

## **Optimización del combustible por precalentamiento de la carga y enriquecimiento con oxígeno en los hornos de recalentamiento de la industria siderúrgica**

Optimization of the fuel by preheating of the load and oxygen enrichment in the reheating furnaces of the steel industry

**Diego Mariños Rosado<sup>1,\*</sup>; Samir Rojas Chávez<sup>1</sup>; Yery De los Santos Reyna<sup>1</sup>; Roberto Chucuya Huallpachoque<sup>2</sup>**

1 Escuela de Ingeniería en Energía, Universidad Nacional del Santa. Av. Pacífico 508 - Nuevo Chimbote. Ancash, Perú.

2 Departamento de Energía y Física, Universidad Nacional del Santa. Av. Pacífico 508 - Nuevo Chimbote. Ancash, Perú.

\*Autor correspondiente: [diego\\_j\\_mr@hotmail.com](mailto:diego_j_mr@hotmail.com) (D. Mariños).

### **RESUMEN**

El presente plan de investigación propone ahorrar combustible en los hornos de recalentamiento de la industria siderúrgica por precalentamiento del aire de combustión y/o enriquecimiento con oxígeno, así como por el precalentamiento de la carga. Los parámetros más importantes en el funcionamiento de hornos de recalentamiento serán identificados realizando una revisión bibliográfica enfocándose en los libros de texto de combustión y de hornos en general, y en los artículos científicos experimentales publicados en periódicos internacionales. Una vez identificados estos parámetros, la información se sistematizará para caracterizar las diferentes alternativas que se presentan en el ahorro de combustible en dichos hornos. El precalentamiento de la carga es realizado utilizando el calor remanente en los gases de combustión que salen del horno, proporcionando un área de transferencia de calor entre la carga y tales gases. Al aumentar la concentración de oxígeno en el aire de combustión, además de aumentar la temperatura de la llama, aumentan también las tasas de transferencia de calor y la eficiencia del proceso de combustión. Las dos propuestas se evaluarán con el fin de mejorar el proceso de combustión, aumentar la estabilidad del horno, reducir las emisiones, aumentar la producción y reducir los costos y el consumo de combustible.

**Palabras clave:** Hornos de recalentamiento; enriquecimiento con oxígeno; industria siderúrgica.

### **ABSTRACT**

This research plan proposes to save fuel in the reheating furnaces of the steel industry by preheating the combustion air and / or oxygen enrichment, as well as by preheating the load. The most important parameters in the operation of reheating furnaces will be identified by a literature review focusing on combustion textbooks and ovens in general and experimental scientific articles published in international journals. Once these parameters are identified, the information will be systematized to characterize the different alternatives that are presented in the fuel savings in those furnaces. The preheating of the charge is carried out using the heat remaining in the flue gases leaving the furnace, providing a heat transfer area between the charge and such gases. As the oxygen concentration in the combustion air increases, in addition to increasing the flame temperature, the heat transfer rates and the efficiency of the combustion process also increase. The two proposals will be evaluated in order to improve the combustion process, increase furnace stability, reduce emissions, increase production and reduce costs and fuel consumption.

**Keywords:** Reheating furnaces; oxygen enrichment; steel industry.

## INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1970, debido a la crisis energética mundial y al desarrollo de un laminador de alta velocidad, el modelado y el control de hornos de recalentamiento han recibido gran atención, y avances considerables se alcanzaron incluyendo aplicaciones de algunas estrategias sofisticadas para control de recalentamiento de hornos en tiempo real.

El término hornos de recalentamiento se aplica en esta investigación a aquéllos en los que se imparte el calor a la carga para elevar la temperatura de ésta, sin pretender que se produzca ninguna reacción química o cambio de estado, tal como fusión o vaporización. En el trabajo de los metales, la temperatura desempeña un papel de gran importancia. En este documento estamos considerando los hornos de recalentamiento, que tienen como objeto fundamental el calentamiento de piezas para procesos tales como laminación, extrusión, forja, estampación y conformado. Se mantiene el estado sólido de las piezas durante todo el período de calentamiento y empapado a temperatura, y pretenden simplemente ablandar térmicamente el material para que sea más fácilmente maleable en la operación posterior (Winkler y Lohmann, 2010).

Los controladores para quemadores están diseñados independientemente del programa de alimentación de manera que las planchas se calientan a lo largo de una curva de subida de temperatura. De hecho, hay muchos estudios en la literatura centrándose en el control de quemadores (Balbis et al., 2008). El balance energético de un horno varía, fundamentalmente, en función de si es un horno continuo o un horno intermitente. Es fundamental, por tanto, el calor almacenado por el revestimiento (durante el calentamiento y empapado) y cedido en el enfriamiento (Zhang y Li, 2007).

