

# Evaluación de causas del sobreconsumo de combustible en horno de calentamiento de acero para laminación

## Cause assesment of fuel overconsuming in a steel reheating furnace for lamination

Jesús Cabrera-Gómez<sup>I</sup>, Evelio Palomino-Marín<sup>I</sup>, Franklin Ferreras-Cuevas<sup>II</sup>

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento. La Habana, Cuba

II. Grupo Gerdau-Metaldom, Santo Domingo, República Dominicana

Correo electrónico: [jcabrera@ceim.cujae.edu.cu](mailto:jcabrera@ceim.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 10 de julio de 2017

Aceptado: 8 de octubre de 2017

### Resumen

Se muestran los resultados del estudio realizado con el objetivo de identificar las posibles causas del sobreconsumo de combustible observado en un horno empleado para el calentamiento del acero que se somete a procesos de laminación. A partir de la observación directa y la determinación de parámetros tales como el poder calórico real del combustible empleado, la relación aire/combustible y la composición de los gases de la combustión en el horno, así como la aplicación del análisis de modos de fallo y sus efectos y el análisis de causa raíz, se identificaron varias causas que originaron el consumo

excesivo de combustible. Se determinó que la causa de mayor impacto en el sobreconsumo de combustible del horno es el exceso de aire en la combustión y que los factores analizados generaron sobreconsumos en el orden del 15 % de la energía que debiera emplearse.

**Palabras claves:** evaluación de causas, horno de calentamiento, sobreconsumo de combustible

### Abstract

The paper shows the results of a study developed with the main objective of identify the possible causes of observed fuel over consuming in a steel reheating furnace used for supplying heated steel to a rolling mill for lamination processes. Several of these causes were identified from direct observing and the determination of parameters such as the real calorific power of used fuel, the air/fuel relationship and the composition of

combustion gases in the furnace. The Failure Mode and Effect Analysis and the Root Cause Analysis studies were also applied. As the main cause of fuel overconsuming was identified the excess of air in combustion.

**Key words:** cause assesment, steel reheating furnace, fuel over consuming.

### Introducción

Los hornos empleados para el calentamiento del acero que se somete a procesos de laminación son relevantes consumidores de energía, debiendo considerarse además que se trata de activos que nunca dejan de operar, inclusive durante paradas relativamente largas donde el laminador tiene que detenerse para la realización de acciones de operación o mantenimiento. Según estudios realizados [1, 2], para una planta de laminación el costo del combustible quemado en un horno de calentamiento del acero normalmente representa entre el 30 y el 40 por ciento del costo total de la laminación, por lo que cualquier reducción del consumo se considera importante.

En el horno de calentamiento de acero en el cual se desarrolló la investigación, se observó un aumento progresivo del consumo de combustible con niveles cada vez más alejados del valor de referencia establecido por la empresa productora, lo que ha generado un incremento en los costos de operación. El horno, originalmente diseñado para quemar *fuel oil*, fue acondicionado para quemar gas natural en 2010.

Se pudo comprobar que existen variables importantes del proceso que sistemáticamente permanecen fuera de los valores de diseño, como son: la temperatura del aire de combustión (por debajo de 330 °C), la alta temperatura de salida del recuperador (500 °C) y el ajuste de la relación aire/combustible (fijada en 13,5). Por otra parte, se observó que el control de la temperatura presenta variaciones en la regulación provocando consumos de combustible durante los tiempos de parada y durante los transitorios de bajada y subida para alcanzar la temperatura requerida por el proceso.

Se trata de un horno de empuje, en el que la carga entra de manera continua empujándose las palanquillas de acero una contra la otra, desde la puerta de entrada hasta la puerta de salida. Básicamente este tipo de horno es una caja con puertas de entrada y de salida para contener el calor generado por el combustible consumido por los quemadores [3, 4]. El calor es transferido al acero y los humos que resultan de la combustión salen en forma de gases por el conducto de la chimenea. El flujo de los gases de escape sale en dirección contraria al flujo de la carga y de esta forma el material recupera calor de dichos gases.

