

# FIMAQ

## Investigación y Docencia

### LA ENERGÍA QUÍMICA EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Donoso Quimbita Caterine Isabel  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador  
Departamento de Energía y Mecánica/Carrera de Ingeniería Petroquímica  
cidonoso@espe.edu.ec

#### Resumen Gráfico



#### Resumen

El incremento de la demanda energética por parte de los procesos industriales ha motivado a desarrollar tecnologías que de manera eficiente optimicen reacciones químicas tradicionales como la combustión. Este manuscrito muestra cómo incrementa la difusión de un gas como el oxígeno al ser inyectado a velocidades supersónicas dentro de un líquido, en este caso el acero para reaccionar exotérmicamente con el carbono presente en el mismo y aportar energía química al proceso de fusión.

*Palabras Clave:* energía. combustión. alternativa.

#### 1.0 Introducción

Una elevada demanda energética en una planta industrial exige procesos productivos eficientes, que consideren la implementación de alternativas energéticas más económicas. Este es el caso de la reacción de combustión, que actualmente emplea oxígeno gaseoso a presiones supersónicas para el aporte energético a los procesos.

Los procesos industriales que usan con mayor frecuencia las reacciones de oxidación como aporte energético son: centrales eléctricas, cementeras, fundición, incineración, refinación y centrales térmicas.

El presente estudio pretende de manera general valorar el aporte energético de la reacción de combustión respecto al costo del uso de la energía eléctrica en el proceso de fusión de acero. Para los cálculos no se ha considerado la calidad del acero producido como una de las variables.

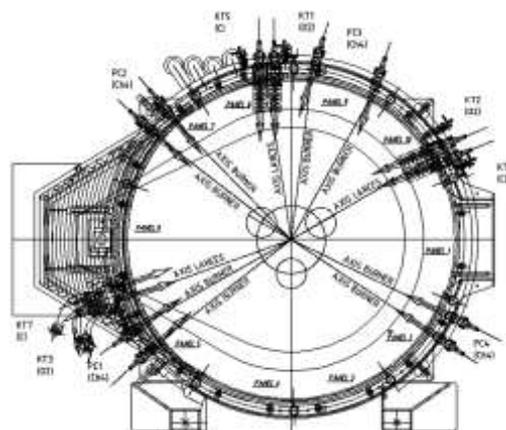
La demanda energética del proceso es de aproximadamente 1698 kWh/t, mientras que la energía generada durante la reacción de combustión es de

2605.6 kWh/t sin considerar pérdidas. Con base en estos resultados se evidencia la rentabilidad de sustituir la energía eléctrica por química a pesar que las pérdidas del insumo en este proceso industrial son del 20%.

## 2.0 EXPERIMENTACIÓN

El levantamiento de la línea base del proceso productivo permite identificar las restricciones propias del proceso de fusión, e identificar posibles fuentes energéticas que sustituyan a la energía eléctrica de manera rentable. Las fuentes energéticas alternativas deben propiciar reacciones químicas exotérmicas con un considerable aporte energético para que se pueda aprovechar en los procesos productivos.

Una colada, es el término empleado para expresar las toneladas de acero líquido producidas durante el proceso de fusión de una carga de chatarra alimentada al horno de arco eléctrico (EAF) por sus siglas en inglés. En el interior de la cuba del EAF existen puntos fríos, denominados así porque respecto a los puntos donde penetran los electrodos dentro del baño de acero, estas zonas tienen menor temperatura. La solución tecnológica a este inconveniente y que permite mantener homogénea la temperatura en todo el baño de acero es la ubicación de lanzas supersónicas que inyectan oxígeno a flujos de 1600 Nm<sup>3</sup>/h junto con antracita de insuflar. En la Figura 1 se observa una vista superior de la cuba de un EAF y su equipamiento químico, perteneciente a la empresa AMSTEEL del sur-este de Asia.