En todo balance energético es fundamental que las condiciones al final del periodo en que se hacen las mediciones sean las mismas que al comienzo. Por ello, en los hornos intermitentes las mediciones cubren una

carga completa o un ciclo completo y en los hornos continuos las condiciones de trabajo deben ser suficientemente constantes para que las pequeñas variaciones que se produzcan sean despreciables (Ko et al., 2000).

En la industria siderúrgica, los hornos de recalentamiento consumen cantidades sustanciales de energía. Estos hornos se utilizan para procesos de recalentamiento y tratamiento térmico de productos solidificados, después del moldeado o la formación de un metal en polvo. Kreuzer y Werner (2011) estimaron que los hornos de recalentamiento representan el 67% del consumo total de energía de una planta siderúrgica integrada. El término consumo de energía específico se refiere a la cantidad de energía utilizada para recalentar una masa unitaria de material procesado. El consumo específico de energía es un indicador clave del rendimiento que influye directamente en las emisiones de carbono y los costos operativos.

El consumo de energía de los hornos de recalentamiento es de interés por diversas razones (Steinboeck et al., 2013; Chen et al., 2005; DOE, 2007). Primero, es un importante motor de costos. En segundo lugar, tiene una influencia directa sobre las emisiones de gases de escape, que estarán sujetas a regulaciones cada vez más restrictivas. En tercer lugar, puede influenciar el desgaste de los sistemas del horno. En cuarto lugar, puede influir indirectamente en la calidad del producto y la forma en etapas de producción aguas abajo.

Se estudiará el proceso de transferencia de calor por conducción, convección y radiación en hornos de recalentamiento, así como el ahorro de energía (Trinks et al., 2004), y otros aspectos importantes del proceso (Mullinger y Jekins, 2014). En particular se estudiará el efecto de los quemadores sobre el proceso de combustión (Charles E., 2004).

El aprovechamiento del calor que producen los gases de combustión en hornos de recalentamiento es tema actual de investigación por su versatilidad con respecto al ahorro del combustible. Por otro lado, el enriquecimiento con oxígeno fue evaluado experimentalmente por Helle et al. (2010a, 2010b), Milosevic et al.

(2011) y Martín *et al.* (2005). En todos estos trabajos experimentales el aumento de la concentración de oxígeno en el aire de combustión aumenta la temperatura de la llama, mejoran las tasas de transferencia de calor, y la eficiencia del proceso de combustión aumenta también.

Para la solución de los sistemas de ecuaciones se utilizarán métodos numéricos adecuados, una completa exposición de estos métodos se puede encontrar en Chapra y Canale (2006). El software MATLAB fue escogido por la gran cantidad de bibliografía disponible, que agrupa conceptos de programación en MATLAB y de métodos numéricos de Otto y Denier (2005), Yang *et al.* (2005) y Kiusalass (2005).

### MATERIAL Y MÉTODOS

Para simplificar el problema, se hacen las siguientes consideraciones:

- La temperatura del horno es uniforme,
- La temperatura de la atmósfera es uniforme y es la misma que la temperatura del horno.

Todos los cálculos se basan en un método híbrido de ecuaciones analíticas y cálculo numérico (Kang, Rong, 2006). Los modelos matemáticos fueron considerados como parte de la revisión bibliográfica para obtener una visión general de la aplicación de la transferencia de calor. Un ejemplo de modelo matemático es aquel desarrollado por Steinboeck *et al.* (2011b), Yang y Luo (2015), Chakraborty *et al.* (2017). La investigación aplica los modelos de transferencia de calor por radiación, convección y conducción.

#### Modelo de radiación

La transferencia de calor por radiación del horno y las piezas de trabajo y entre la pieza de trabajo están determinados por las ecuaciones (1) y (2), respectivamente:

$$Q_{rad\ fce\ i} = \sigma * \epsilon * F_{Vfce\ i} * A * (T_{fce}^4 - T_i^4) \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Boltzmann,  $\epsilon$  la emisividad,  $F_{Vfce\ i}$  el factor de vista de la pieza de trabajo en el horno; y,  $T_{fce}$  y  $T_i$

son las temperaturas del horno y la pieza  $i$ , respectivamente:

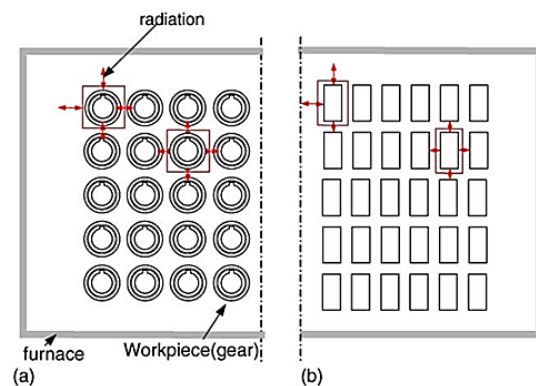
$$Q_{rad\ ij} = \sigma * \epsilon * F_{Vij} * A * (T_i^4 - T_j^4) \quad (2)$$

Donde  $F_{Vij}$  es el factor de vista de la pieza de trabajo  $i$  para la pieza de trabajo  $j$ ; y,  $T_i$  y  $T_j$  son las temperaturas de la pieza de trabajo  $i$  y de la pieza de trabajo  $j$ , respectivamente.

