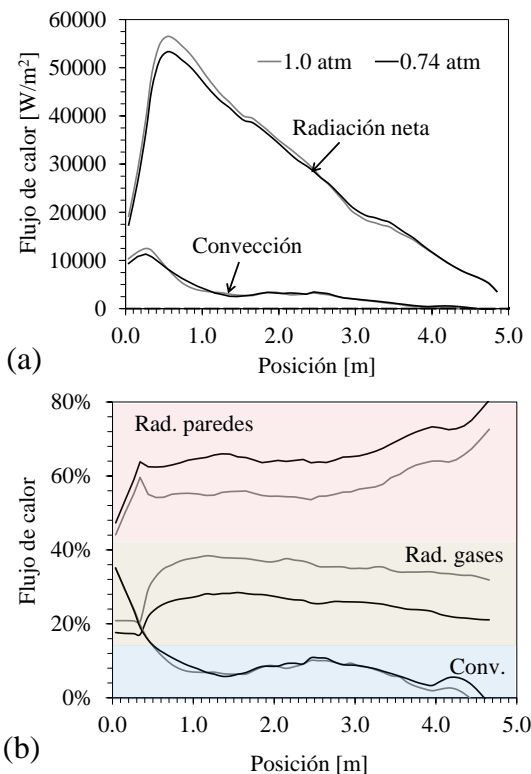


Fig. 5. Flujo de calor hacia la carga: (a) Radiación neta y convección. (b) Distribución del flujo de energía hacia la carga.

El cambio más significativo se da en los flujos de calor por radiación, donde a menor presión atmosférica menor es la radiación proveniente de los gases de combustión y mayor es la proveniente de las paredes. Respecto a la radiación total que incide sobre la carga a 1 atm, la radiación proveniente de los gases se reduce un 11% al pasar a 0.74 atm, mientras que la proveniente de las paredes aumenta un 6%, lo cual conlleva a una reducción de la radiación total de 5% en promedio. Esta reducción se aprecia en la gráfica de la radiación neta al inicio del horno, donde la temperatura de la carga es baja y la radiación emitida por esta es mínima.

Como se observa en la Fig. 7, la temperatura promedio de las paredes del horno y de los gases de combustión no cambia significativamente al variar la presión atmosférica. El cambio en el flujo de calor por radiación se debe entonces a la variación con la presión del coeficiente de absorción de los gases de combustión. Al disminuir la presión disminuye también el coeficiente de absorción, lo cual, por un lado, disminuye la radiación emitida directamente desde los gases y por otro lado, para una misma temperatura de paredes, aumenta la cantidad de radiación emitida por las paredes que llega a la carga, ya que los gases absorben menos de ésta. Al nivel del mar la distribución del flujo de calor es en promedio 9% convección, 57% radiación de las paredes y 34% radiación de los gases; al reducir la presión atmosférica a 0.74 atm, la distribución cambia a 9%, 66% y 24%, respectivamente.

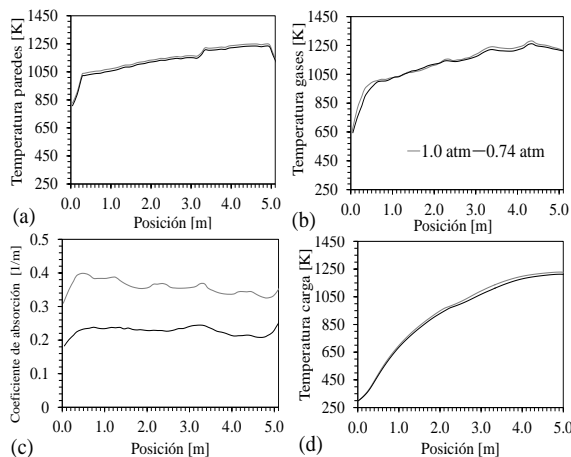


Fig. 6. Variación a lo largo del horno de (a) Temperatura promedio de las paredes, (b) Temperatura promedio de los gases, (c) Coeficiente de absorción promedio de los gases y (d) Temperatura de la carga.