Debido a la proporción que representa el consumo de combustible en el costo de operación (alrededor del 35% según los análisis realizados, lo que corrobora lo planteado en análisis previos [1, 2]), se consideró pertinente hacer un estudio con el objetivo principal de identificar las causas que han provocado el sobreconsumo de combustible en este caso. A partir de la observación directa y la determinación de parámetros tales como el poder calórico real del combustible empleado, la relación aire/combustible y la composición de los gases de la combustión en el horno (este análisis de los gases de la combustión fue realizado por un consultor externo para tres contextos de operación diferentes), así como la aplicación del análisis de modos de fallo y sus efectos y el análisis de causa raíz, se identificaron como causas cuantificables el empleo de un factor de conversión de consumo de combustible inadecuado, la relación incorrecta entre el aire de combustión y el combustible y las pérdidas del calor contenido en los gases de combustión. Se determinó que la causa de mayor impacto en el sobreconsumo de combustible del horno es el exceso de aire en la combustión y que los factores analizados generaron sobreconsumos del 15 % en la energía que debiera emplearse.

## Métodos y Materiales

El estudio realizado se constituye en una investigación de campo desarrollada sobre un horno en operación con una historia de consumo excesivo de combustible, teniendo como propósito identificar las principales causas que originan dicho sobreconsumo. Este horno ha estado operando con indicadores de consumo superiores a los del *benchmark* asumido por la empresa productora, que es de 209 kW-h por tonelada de acero laminada. La figura 1 muestra el horno estudiado, visto desde la puerta de descarga.



**Fig. 1.** Horno de calentamiento visto desde la puerta de descarga

El horno dispone de dos zonas de calentamiento, teniendo instalados 6 quemadores en cada zona con una potencia total de 18 000 000 kcal/h. La Zona 1 corresponde a la sección del horno colindante con la puerta de entrada, en tanto la Zona 2 es el área próxima a la puerta de descarga.

A partir de la observación directa y la determinación de parámetros tales como el poder calórico real del combustible empleado, la relación aire/combustible y la composición de los gases de la combustión en el horno, se pudo identificar la presencia de anomalías en el consumo de combustible.

Para profundizar en la indagación, se examinaron los diferentes métodos reconocidos para la identificación de problemas o desviaciones en el campo industrial con el objetivo de seleccionar los más efectivos para su aplicación al caso de estudio. Así mismo, se estudió en detalle el funcionamiento del horno y la interrelación de cada uno de sus subsistemas para conocer la dependencia de estos con el consumo de combustible. Los subsistemas analizados fueron: suministro de combustible, quemadores, cuerpo del horno, recuperación de calor, control y escape.

De las causas de consumo excesivo de combustible identificadas y que más adelante se relacionarán, se cuantificaron en una primera etapa aquellas para las que se disponía de suficiente información proveniente de la investigación desarrollada hasta el momento de redactarse el presente trabajo, quedando para una segunda etapa las restantes.

Durante el desarrollo de la investigación se llevó a cabo un estudio pormenorizado de los posibles factores causales en el que se aplicaron herramientas tales como el Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, *Failure Modes and Effect Analysis*) y el Análisis de causa raíz (RCA, *Root Cause Analysis*) [1, 5].

Para estimar el comportamiento de la eficiencia del horno, la empresa productora utiliza el indicador de consumo de energía (en kW-h) por tonelada de acero laminada. El consumo energético en kW-h, en relación con una medida del volumen de combustible, se obtiene para el horno tomando en consideración el poder calórico del combustible utilizado, a partir del empleo de un factor de conversión que debe ser calculado en cada caso [6, 7].

Según las observaciones realizadas, se ha estado recibiendo combustible con diferente poder calórico. Sin embargo, en la expresión de cálculo del indicador de consumo de energía por tonelada de acero laminada no se está actualizando la variación del contenido energético del gas recibido y se está utilizando un factor fijo para la conversión del volumen de gas natural en potencia consumida.

Estudios realizados en torno a las pérdidas de calor contenido en los gases de la combustión [1], el ahorro de combustible que se puede conseguir con el calentamiento del aire combustión se calcula según la Ecuación 1.

$$S = \frac{P}{F + P - Q} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

S = Porcentaje de combustible ahorrado.

F = Poder calórico del combustible (kcal/kg de combustible).

P = Cantidad de energía en el aire de combustión (kcal/kg de combustible).

Q = Cantidad de energía en los humos de salida (kcal/kg de combustible).

## Resultados y Discusión

Como resultado del estudio, se pudo identificar que las causas que provocan el consumo excesivo de combustible en el horno son las siguientes:

1. Empleo de factor de conversión de consumo inadecuado.
2. Relación inadecuada entre el aire de combustión y el combustible.
3. Pérdidas del calor contenido en los gases de combustión.
4. Pérdidas a través de las paredes y el techo del horno.
5. Pérdidas por radiación.
6. Pérdidas por infiltración de aire frío.
7. Pérdidas por variaciones en el modo de operación.
8. Pérdidas por calibración de la instrumentación.
9. Pérdidas al fuego por oxidación.