En las dos ecuaciones anteriores, el factor de vista debe determinarse en primer lugar. Muchos tipos de métodos se han desarrollado para calcular el factor de vista basado en el modelo geométrico o sólo para formas básicas. Aquí, se presume que existe sólo radiación de una determinada pieza de trabajo para sus seis piezas de trabajo vecinas, es decir, piezas de trabajo situadas a la izquierda, a la derecha, delante, atrás, arriba y abajo, como se muestra en la Fig. 1. Por lo tanto, el factor de vista de la pieza de trabajo  $i$  para cada pieza de trabajo vecina, tal como  $j$ , es el área directamente expuesta a la pieza de trabajo  $j$  dividida por su área total, como muestra la Ec. (3):

$$F_{Vij} = \frac{A_{ij}}{A} \quad (3)$$

Donde  $A_{ij}$  es el área de la superficie de la pieza de trabajo  $i$  expuesta a la pieza de trabajo  $j$ . La letra  $A$  representa la proyección del área de la superficie total. El factor de visión total de una pieza de trabajo para las seis piezas de trabajo circundantes es de 1,0 en total.



**Figura 1.** El diagrama ilustrativo 2D del cálculo del factor de vista entre el horno y las piezas de trabajo: (a) Piezas redondas; (b) piezas de trabajo rectangulares.

Para las piezas de trabajo de límite, algunas superficies están orientadas hacia la pared del horno. El factor de visualización de la pieza de trabajo de límite para el horno se calcula de la misma manera. Para las piezas de trabajo cúbicas o esféricas, el factor de vista de la pieza de trabajo para cada pieza de trabajo adyacente es 1/6 por simetría.

A medida que las piezas de trabajo se cargan en dispositivos eléctricos, el dispositivo de fijación influye en la radiación entre el horno y las piezas de trabajo. Si el dispositivo está hecho de hilos, su efecto se descuida. Si la pared del soporte es sólida, la emisividad se reducirá al 50%.

**Modelo de convección**

El coeficiente de convección puede calcularse por la siguiente ecuación, independientemente de si la convección es natural o forzada:

$$h_{conv} = \frac{\lambda_g}{L^*} Nu_{L^*} \tag{4}$$

Donde  $L^*$  es la longitud de la pieza de trabajo,  $L^* = A^{1/2}$ ,  $\lambda_g$  es la conductividad térmica del gas,  $Nu_{L^*}$  el número de Nusselt, está relacionado con las características geométricas de la pieza de trabajo, estándar de carga, propiedades térmicas de la atmósfera y ventilador de circulación. Los cálculos de  $Nu_{L^*}$  son diferentes para convección natural y convección forzada.

**Convección natural**

Se supone que la disposición de la pieza de trabajo no tiene efecto específico sobre la convección natural. El número de Nusselt se calcula por (Bejan y Kraus, 1993).

$$Nu_{L^*} = 3.47 + 0.51 Re_{L^*}^{1/4}, (Pr \geq 0.7) \tag{5}$$

Donde  $Pr$  es el número de Prandtl y  $Ra_{L^*}$  es el número de Rayleigh.  $Ra_{L^*}$  es calculado por

$$Ra_{L^*} = \frac{g\beta(T_\infty - T_{wp})L^3}{\alpha\nu}, (0 < Ra_{L^*} < 108) \tag{6}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinética,  $\alpha$  difusividad térmica,  $\beta$  el coeficiente de

dilatación térmica volumétrica para el gas perfecto,  $T_\infty$  la temperatura atmosférica, y  $g$  es el coeficiente de gravedad.

**Convección forzada**

En este caso, existen diferentes métodos para calcular el número de Nusselt para una sola pieza de trabajo y una matriz de piezas de trabajo. Para una única pieza de trabajo, el número de Nusselt  $Nu_{L^*}$  puede ser calculado usando la siguiente ecuación experimental (Bejan e Kraus, 1993).

$$Nu_{L^*} = Nu_{L^*}^0 + \left[ 0.15 \left(\frac{p}{L^*}\right)^{1/2} Re_{L^*}^{1/2} + 0.35 Re_{L^*}^{0.566} \right] Pr^{1/3}, (0 < Re_{L^*} < 2 * 10^5, Pr > 0.7, 0 < \frac{C}{B} < 5) \tag{7}$$

Donde  $C/B$  es la razón de las longitudes axiales de la pieza de,  $p$  el perímetro máximo de la pieza de trabajo perpendicular a la dirección del flujo,  $Nu_{L^*}^0$  puede ser encontrado a partir de las tablas de referencia.