**Figura 1.** Equipamiento químico multiposiciones del sistema de inyección AMSTEEL

El equipamiento químico que se observa en la Figura 1, consta de 4 sistemas de inyección, que apuntan hacia el interior del horno, en los puntos donde no

hay emisión de energía debido a la radiación del arco eléctrico. La energía química generada por la combustión de la antracita y el oxígeno con 99,99% de pureza. Este equipamiento es el responsable de la combustión, sin embargo, como esta reacción no es totalmente eficiente el monóxido de carbono (CO) generado es sometido a un proceso de postcombustión para ser transformado en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), empleando equipamientos más pequeños ubicados en la parte superior del horno, asemejándose a cámaras de post-combustión. El aporte energético de esta reacción es aprovechado durante el proceso de alimentación de chatarra fría al horno para realizar el pre-calentamiento de la misma.

El análisis químico de la antracita, se lo realiza empleando la técnica analítica de carbono fijo (ASTM D-3172), cenizas (ASTM D3174, ISO 1171) y volátiles (ASTM 3175, ISO 562). Con esta técnica se puede determinar la concentración de carbono fijo presente en la antracita que va a reaccionar exotérmicamente con el oxígeno. Las cenizas y los volátiles son consideradas impurezas de la antracita debido a que no intervienen en la reacción de oxidación.

En la Tabla 1, se observan los flujos másicos de una carga promedio por colada de antracita, fundentes, chatarra metálica reciclada y oxígeno necesarios para el proceso de fusión de 36 toneladas de acero líquido. El valor promedio de los flujos másicos se obtuvo al procesar estadísticamente la información de 1042 coladas.

**Tabla 1** Consumo promedio de Insumos por colada durante el proceso de fusión

<b>INSUMOS</b>	<b>(kg/min)</b>
Chatarra Reciclada	316,4
Antracita de Carga	7,2
Oxígeno	11,3
Cal Siderúrgica	21,6
Briquetas de MgO	5,4
Antracita de Insuflar	8,6

En cada colada, los flujos másicos de los insumos que se muestran en la Tabla 1 se han obtenido de lecturas directas arrojadas por el sistema de procesamiento de datos VM2 de la empresa AMI, dichos datos son adquiridos de balanzas ubicadas bajo las tolvas desde las que se dosifica el material, en

el caso del oxígeno el flujo másico es una medida indirecta de la presión en la línea, la misma que se mantiene entre 5.5 y 6 bar.

Para el cálculo de la cantidad de carbono total que reacciona con el oxígeno durante la combustión, se ha considerado todos los tipos de antracita mencionados en la Tabla 1 y su respectivo contenido de carbón fijo.

### 3.0 CÁLCULOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1 Cálculos

La simbología empleada es la siguiente:

$\Delta H$ : Variación de entalpía

$\Delta H_f$ : Entalpía de formación

$\Delta H_{Rx}$ : Entalpía de reacción

$C_p$ : Capacidad calorífica a presión constante

$m$ : flujo másico

EAF: Electric Arc Furnace, horno de arco eléctrico

A continuación, se detalla los cálculos realizados para cuantificar la demanda de energía eléctrica del proceso de fusión de acero, considerando la cantidad de energía eléctrica necesaria para fundir una tonelada de chatarra, de fundentes, y de antracita.

#### 3.1.1 Energía eléctrica necesaria para fundir una tonelada de chatarra

La chatarra metálica es la principal materia prima para la fabricación del acero, alrededor del 85% del consumo total de energía eléctrica está dispuesto para esta actividad [7].

A continuación, se muestra la entalpía de formación del hierro y la capacidad calorífica de las diferentes estructuras cristalinas a presión constante: [9]

$$\frac{\Delta H_f(\text{Fe})}{m} = 3560 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad \text{a} \quad T_f = 1530^\circ\text{C} (1803 \text{ K}) \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$C_p(\text{Fe}, \alpha) = 4.13 + 0.00638 T \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \quad (273 \text{ a } 1041) \text{ K} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$C_p(\text{Fe}, \beta) = 6.12 + 0.00336 T \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \quad (1041 \text{ a } 1179) \text{ K} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$C_p(\text{Fe}, \gamma) = 8.40 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \quad (1179 \text{ a } 1674) \text{ K} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$C_p(\text{Fe}, \delta) = 10 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \quad (1674 \text{ a } 1803) \text{ K} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$C_p(\text{Fe}, l) = 8.15 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \quad (1803 \text{ a } 1923) \text{ K} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