Como resultado de la variación en el flujo de calor hacia la carga, la temperatura de la carga a la salida del horno es mayor a la condición de mayor presión atmosférica (menor altura sobre el nivel del mar) pasando de 1212 K a 0.74 atm a 1227 K a 1.0 atm. Esto se aprecia en la Fig. 7(c), donde se muestra la curva de calentamiento de la carga a lo largo del horno. Este cambio en la temperatura corresponde a una variación de 0.5 puntos porcentuales en la eficiencia útil del proceso.

5. CONCLUSIONES

La presión atmosférica tiene un gran efecto sobre la operación del horno como resultado de la variación en los flujos máxicos de aire y combustible asociado a los sistemas auxiliares del horno. Al pasar de operar a nivel del mar a hacerlo a una altura de 2600 m.s.n.m se reduce cerca de un 14% la potencia térmica del horno y un 10% el factor de aireación.

Si los problemas asociados a los auxiliares son resueltos, la presión atmosférica no tiene un efecto muy significativo sobre el calentamiento de la carga. No obstante, la forma en la que fluye el calor hacia la carga si cambia considerablemente, disminuyendo la participación de los gases en la radiación a medida que disminuye la presión atmosférica pasando de aportar un 34% de la energía total que llega a la carga a aportar 24% cuando el horno opera a una altura de 2600 m.s.n.m.

Los resultados reportados en este trabajo respecto al efecto de la presión atmosférica sobre la transferencia de calor pueden variar en función de la temperatura de operación del horno y el tamaño del mismo. En hornos que operan a temperaturas por debajo de 600°C, predomina la transferencia de calor por convección, por lo que el efecto de la presión atmosférica sobre la velocidad del flujo de gases, pasa a ser significativa. Así mismo, la radiación emitida por los gases de combustión es función del volumen de gases (tamaño del horno), por lo que para hornos más grandes el efecto que tiene la presión atmosférica sobre el flujo de calor por radiación es mayor.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a COLCIENCIAS que a través del “Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas” financió la “Red de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial Fase II – INCOMBUSTION” en el proyecto “Aumento de producción y optimización del consumo de gas natural por la recuperación de calor residual en la línea de tratamiento térmico de una empresa del sector industrial colombiano con la implementación y adaptación de nuevas tecnologías de combustión”. También a la Universidad de Antioquia UdeA a través de su programa de sostenibilidad.

REFERENCIAS

- Alvernia Acevedo, S., & Rico Bautista, D. (2017). Análisis de una red en un entorno IPV6: una mirada desde las intrusiones de red y el modelo TCP/IP. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA*, 1(29).
- Amell, Andrés A. 2007. “Influence of Altitude on the Height of Blue Cone in a Premixed Flame.” *Applied Thermal Engineering* 27(2-3): 408-12.
- ANSYS Inc. 2017. *ANSYS Fluent Theory Guide*. 18.0. ed. Inc. ANSYS. Canonsburg, PA, USA. <http://www.ansys.com>.
- Baukal Jr, Charles E. 2000. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. CRC press. BOOK.
- Bonfante, M., & Castillo, A. (2014). Integración de sistema multi-agente, ontologías y procesos de negocios como marco tecnológico de la estrategia “gobierno en línea”. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA*, 1(23).
- British Iron, and Steel Research Association. 1953. *Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures:(Based on Measurements Made at the National Physical Laboratory*,