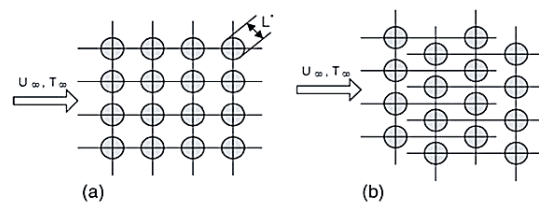
$$Re_{L^*} = \frac{U_\infty L^*}{\nu} \tag{8}$$

Donde  $U_\infty$  es la velocidad de flujo del gas atmosférico. es calculado por la Ec. (9):

$$U_\infty = \frac{\pi D_{fan}^2 H_{fan} R_{fan}}{4 A_{ws}} \tag{9}$$

Donde  $D_{fan}$ ,  $H_{fan}$ ,  $R_{fan}$ , son el diámetro, la altura y la velocidad de rotación del ventilador de circulación, y  $A_{ws}$  es el área de la carga orientada hacia la dirección del flujo de gas atmosférico.

Los cálculos del número de Nusselt, para cargas de piezas alineadas y escalonadas, como se muestra en la Fig. 2, se puede encontrar en (Bejan y Kraus, 1993).



**Figura 2.** Configuraciones de conjuntos de piezas de trabajo: (a) alineadas; (b) escalonada.

### Modelo de conducción

En el modelo de conducción, las piezas de trabajo se clasifican en dos categorías: de sección fina (capacitancia agrupada) y de sección cuadrada. El criterio de clasificación por número de Biot es:

$$Bi = \frac{h_{eff}}{\lambda_{wp}} \begin{cases} < 0.1 \text{ De seção fina} \\ \geq 0.1 \text{ Seção pesada} \end{cases} \quad (10)$$

Donde  $h = h_{conv} + h_{rad}$ ,  $\lambda_{wp}$  la conductividad térmica de limpieza de trabajo, y  $t_{eff}$  es el espesor equivalente.  $t_{eff}$  es determinado por la Ec. (11):

$$Bi = \begin{cases} \frac{3V}{A} \text{ esfera} \\ \frac{2V}{A} \text{ cilindro} \\ \frac{V}{A} \text{ lâmina} \end{cases} \quad (11)$$

Donde  $V$  y  $A$  son el volumen y el área de superficie externa de la pieza de trabajo.

Generalmente para convección,  $h_{conv}$  puede obtenerse a partir del modelo de convección. El coeficiente de radiación se define de la siguiente manera:

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon (T_{fce}^2 + T_i^2)(T_{fce} + T_i) \quad (12)$$

Aquí se utiliza el valor máximo entre  $h_{conv}$  e  $h_{rad}$ .

Para la capacitancia agrupada, la temperatura puede ser considerada uniforme durante todo el proceso, mientras que es necesario considerar la conducción dentro de una pieza de trabajo pesada seccionada. Se supone que la transferencia de calor de conducción ocurre sólo a lo largo de la dirección del espesor, es decir, la dirección radial de la esfera y del cilindro y la dirección del espesor a la placa. La temperatura es uniforme a lo largo de las otras direcciones.

Por lo tanto, la discretización de la pieza de trabajo es sólo una dimensión a lo largo de la dirección del grosor. El número de discretización  $n$  es el espesor equivalente  $t_{eff}$  dividida por el paso del elemento crítico  $t_{crit}$ , como mostrado en las Ec. (13) e (14).

$$n = \frac{t_{eff}}{t_{crit}} \quad (13)$$

$$t_{crit} = \frac{0.1}{h} \lambda_{wp} \quad (14)$$

La ecuación diferencial de Fourier y formas discretizadas de modelos de conducción para esfera, cilindro y placa se aplican. La convección y la radiación ocurren entre el horno y la superficie de las piezas de trabajo.

### Modelo de horno

El modelo del horno contiene el control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), cálculo de calor disponible para los hornos de gas y los términos de calor como entrada de calor por el ventilador de circulación, pérdida de calor de la puerta del horno y paredes, almacenamiento de calor En el horno Paredes y auxiliares y pérdida de calor por tubos de refrigeración para algunos hornos especiales. La entrada de calor eficaz es

$$Q_{ht} = K_{PID} K_{AH} Q_{gross} \Delta t \quad (15)$$

Donde  $K_{PID}$  es el coeficiente de control PID,  $K_{AH}$  el coeficiente de calor disponible para el horno a gas (para el horno eléctrico es 1.0), y  $Q_{gross}$  es la entrada de calor bruto.