La cantidad de energía eléctrica necesaria para fundir una tonelada de chatarra se determina usando (1), esto es, el sumatorio de entalpías resultantes de la variación de la temperatura de las estructuras cristalinas del hierro: ferrita, perlita, austenita y la entalpía de formación del hierro.

$$\frac{\Delta H(\text{Fe})}{m} = \Delta H_{\text{Fe}\alpha} + \Delta H_{\text{Fe}\beta} + \Delta H_{\text{Fe}\gamma} + \Delta H_{\text{Fe}\delta} + \Delta H_{\text{Fe}l} + \Delta H_{\text{f}(\text{Fe})} \quad (1)$$

De manera individual se determina la variación de entalpía de cada una de las estructuras del hierro presentes, considerando la variación de temperatura (2)-(6).

$$\frac{\Delta H_{\text{Fe}\alpha}}{m} = C_p(\text{Fe}, \alpha) * \Delta T \quad (2)$$

$$\frac{\Delta H_{\text{Fe}\beta}}{m} = C_p(\text{Fe}, \beta) * \Delta T \quad (3)$$

$$\frac{\Delta H_{\text{Fe}\gamma}}{m} = C_p(\text{Fe}, \gamma) * \Delta T \quad (4)$$

$$\frac{\Delta H_{\text{Fe}\delta}}{m} = C_p(\text{Fe}, \delta) * \Delta T \quad (5)$$

$$\frac{\Delta H_{\text{Fe}l}}{m} = C_p(\text{Fe}, l) * \Delta T \quad (6)$$

### 3.1.2 Energía eléctrica necesaria para fundir una tonelada de fundentes

Mediante una revisión bibliográfica se obtiene las entalpías de formación y capacidad calorífica a presión constante, de los fundentes empleados en el proceso de fusión [9]: óxido de calcio y óxido de magnesio en presencia de sílice.

$$\frac{\Delta H_{\text{f}(\text{CaO.MgO}.2\text{SiO}_2)}}{m} = 18200 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad \text{a } T_{\text{f}} = 1392 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$C_p(\text{CaO.MgO}.2\text{SiO}_2) = 54.46 + 0.005746T - \frac{1500000}{T^2} \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

La cantidad de energía eléctrica necesaria para fundir una tonelada de fundentes se determina usando (7), esto es, el sumatorio de la entalpía resultante de la variación de temperatura y la entalpía de formación.

$$\frac{\Delta H_{(\text{CaO.MgO:2SiO}_2)}}{m} = \Delta H_{f(\text{CaO.MgO:2SiO}_2)} + \Delta H_{(\text{CaO.MgO:2SiO}_2)} \quad (7)$$

### 3.1.3 Energía eléctrica necesaria para fundir una tonelada de antracita

Usando (8) se establece la demanda energética por cada tonelada de antracita, esta considera tanto la entalpía de formación de la antracita, así como la capacidad calorífica a presión constante.

$$\frac{\Delta H_A}{m} = \Delta H_A + \Delta H_{f(A)} \quad (8)$$

La entalpía de formación de la antracita al igual que las otras sustancias químicas, se lo obtiene bibliográficamente.

$$\frac{\Delta H_{f(A)}}{m} = 0.387 \frac{\text{cal}}{\text{g}^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

### 3.1.4 Energía química entregada por la reacción de combustión

Para determinar la cantidad de energía química entregada por la reacción de combustión generada entre la antracita de insuflar y de carga, junto con el oxígeno inyectado a velocidades supersónicas, se debe considerar que los productos de la reacción serán en un 10% CO y en un 90% CO<sub>2</sub> [1].

Las constantes termodinámicas que consideran la entalpía de formación del monóxido y dióxido de carbono son:

$$\Delta H_{f\text{CO}} = -26416 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

$$\Delta H_{f\text{CO}_2} = -94052 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad (\text{Perry, et al., 2001})$$

Usando (9) se va a determinar la entalpía de reacción.

$$\Delta H_{\text{Rx}} = \Delta H_{f \text{ productos}} - \Delta H_{f \text{ reactivos}} \quad (9)$$

Durante la fusión del acero se produce como resultado de una combustión completa el 10% de CO<sub>2</sub>, usando (10). El 90% restante de CO generado, es sometido a un proceso de post-combustión para generar exotérmicamente energía química, usando (11).