El análisis y discusión de los resultados se dedica únicamente a los tres primeros factores causales, en relación con los cuales se pudo desarrollar un estudio más detallado y se obtuvo información experimental suficiente para estimar las pérdidas asociadas.

### Empleo del factor de conversión de consumo inadecuado

El combustible empleado en el horno es gas natural suministrado en contenedores de gas licuado por un proveedor externo. La planta dispone de una estación para la gasificación del combustible y de medidores de flujo que permiten contabilizar el gas consumido para el pago por este concepto.

En la tabla 1 se presenta el resultado de las observaciones realizadas durante 12 meses. En la última columna se muestra la diferencia que resulta del cálculo de la energía usando el factor fijo (10,73) que se ha utilizado, menos el valor real para cada poder calórico del gas recibido.

De la información contenida en la tabla 1, se aprecia que en el período estudiado se consumió (y se pagó) combustible en exceso para generar 68700,59 kW-h por las diferencias de poder calórico del combustible recibido, que a los precios convenidos entre las partes significó una erogación adicional de 2706,72 USD.

**Tabla 1.** Diferencias observadas al emplear un factor incorrecto en el cálculo de la energía consumida

Mes	Poder calórico [BTU/pie <sup>3</sup> ]	Factor empleado	Factor calculado	Gas consumido [m <sup>3</sup> ]	Diferencia [kW-h] (factor empleado vs. calculado)
1	1036,8	10,73	10,73	508769	-
2	1036,3	10,73	10,72	481755	4817,55
3	1036,3	10,73	10,72	645659	6456,59
4	1036,5	10,73	10,73	704191	-
5	1036,6	10,73	10,73	583345	-
6	1036,1	10,73	10,72	555403	5554,03
7	1035,7	10,73	10,72	558300	5583,00
8	1035,0	10,73	10,71	528522	10570,44
9	1036,4	10,73	10,72	616980	6169,80
10	1036,3	10,73	10,72	629874	6298,74
11	1036,1	10,73	10,72	608759	6087,59
12	1034,0	10,73	10,70	572095	17162,85
<b>Totales</b>				6993652	68700,59

### Relación inadecuada entre el aire de combustión y el combustible

El control de la relación aire/combustible es esencial para el uso eficiente del combustible y la reducción de emisiones contaminantes al medio ambiente. Un control preciso debe mantener esta relación cerca del valor considerado como óptimo para una buena combustión [2]. Un exceso de aire puede provocar una mala combustión y además los componentes del aire que no intervienen en la combustión (nitrógeno) y el exceso de oxígeno se llevan parte del calor generado por el proceso de la combustión [8, 9].

Desde la reconversión del horno estudiado para quemar gas natural en 2010, se han observado y aceptado condiciones de eficiencia energética alejadas de los valores recomendados [2, 7, 8]. Así, la relación aire/gas se ajustó a un valor de 13,5 por ser la proporción que mejor resultado arrojó de manera empírica, sin otro tipo de análisis. Con relaciones menores, el personal de operación reportó que la temperatura del horno no responde adecuadamente. Además, se observó que la temperatura sube a ritmo muy lento cuando se aumenta el flujo de combustible hacia los quemadores.

Para conocer la realidad de la eficiencia de la combustión se contrató un análisis de los gases de la combustión a un consultor externo para medir la cantidad de oxígeno en los gases de la combustión y el porcentaje de exceso de aire real de la combustión. Esta tarea se llevó a cabo con un analizador de gases TESTO-454 y el punto de muestreo se ubicó en el ducto de salida de los humos después del intercambiador de calor del horno. El análisis se realizó para tres contextos de operación diferentes:

- Contexto 1: Se tomaron las muestras con el horno en operación para la Zona 1 a un 78 % de potencia, la Zona 2 a un 48% de potencia y el tren de laminación a su máxima capacidad (55 barras por hora).
- Contexto 2: Se tomaron las muestras luego de cerrar el suministro de combustible a la Zona 1 y se dejó trabajando sólo la Zona 2 al 100 % de potencia. Se sacaron 10 barras del horno en esta condición.
- Contexto 3: Se tomaron las muestras luego de cerrar el suministro de combustible a la Zona 2 y se dejó trabajando sólo la Zona 1 al 100 % de potencia. No se sacaron barras del horno en esta condición.