El almacenamiento de calor en la pared del horno puede ser calculado por el balance de calor en el horno.

$$Q_{storage}^{m+1} = Q_{ht}^m - Q_{loss}^m - Q_{load}^m - Q_{cooling}^m - Q_{fan}^m \quad (16)$$

Donde  $Q_{loss}$  es la pérdida de calor,  $Q_{load}$  el almacenamiento de calor en la carga,  $Q_{cooling}$  la pérdida de calor por agua de enfriamiento o aire de enfriamiento, y  $Q_{fan}$  es la entrada de calor por el ventilador. En seguida, la temperatura del horno se calcula de la siguiente manera:

$$T_{fce}^{m+1} = \frac{Q_{storage}^{m+1}}{\sum_i^n n_{aux} w_i c_i} \quad (17)$$

Donde  $n_{aux}$  es el número total de paredes del horno y auxiliares,  $w_i$  y  $c_i$  son el peso y el calor específico de los auxiliares del horno, respectivamente.

### Integración de modelos de transferencia de calor

Finalmente, el modelo del horno, radiación, convección y modelos de conducción son integrados y el CHT-bf (Sistema de Planificación de Tratamiento por Calor Computadorizado) es desarrollado (Fig. 3), donde  $m$  es el número de iteración,  $\Delta t$  el intervalo de tiempo,  $t_{heating}$  el tiempo total del ciclo.

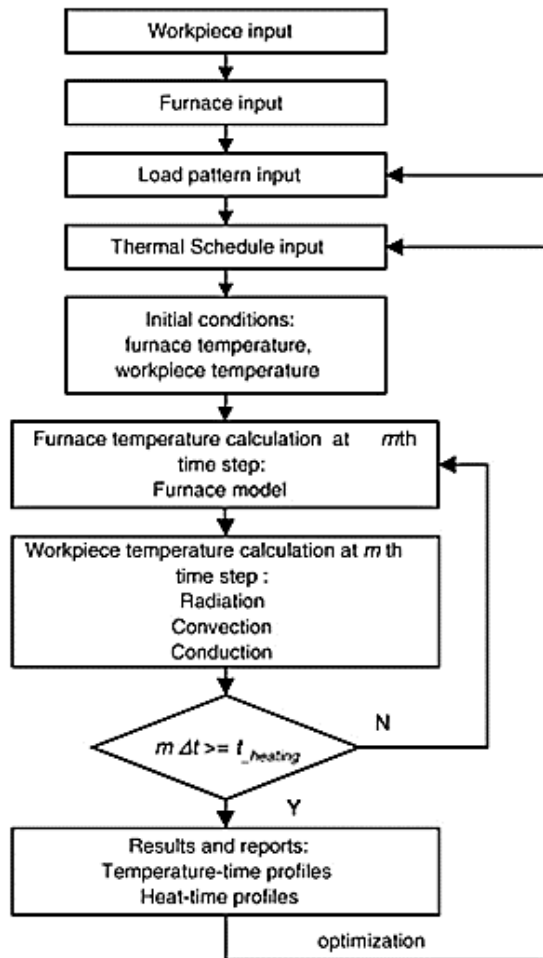


Figura 3. Flujoograma del sistema CHT-bf.

El cálculo se realiza por la iteración de la temperatura del horno en el paso  $m$ , temperatura de la pieza en el paso  $(m + 1)$  y temperatura del horno en el paso  $(m + 1)$ . En base a la comparación de resultados en diferentes condiciones, el patrón de carga y el calendario térmico pueden optimizarse mediante la comparación de los resultados calculados. Este procedimiento es una herramienta útil para optimizar el proceso, proporcionar sugerencias para nuevas

tareas y, a continuación, para crear nuevas tareas. Para mejorar el proceso de combustión utilizando enriquecimiento con oxígeno en hornos de recalentamiento se utilizará el cálculo de la temperatura adiabática de la llama.

### Análisis adiabático de la combustión "Temperatura de llama adiabática"

Para un buen número de aplicaciones de ingeniería, es deseable conocer la temperatura máxima que puede ser alcanzada por el proceso de combustión, esta temperatura se llama la temperatura de llama adiabática  $T_{af}$ . Se debe considerar un sistema para procesar un flujo constante y otro para un volumen constante. (Londoño, 2002).