- Teddington). Butterworths Scientific Publications.
- Burbano, Hugo J., Jhon Pareja, and Andrés A. Amell. 2011. "Laminar Burning Velocities and Flame Stability Analysis of Syngas Mixtures at Sub-Atmospheric Pressures." *International Journal of Hydrogen Energy* 36(4): 3243–52.
- C. J. Torres, J. F. Archila, M. L. Tronco, M. Becker, A. J. V. Porto, A. J. Tiberti. (2013). Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA, ISSN: 1692-7257. 2(22).
- Churchill, Stuart W., and Humbert H.S. Chu. 1975. "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(11): 1323–29.
- Davies, Theodore E. 1972. "Burner Structure and Method." : 9.
- Egolfopoulos, F. N., and C. K. Law. 1991. "An Experimental and Computational Study of the Burning Rates of Ultra-Lean to Moderately-Rich H₂/O₂/N₂ laminar Flames with Pressure Variations." *Symposium (International) on Combustion* 23(1): 333–40.
- Egolfopoulos, F N, and C K Law. 1990. "Chain Mechanisms in the Overall Reaction Orders in Laminar Flame Propagation." *Combustion and Flame* 80: 7–16. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001021809090049W>.
- fives north american. 2006. "The Hallmark of High Velocity Burners." (August): 19–20.
- García, Alex M., and Andrés A. Amell. 2018. "A Numerical Analysis of the Effect of Heat Recovery Burners on the Heat Transfer and Billet Heating Characteristics in a Walking-Beam Type Reheating Furnace." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127: 1208–22.
- Han, Sang Heon, Daejun Chang, and Chang Young Kim. 2010. "A Numerical Analysis of Slab Heating Characteristics in a Walking Beam Type Reheating Furnace." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(19–20): 3855–3861.
- Huang, Mei-Jiau, Chia-Tsung Hsieh, Shih-Tuen Lee, and Chao-Hua Wang. 2008. "A Coupled Numerical Study of Slab Temperature and Gas Temperature in the Walking-Beam-Type Slab Reheating Furnace." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 54(6): 625–46. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407780802289475>.
- Lloyd, J. R., and W. R. Moran. 1974. "Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of Various Planforms." *Journal of Heat Transfer* 96(4): 443. <http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1435958>.
- M. C. Bonfante, A. Castillo. (2014). Integración de sistema multi-agente, ontologías y procesos de negocios como marco tecnológico de la estrategia "gobierno en línea". REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA, ISSN: 1692-7257. 1(23).
- Peters, N. 1984. "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion." *Progress in Energy and Combustion Science* 10(3): 319–39.
- Prieler, Rene et al. 2016. "Prediction of the Heating Characteristic of Billets in a Walking Hearth Type Reheating Furnace Using CFD." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 92: 675–88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.056>.
- Raithby, G D, and E H Chui. 1990. "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media." *Journal of Heat Transfer* 112(2): 415–23.
- S. A. A. Acevedo, D. R. Bautista. (2017). Análisis de una red en un entorno IPV6: una mirada desde las intrusiones de red y el modelo TCP/IP. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA, ISSN: 1692-7257. 1(29).
- Shih, T H et al. 1995. "A New K-Epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows: Model Development and Validation." *Computer & Fluids* 24(August): 227–38.
- Smith, T. F., Z. F. Shen, and J. N. Friedman. 1982. "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model." *Journal of Heat Transfer* 104(4): 602.
- Torres, C., Archila, J., Tronco, M., Becker, M., Viera Porto, A., & Tiberti, A. (2013). Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA, 2(22).
- Touloukian, Yeram Sarkis, and David P DeWitt. 1989. *Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys*. UMI.
- Trinks, Willibald et al. 2004. 1 *Industrial Furnaces*. John Wiley & Sons.
- Unidad de Planeación Minero Energética-UPME. 2010. "Proyección de Demanda de Energía En Colombia." *Energía, Minero*: 90. http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYEC_C_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf.
- University of California at San Diego. 2016. "Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications." *San Diego Mechanism web page*. <http://combustion.ucsd.edu>.
- Zeng, Yi et al. 2013. "Momentum-Dominated Methane Jet Flame at Sub-Atmospheric Pressure." *Procedia Engineering* 62: 924–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.144>.