Aplicando cálculos termoquímicos se puede determinar la cantidad de energía generada por tonelada de antracita alimentada, considerando un 86% de pureza de esta materia prima [7].

$$0.1 * \left( \Delta H_{fCO_2} \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) + 0.9 * \left( \Delta H_{fCO} \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) = 33179.6 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad (12)$$

Por tanto, la cantidad de energía proporcionada por la reacción exotérmica es suficiente para satisfacer la demanda energética de la fundición de chatarra, fundentes y antracita. Sin embargo, se debe considerar que la reacción no es eficiente en su totalidad, las pérdidas de masa debido a la extracción del material fino por la planta de humos, la granulometría fuera de especificación y la pureza de la materia prima disminuyen hasta en un 20% la generación de energía. A pesar de estas restricciones es evidente el beneficio económico que genera el aprovechamiento químico.

### 3.2 Resultados

La demanda energética del proceso de fusión considerando el consumo de energía necesario para fundir una tonelada de chatarra, fundentes y antracita es de 1698 kWh/t.

Considerando un contenido de carbono fijo promedio en la antracita del 86%, y un 20% de pérdidas en el proceso, la reacción de combustión genera 1792 kWh/t.

Mediante un análisis estequiométrico usando (10) y (11), se determina que por cada kilogramo de carbono se requiere para la combustión 1,03 Nm<sup>3</sup> de oxígeno.

### 4.0 CONCLUSION

Se ha demostrado la rentabilidad de las reacciones exotérmicas para aprovechar su aporte energético en los procesos de producción, principalmente en las etapas de pre-calentamiento, sin embargo, las particularidades de cada proceso productivo, generan restricciones que

determinan el porcentaje viable de sustitución de la energía eléctrica por otra fuente alternativa de energía.

Estudios futuros podrían considerar como fuentes de energía en lugar de la antracita los desechos industriales no contaminantes ricos en celulosa y evaluar el aporte energético de la reacción de oxidación.

## Referencias

- [1] Enríquez, J., Tremps, E., Fernández, D., & De Elío, S. (2009). *Acería Eléctrica. Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I.* Madrid, España: Creative Commons.
- [2] Abubakre, O., & Muriana, R. (2009). Mathematical model for optimizing charge and heel levels in steel remelting induction furnace for foundry shop. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 425.
- [3] Arbones, E. (1989). *Optimización Industrial I: distribución de recursos.* Barcelona: Marcombo S.A.
- [4] EKOS. (2013). Recuperado el 29 de julio de 2014, de <http://www.ekosnegocios.com/revista/pdfTemas/752.pdf>
- [5] Fook, L., Chung, P., Wai, C., Memoli, F., & Negru, O. (2007). The practice of Carbon Injection and Post Combustion in order to achieve a metallic yield recovery in the Electric Arc Furnace: the experience of Amsteel Mills (Malaysia).
- [6] Geoffrion, A. (1972). Generalized benders decomposition. *Journal of optimization theory and applications*.
- [7] Gottardi, R., Miani, S., & Partyka, A. (2008). The hot metal meets the electric arc furnace steelmaking route. *Archives of Metallurgy and Materials*, 518-521.
- [8] Jiménez, A. (2003). *Diseño de procesos en Ingeniería Química.* Celaya: REVERTÉ S.A.
- [9] Perry, R., Green, D., & Maloney, J. (2001). *Manual del Ingeniero Químico.* Madrid: McGraw-Hill.
- [10] Sandberg, E. (2005). *Energy and scrap optimisation of electric arc furnaces by statistical analysis of process data.* Lulea, Suecia: Lulea University of Technology.
- [11] Schacht, C. (2004). *Refractories Handbook.* New York: Marcel Dekker.
- [12] World Steel Association, & MATTER. (2012). World Steel Association. Obtenido de [www.steeluniversity.org](http://www.steeluniversity.org)



**Caterine Donoso** recibió el título de Ingeniera Química por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, en 2010. En el año 2016 recibió el título de Magister en Calidad, Seguridad y Ambiente.