### Combustión adiabática en flujo constante.

Para evaluar la temperatura de llama adiabática  $T_{af}$ , teóricamente, en un reactor de flujo estable, se asume.  $Q = 0$ , esto es,  $H_R = H_P$ , la ecuación de energía se aplica al gas perfecto y se expresa como:

$$\sum_P N_i (\Delta h_{f,298}^0 + h_T - h_{298})_i = \sum_R N_i (\Delta h_{f,298}^0 + h_T - h_{298})_i \quad (18)$$

Con base en el conocimiento de la temperatura inicial y la composición de los reactivos, en el lado derecho de la ecuación (18) puede evaluarse directamente. Los valores de  $\Delta h_{f,298}^0$  y  $h_{298}$  de los productos son conocidos. Los valores de los valores  $N_i$  de productos se pueden encontrar a partir de la ecuación de reacción estequiométrica. Por lo tanto, la única variable que debe determinarse en la ecuación (18) es la temperatura de llama adiabática  $T_{af}$ . La solución de la ecuación (18) es un proceso iterativo. La temperatura de llama adiabática para la combustión de hidrocarburos comunes, en la composición estequiométrica con aire presenta valores entre 2100 y 2400 K. La presencia de exceso de aire disminuye drásticamente el valor de  $T_{af}$ . Es decir, que la temperatura de llama adiabática depende del porcentaje de exceso de aire utilizado en el proceso de combustión (Londoño, 2002).

**Combustión adiabática a volumen constante**

La temperatura de llama adiabática  $T_{af}$  para combustión a volumen constante, se encuentra por un método similar al proceso en flujo continuo. La transferencia de calor es igual a cero en la ecuación del balance de energía,

$$0 = \sum_{P-R} N_i (\Delta h_{f,298}^0 + h_{T,P} - h_{298}^0)_i - \sum_{P-R} (N_i RT)_{gases} \tag{19}$$

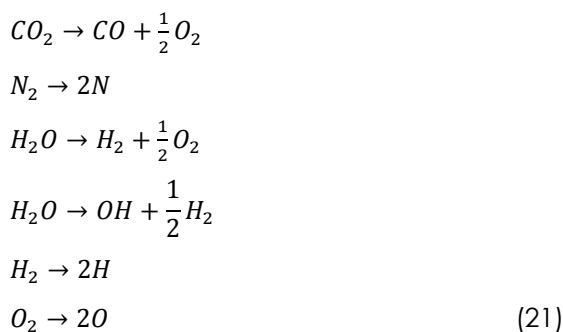
Equivalentemente, la ecuación (19) se aplica a las especies en estado de gas perfecto, y:

$$0 = \sum_{P-R} N_i (\Delta h_{f,298}^0 + u_{T,P} - u_{298}^0)_i - \Delta N RT_{298} \tag{20}$$

Donde  $\Delta N$  representa la diferencia entre el número de moles de los productos y los reactivos. La única diferencia entre las ecuaciones (19) y (20), es el uso de la entalpía y de la energía interna, respectivamente. En el caso de un gas perfecto la energía interna puede ser obtenida a partir de los valores de la entalpía proporcionados en las tablas de propiedades termodinámicas.

**Cálculo de la temperatura de llama adiabática.**

La temperatura de llama generalmente es de alrededor de 1644 K, los gases de combustión generalmente incluyen especies como:  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ , e  $O_2$  residual cuando la combustión es completa. Para temperaturas elevadas el fenómeno de disociación de los gases ocurre, las reacciones de disociación para los gases antes mencionados se muestran a continuación: (Londoño, 2002).

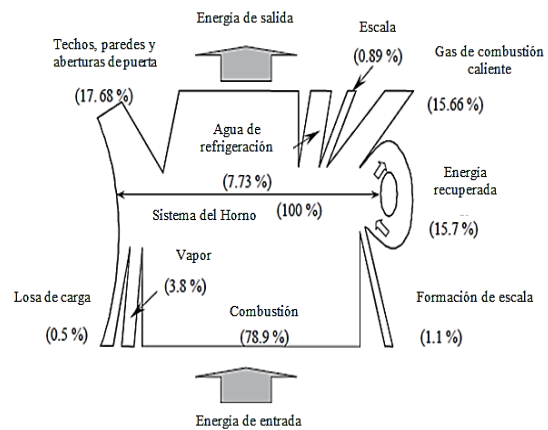


Estas reacciones de disociación consumen una gran cantidad de energía, y la temperatura de llama adiabática será menor que aquella determinada considerando combustión completa.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los modelos desarrollados en el presente estudio serán ajustados empleando factores multiplicadores para obtener resultados más cercanos a los experimentales.

Chen et al. (2005) en su trabajo de investigación "Análisis del consumo de energía y el rendimiento de los hornos de recalentamiento en un laminador en caliente". Halla la eficacia de intercambio de calor y recuperación de calor, en la cual ilustra que el gas de combustión caliente quita el 31,36% de la energía del sistema del horno. En otras palabras, cerca de un tercio del calor del sistema está contenido en el gas, que sale de los hornos. Por lo tanto, si uno es capaz de recuperar la energía del gas de combustión caliente lo suficiente, se puede ahorrar una gran cantidad de combustible.



**Figura 4.** Diagrama del balance de calor de la entrada de energía y la salida de energía del sistema del horno de recalentamiento (Chen et al., 2005).