En la tabla 2 se pueden apreciar algunos de los resultados de mayor interés obtenidos de este análisis de gases.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de gases en el horno

Parámetros	Contexto 1	Contexto 2	Contexto 3
O <sub>2</sub> (%)	9,29	12,62	9,4
CO <sub>2</sub> (%)	6,51	4,65	6,45
CO (mg/m <sup>3</sup> )	35	4	6
NO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	0,1	0,3	0,3
NO (mg/m <sup>3</sup> )	99	123	61
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	4	3	1
Temperatura (°C)	483,5	407,1	463,9
Eficiencia (%)	66,8	62,2	67,7
Pérdidas (%)	33,2	37,8	32,3
Exceso de aire (%)	70,6	140,5	71,9

En estudios previos realizados sobre el control del porcentaje de oxígeno en hornos de recalentamiento [10,11], donde el nivel de oxígeno en los gases de la combustión estaba en niveles entre 1,3 % y 4,6 %, se registraron niveles de ahorro de 5,2 % en la energía utilizada en el calentamiento del acero.

Tomando como referencia sólo la medida de oxígeno en el Contexto 1, donde las dos zonas del horno trabajan en conjunto (9,29 % de oxígeno, para un 70,6 % de exceso de aire) se puede calcular una pérdida de combustible del 38 %. Este escenario da la posibilidad de bajar hasta una relación aire/combustible de 1,1, con un exceso de aire de 10 % y para una cantidad de oxígeno del 2% obtener una pérdida del 26 %. Esta estimación permitiría una reducción del 12 % en el consumo de combustible.

### Pérdidas del calor contenido en los gases de combustión

Como resultado de la combustión se generan gases que pasan a través de toda la sección transversal del horno aportando calor a las palanquillas de acero en la zona de precalentamiento (Zona 1) y luego calentando el aire de combustión en el recuperador, pero finalmente hay una cantidad de calor que se escapa por la chimenea. El recuperador, según su eficiencia, debe transferir la mayor cantidad de este calor al aire de combustión [12].

En la figura 2 se observa el comportamiento de la temperatura de los humos y del aire de combustión en el horno para un período de 24 horas. La temperatura observada de los gases a la entrada del recuperador está por debajo de los 700 °C (promedio: 553 °C) y la temperatura de los gases de salida por la chimenea llega hasta 500 °C (promedio: 417 °C). El calor transferido al aire de combustión hace que su temperatura llegue hasta alrededor de los 300 °C (promedio: 271 °C).

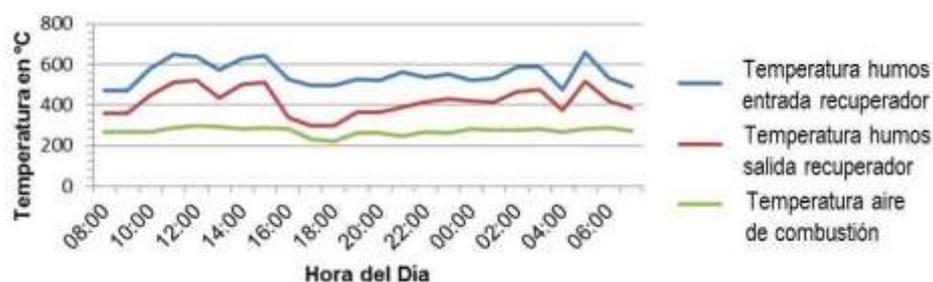


Fig. 2. Comportamiento de la temperatura de los humos y el aire de combustión

Se considera que la baja temperatura en los humos de entrada está provocada por dos condiciones observadas: el exceso de aire en la combustión y la infiltración de aire por las puertas de salida y entrada para la carga de las palanquillas de acero.

Los valores de temperatura medidos en el aire de combustión se corresponden con los datos de placa del recuperador: 700 °C para la temperatura de los humos de entrada y 330 °C para el aire de combustión. Esto explica que la temperatura de salida de los humos por la chimenea sea de 500 °C. El valor recomendado para este tipo de horno ronda los 300 °C para la temperatura de salida de los humos [13].