**CONCLUSIONES**

Al aplicar los modelos basados en la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, nos va a permitir cuantificar el calor necesario para precalentar la carga, y el enriquecimiento con oxígeno mejorará la temperatura de

llama adiabática en la combustión; ambos métodos conllevarán a una reducción de la energía primaria (combustible) en los hornos de recalentamiento. Mediante el empleo del método numérico, se elucida que un rendimiento más alto de los hornos puede utilizar combustible y energía de manera más eficiente. En cuanto al balance térmico de los hornos, las mediciones prácticas sugieren que la recuperación de energía del gas de combustión caliente juega un papel notable en el manejo de la energía, ya que el calor recuperado aporta el 15,7% de la energía de entrada. Por otra parte, los análisis también indican que las eficiencias de intercambio de calor y recuperación de calor son 86,33% y 47,76%, respectivamente. Teniendo en cuenta las prestaciones de los hornos, en conjunto, una relación lineal entre el rendimiento y la eficiencia de rendimiento se exhibe marcadamente, de acuerdo con la energía de entrada o el tamaño de carga.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balbis, L.; Balderud, J.; Grimble, M. 2008. Control predictivo no lineal del horno de recalentamiento de losas de acero, en: Proc. De la Conferencia Americana de Control, pp. 1679-1683.
- Bejan, A. y Kraus, A. D. 1993. Transferencia de calor. Editorial John Wiley & Sons Inc. New York, EE.UU.
- Chakraborty, S.; Rajora, A.; Pal, S.; Talukdar, P. 2017. Transferencia de calor y modelado en fase discreta de la combustión del carbón en un horno de recalentamiento tipo empujador. Ingeniería Térmica Aplicada 116: 66-78.
- Chapman, K. S.; Ramadhani, S.; Viskanta, R. 1990. Modelado y estudios paramétricos de la transferencia de calor en un horno de recalentamiento de lote directo. Diario de Tratamiento Térmico 8(2): 137-146.
- Chapra, S. y Canale, R. 2006. Métodos numéricos para ingenieros. Editorial McGraw Hill. New York, EE.UU.
- Charles, E. 2003. Manual de Quemadores Industriales. Serie de Combustión Industrial. Editorial CRC Press LLC. New York, EE.UU.
- Chen, W. H.; Chung, Y. C.; Liu, J. L. 2005. Análisis del consumo de energía y el rendimiento de los hornos de recalentamiento en un laminador en caliente. Comunicaciones Internacionales en Calor y Transferencia de Masa 32(5): 695-706.
- DOE. 2007. Mejora del rendimiento del sistema de calefacción de procesos: Un libro de información para la industria. Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), Programa de Tecnologías Industriales, Asociación de Equipos de Calefacción Industrial, 2nd edición. EE.UU.
- Ge Song; Tor, B.; Jens, H.; Bjørn, M. 1997. Simulación de flujo de fluido y transferencia de calor por radiación gaseosa en un horno a gas natural, Int. J. Numer. Meth. Flujo de Fluido de Calor 7: 169-180.
- Halliday, W. 1990. Modelo de control por computadora para hornos de recalentamiento continuo, Metalurgia 10: 412 - 413.
- Helle, H; Helle, M; Pettersson, F; Saxen, H. 2010a. Optimización de las principales condiciones de reciclado de gas con alto enriquecimiento de oxígeno en el alto horno. ISIJ Internacional 50(7): 931-938.
- Helle, H; Helle, M; Pettersson, F; Saxen, H. 2010b. Optimización multiobjetivo de la fabricación de hierro en el alto horno con reciclado de gas superior. ISIJ Internacional 50(10): 1380-1387.
- Kang, J. y Rong, Y. 2006. Modelado y simulación de calentamiento de carga en hornos de tratamiento térmico. Revista de Tecnología de Procesamiento de Materiales 174(1-3): 109-114.
- Keramida, E.; Liakos, H.; Founti, M.; Boudouvis, A.; Markatos, N. 2000. Transferencia de calor radiativo en hornos a gas natural. Revista Internacional de Calor y Transferencia de Masa 43(10): 1801-1809.
- Kim, Y. D.; Kang, D. H.; Kim, W. S. 2009. Estudios experimentales y numéricos sobre el análisis térmico de la placa en el horno de tratamiento térmico continuo indirectamente encendido. Revista de Ciencia y Tecnología Mecánica, 23(3): 631-642.
- Kreuzer, D. R. y Werner, A. 2011. Implementación de modelos para procesos de recalentamiento en hornos industriales. pp. 376-387.
- Kiusalass, J. 2005. Métodos Numéricos en Ingeniería con MATLAB. Editorial Prensa Universitaria de Cambridge, Inglaterra.
- Ko, H.; Kim, J.; Yoon, T.; Lim, M.; Yang, D.; Jun, I. 2000. Modelado y control predictivo de un horno de recalentamiento, en: Proc. De la Conferencia Americana de Control, pp. 2725-2729.
- Liu, F.; Becker, H. A.; Bindar, Y. 1998. Un estudio comparativo de modelado de transferencia de calor radiativo en hornos de gas utilizando el gas gris simple y la ponderación de la suma de gases grises modelos. Revista Internacional de Calor y Transferencia de Masa 41(22): 3357-3371.
- Liu, M.S.; Choi, C.K.; Leung, C.W. 2001. Análisis de arranque de hornos de combustión de aceite - el método Monte Carlo modelo de suavizado, transferencia de masa de calor, 37: 449 - 457.
- Londoño, C. A. 2002. Combustión de carbón. Editorial Medellín, Colombia. 2: 27-50.
- Marlow, D. O. 1996. Modelado de hornos de recocido directo para operaciones transitorias. Modelado Matemático Aplicado 20(1): 34-40.
- Martín, E.; Meis, M.; Mourenza, C.; Rivas, D.; Varas, F. 2012. Solución rápida de problemas de diseño directo e inverso relativos a las condiciones de