Basado en el valor actual medido para la temperatura del aire de combustión (promedio: 271 °C) y la capacidad de diseño de los equipos de combustión del horno, se podría conseguir una mejora en la eficiencia de la combustión si se pudiera subir la temperatura del aire de combustión hasta alcanzar un valor entre 400 °C y 450 °C, para lograr un ahorro de 10% en el consumo de combustible [1]. En este escenario la temperatura de los gases permanecería en 600 °C, pero la condición del recuperador de calor actual no lo permite, por lo que se requeriría adquirir un recuperador nuevo que tiene un precio aproximado de 89000 € (según propuesta hecha por el proveedor Ingerner & Peilier).

La investigación consideró otro escenario económicamente más factible donde se logra subir la temperatura de los humos de entrada al intercambiador por una mejoría en la combustión, eliminando el exceso de aire hasta niveles mínimos donde sería posible subir la temperatura de entrada de humos hasta la temperatura de diseño del intercambiador (700 °C para la entrada de humos y 330 °C en el aire combustión), con lo que se consigue un ahorro de combustible del 3 %. Este escenario fue el que se propuso como solución a la empresa productora.

### Sobreconsumos estimados

En la tabla 3 se resumen los sobreconsumos estimados a partir del análisis realizado para los tres factores causales en los que se cuantificaron las pérdidas. Estos sobreconsumos aparecen reflejados en términos de energía consumida en exceso y por pagos en demasía por dicha energía consumida. Se pueden apreciar las importantes oportunidades de mejora asociadas a los factores causales analizados que impactan en el consumo de combustible o en el indicador final de la medida de consumo.

**Tabla 3.** Sobreconsumos estimados para los factores causales analizados

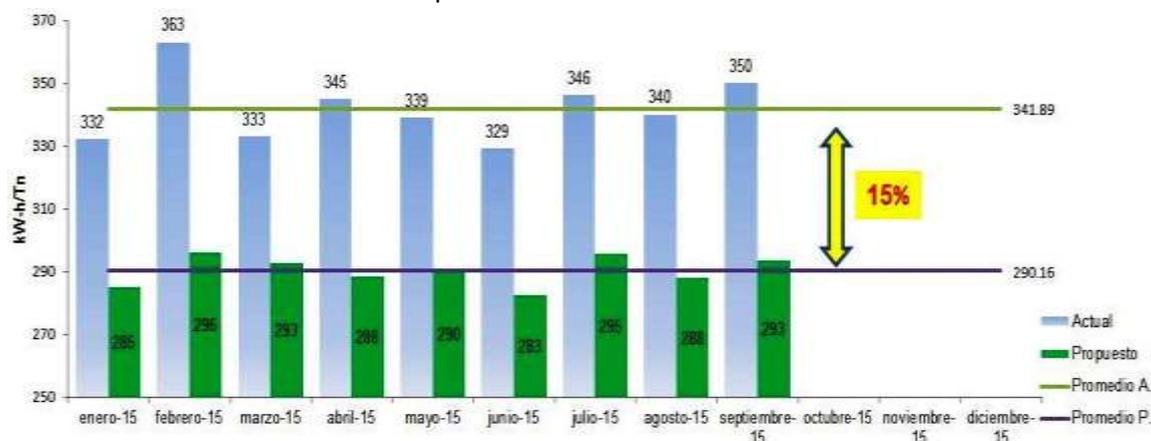
Concepto	Sobreconsumo [kW-h/ mes]	Sobrefacturación [USD/mes]
Factor de conversión de consumo	5725	225,56
Relación aire de combustión / combustible	749776	29540,90
Recuperación del calor contenido en los gases	187444	7385,23
<b>Totales</b>	<b>942945</b>	<b>37151,69</b>

A partir de la información contenida en la tabla 1, pudo estimarse que si se emplea un factor de conversión de consumo ajustado a la realidad, puede reducirse, como promedio, el consumo de 5725 kW-h/mes, que equivale a bajar la factura de combustible en 225,56 USD/mes.

Para la mejora en el control de la relación aire/combustible con la reducción del exceso de aire y la regulación de la cantidad de oxígeno en el aire de combustión, se estima un ahorro similar al sobreconsumo actual del 12 % de combustible, equivalente a 749776 kW-h/mes, que representa un ahorro de 29540,90 USD/mes.