- operación del horno en la industria siderúrgica. *Ingeniería Térmica Aplicada* 47: 41–53.
- Martín, M.; Rendueles, M.; Díaz, M. 2005. Transferencia de Masa de Acero-Escoria en Conversores de Acero, Inferior y Superior / Inferior Combinado Soplando a través de Experimentos de Modelo Frío. *Investigación y Diseño en Ingeniería Química* 83(9): 1076–1084.
- Milosevic, H.; Stevovic, S.; Petkovic, D. 2011. Simulación numérica de la interacción durante el golpe superior en un convertidor de fabricación de acero. *Revista Internacional de Calor y Transferencia de Masa* 54(19): 4275–4279.
- Mullinger, P. y Jenkins, B. 2014. *Hornos Industriales y de Proceso, Principios, Diseño y Operación*. Oxford, Inglaterra.
- Nguyen, X. M.; Ayerbe, P. R.; Dumur, D.; Lawayeb, F.; Mouchette, A. 2012. Modelo distribuido de control predictivo del horno de recalentamiento de placas de acero. Volúmenes de los Procedimientos de la IFAC (IFAC-PapersOnline), pp 175–180.
- Otto, S. y Denier, J. 2005. *Introducción a la programación y métodos numéricos en MATLAB*. Editorial Springer. London, Inglaterra.
- Steinboeck, A.; Graichen, K.; Wild, D.; Kiefer, T.; Kugi, A. 2011a. Planificación de la trayectoria basada en modelos, optimización y control de lazo abierto de un horno de recalentamiento de planchas continuas. *Diario de Control de Procesos* 21(2): 279–292.
- Steinboeck, A.; Wild, D.; Kugi, A. 2011b. Control de seguimiento de realimentación de hornos de recalentamiento continuos. *IFAC* 18: 223–241
- Steinboeck, A.; Wild, D.; Kugi, A. 2013. Control energético de los hornos de recalentamiento continuo. *IFAC* 15: 156–168
- Steward, F. R. y Cannon, P. 1971. El cálculo del flujo de calor radiactivo en un horno cilíndrico utilizando el método de Monte Carlo. *Revista Internacional de Calor y Transferencia de Masa* 14(2): 245–262.
- Trinks, W.; Mawhinney, M.; Shannon, R.; Reed, R.; Garvey, J. 2004. *Hornos Industriales*. Editorial John Wiley & Sons, Inc. New York, EE.UU.
- Winkler, F. y Lohmann, B. 2010. Diseño de una estructura de control de desacoplamiento para PDE hiperbólicas de primer orden con acción de control distribuido, en: *Proc. De la Conferencia Americana de Control*
- Yang, Y. y Lu, Y. 1998. Control de optimización basado en modelos dinámicos para hornos de recalentamiento. *Computadoras en la Industria* 10(1): 11–20.
- Yang, Z. y Luo, X. 2015. Valores de ajuste óptimos del modelado de zonas en la simulación de un horno de recalentamiento tipo viga de marcha sobre el régimen de funcionamiento en estado estacionario. *Ingeniería Térmica Aplicada* 101: 191–201.
- Yang, W., Cao, W.; Chung, T.; Morris, J. 2005. *Métodos numéricos aplicados con MATLAB*. Editorial John Wiley & Sons. New Jersey, EE.UU.
- Zashkova, L. 2008. Modelado matemático del comportamiento térmico en los hornos cerámicos de cámara a diferentes curvas de cocción a temperatura. *Práctica y teoría de la simulación* 16(10): 1640–1658.
- Zhang, Y.; Li, S. 2007. Control predictivo de modelos en red basado en la optimización de vecindarios para procesos en serie conectados en serie, en: *Proc. De la Conferencia Americana de Control*. pp. 37–50.