Como resultado del análisis de la temperatura del aire de combustión y de la eficiencia del recuperador, resultaron dos posibles escenarios de mejora. En el primero se contempla el cambio del recuperador por uno de mayor capacidad de recuperación de calor y que pueda llevar el aire de combustión hasta 450 °C, con una inversión de unos 89000 €, sólo por concepto de la compra del recuperador. En el segundo caso (que es el que se propuso para su implementación), con el control del exceso de aire en la combustión se aumenta la temperatura de los gases de entrada del recuperador hasta los valores de diseño (700 °C para los humos entrada y 330 °C para el aire combustión) siendo posible lograr un ahorro de combustible del 3 %. Esto representa 187444 kW-h/mes, con un ahorro de 7385,23 USD mensuales.

Tomando en consideración el consumo de energía por tonelada de acero calentado para la laminación durante los 9 primeros meses del año 2015, en la figura 3 se ilustra el ahorro que se puede conseguir si los factores causales analizados no estuvieran presentes.

**Fig. 3.** Consumo actual y estimado al eliminar los factores causales analizados

## Conclusiones

El combustible que se recibe del proveedor tiene poder calórico variable y tal variación no se está teniendo en cuenta para realizar el cálculo correcto del índice de consumo.

La causa de mayor impacto en el sobreconsumo actual de combustible en el horno es el exceso de aire en la combustión, no existiendo el mecanismo apropiado para medir la eficiencia de dicha combustión.

Los tres factores causales analizados en el presente trabajo, generan sobreconsumos de alrededor del 15 % en la energía que debe emplearse en el calentamiento del acero para la laminación. La cuantificación de las pérdidas asociadas a los restantes factores causales identificados, generará nuevas oportunidades de mejora para reducir el consumo de combustible.

## Referencias

1. Tucker R, Ward J. Identifying and Quantifying Energy Savings on Fired Plant Using Low Cost Modeling Techniques. *Applied Energy*. 2012;88(1):127-132.
2. Chang D, Yang K, Lee J, et al. The Case Study of Furnace Use and Energy Conservation in Iron and Steel Industry. *Energy*. 2010;35(4):1665-1670.
3. Trinks W, Mawhinney MH, Shannon RA, et al. *Industrial Furnaces*. 6th ed. New York, USA: John Wiley and Sons; 2004.
4. Maki AM, Osterman PJ, Luomala MJ. Numerical Study of the Pusher-type Slab Reheating Furnace. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2002;31(2):81-87.
5. Niska J, Gripc E, Mellin P. Investigating Potential Problems and Solutions of Renewable Fuel Use in Steel Reheating Furnaces. In: *Finnish-Swedish Flame Conference*; Jyväskylä, Finland; 2013. [Citado 18 de febrero de 2016] Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:681855/FULLTEXT02.pdf>
6. Thekdi AC. Development of Next Generation Heating System For Scale Free Steel Reheating. *SCITech Technical Report*, 2011. [Citado 3 de marzo de 2016]. Disponible en: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1004059.pdf>
7. São-Marcos AL, Chung HP. Annual Natural Gas Questionnaire Overview. Paris, France: Energy Statistics Training; 2013. [Citado 28 de febrero de 2016]. Disponible en: [http://www.iea.org/media/training/presentations/estindianov2013/AQ\\_Gas\\_Overview.pdf](http://www.iea.org/media/training/presentations/estindianov2013/AQ_Gas_Overview.pdf)
8. Harish J, Dutta P. Heat Transfer Analysis of Pusher-type Reheat Furnace. *Journal of Ironmaking & Steelmaking*. 2013;32(2):151-158.
9. Li Z, Barr PV, Brimacombe JK. Computer Simulation of the Slab Reheat Furnace. *Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2013;27(3):187-196.
10. Martensson A. Energy Efficiency Improvement by Measurement and Control (A case study of reheating furnaces in the steel industry). In: *Industrial Energy Technology Conference*; Texas, USA: A&M University; 1992. [Citado 18 de febrero de 2016]. Disponible en: <http://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/92210.pdf>
11. Feliu V, Rivas R, Castillo FJ. Simple Fractional Order Controller Combined with a Smith Predictor for Temperature Control in a Steel Slab Reheating Furnace. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2013;11(3):533-544.
12. Singh V, Talukdar P, Coelho PJ. Performance Evaluation of Two Heat Transfer Models of a Walking Beam Type Reheat Furnace. *Heat Transfer Engineering*. 2014;36(1):91-105.
13. Feng H, Chen L, Xie Z, et al. Constructal Entransy Optimizations for Insulation Layer of Steel Rolling Reheating Furnace Wall with Convective and Radiative Boundary Conditions. *Chinese Science Bulletin*. 2014;59(20):2470-2477.