

# Factores que Afectan el Consumo Total de Energía en los Hornos de Arco Eléctrico

Wayne Adams\*  
Said Alameddine\*\*  
Ben Bowman\*\*\*  
Nicolás Lugo\*  
Stefan Paege\*\*  
Paul Stafford\*\*

## Introducción

La energía que consume el Horno de Arco Eléctrico (HAE) tiene diferentes fuentes u orígenes. Además de la energía eléctrica, que es la componente principal hoy en día, otra componente importante de este proceso está constituido por la energía química producida por las reacciones exotérmicas de la oxidación del carbón, combustibles fósiles y algunos metales. Debido a que el costo y disponibilidad de los energéticos varía de una región a otra, es responsabilidad de la gerencia de operación determinar las diferentes proporciones de energía química y eléctrica que se utilicen en cada proceso en particular. Para efecto de comparación entre hornos, tiene mayor sentido hablar sobre el *consumo total de energía*. Para cumplir con este propósito, es necesario convertir la energía no-eléctrica consumida por el HAE a su equivalente en kilo-vatios-hora (kWh), debido a nuestra familiaridad con este parámetro, aunque reconocemos que este no es parte del sistema MKS.

Para hacer énfasis en la alta variabilidad en la eficiencia térmica hemos escogido los *equivalentes térmicos totales* de las diferentes formas de energía química utilizadas en el Horno de Arco Eléctrico. Por otro lado, para cuantificar la energía eléctrica, la práctica usual es que esta se mida en el primario del transformador del horno. Para cuantificar la energía química en cambio, se tienen que realizar otras consideraciones más cuidadosas.

Existen grandes variaciones en el consumo total de energía en las diferentes operaciones de hornos. El propósito de esta presentación es tratar de explicar algunas de estas variaciones y las modificaciones necesarias en las prácticas y equipo de producción que conduzcan a una reducción del consumo total de energía.

Palabras clave: Hornos de Arco Eléctrico, Energía, Factores Equivalentes.

Paper to be presented at the XXXV Steelmaking Seminar, May 17 to 19, 2004 - Salvador - BA - Brazil

\* UCAR Carbon Company Inc., PO Box 1044, Clarksville, TN 37041-1044. Tel: 931-552-5100

\*\* UCAR SA, 17 Route de Palletex, 1163 Etoy, Switzerland: Tel: (41 21)-821-3111

\*\*\* UCAR Carbon Company Inc., 12900 Snow Road, Parma, OH 44130: Tel: 216-676-2167

Traducido por Hiroshi Sawabe – UCAR Carbón Mexicana, S. A. De C. V.

Correo electrónico: nombre.apellido@graftech.com

## Equivalentes eléctricos (kWh) de energía química

**Gas Natural.-** El calor (energía) producido por el gas natural tiene una ligera variación de una área a otra debido a que su composición varía de una región a otra en el mundo, el rango es de 9 a 12 kWh/ Nm<sup>3</sup> (1). Aquí utilizaremos un valor promedio de **10.5 kWh/ Nm<sup>3</sup>** de gas.

Para una combustión estequiométrica, se requieren alrededor de 2.0 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub> por cada Nm<sup>3</sup> de gas. En muchos hornos que utilizan quemadores se tiene un solo medidor que cuantifica el consumo combinado del oxígeno total utilizado por los quemadores y la(s) lanza(s), Por lo que es necesario separar el consumo de cada uno de ellos. Puesto que se consumen 2 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub> por cada m<sup>3</sup> de gas, cualquier cantidad en exceso que pase por el quemador, se cuenta como oxígeno en lanza.

**Propano (Gas LP).-** El calor producido por el gas LP es de 8.0 kWh/litro, debido a su característica de alta pureza, este valor es constante en todo el mundo. Para su completa combustión, se requieren de 1.5 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> por cada litro.

**Combustóleo.-** Como con el Gas Natural, el calor producido por el combustóleo es variable, debido a sus diferentes composiciones, el rango está comprendido entre 10 a 12 kWh/litro. Utilizaremos un promedio de **11.0 kWh/litro** de este combustible. Para su combustión, se requieren 2.0 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> por cada litro.

**Oxígeno en Lanza.-** El propósito del oxígeno inyectado a través de lanzas es para que reaccione con los materiales cargados, principalmente Carbón, Fe y las pequeñas cantidades de Mn y Si contenidos en la chatarra. La práctica más común en los HAE es cargar chatarra, carbón y aditivos formadores de escoria. Se Considerará un análisis químico típico de la chatarra para estimar el calor producido por las reacciones con el oxígeno inyectado. Para aquellos hornos que reemplazan parte de la chatarra, por arrabio, material prerreducido ó metal caliente, se hará un análisis por separado por las diferentes reacciones químicas.

Las reacciones metálicas exotérmicas han sido evaluadas partiendo del análisis típico de la escoria. Estas reacciones producen los contenidos de FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y MnO en la escoria. ( Se consideró que el 50% de SiO<sub>2</sub> en la escoria proviene de los refractarios). El análisis está basado en los datos tomados de un Horno de 100 toneladas (t) de carga, aplicando 25 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/t vía lanza supersónica. Se consideró un carbón total, cargado e inyectado, de: 10 kg/t, y 2 kg/t del contenido de carbón en la chatarra y el equivalente de 2 kg/t de carbón debido a material orgánico en la chatarra. Se consideró que solo se obtiene CO como resultado de las reacciones del carbón.

**Tabla 1: Energía calculada aplicando 25 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/t por lanzas ( Horno de 100 t)**

	kWh/t
C + 0.5 O <sub>2</sub> = CO	35.9
Fe + O = FeO	40.3
2 Fe + 1.5 O <sub>2</sub> = Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.2
Si + O <sub>2</sub> = SiO <sub>2</sub>	25.4
Mn + 0.5 O <sub>2</sub> = MnO:	13.5
Total	131.3
	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>
<b>Energía equivalente al O<sub>2</sub></b>	<b>5.2</b>

En este estimado del equivalente energético del oxígeno una cantidad considerable de energía se relaciona a materiales diferentes al carbón; de aquí la importancia del análisis de la chatarra, frecuentemente desconocido ó inconsistente.

Nótese que el equivalente energético del oxígeno frecuentemente se considera muy por debajo de 5.0 kWh/m<sup>3</sup>; nosotros en el pasado utilizamos 4.0 kWh/m<sup>3</sup>. Sin embargo, en un análisis de los datos de 20 hornos en Japón, en los años 80, Inagaki y otros <sup>(2)</sup> llegaron a la conclusión de que el equivalente energético del oxígeno era de 6.8 a 4.7 kWh/m<sup>3</sup> utilizando 15 y 30 m<sup>3</sup>/t respectivamente. Los valores en el rango de 3.5 a 4.0 se deben a la eficiencia térmica considerada entre 70 a 80 % si el valor de 5.2 representa el equivalente total.

**Arrabio, Arrabio Líquido y Hierro Esponja.-** Una cantidad considerable de hornos utilizan como carga, algo de arrabio frecuentemente en combinación con materiales prerreducidos en conjunto con la chatarra. El análisis de estos materiales, es tan distinto al de la chatarra como para justificar un diferente equivalente energético, positivo para el arrabio pero negativo para el hierro esponja (DRI). Algunos hornos utilizan un porcentaje considerable de arrabio líquido como material de carga.

**Arrabio (sólido).-** La energía requerida por el arrabio comparada con la de la chatarra, se basa en su contenido de silicio (~0.8%), manganeso (~0.5 %) y la energía de solución del carbón (0.6 kWh/kg). Utilizamos el equivalente de 1.1 kWh/t por cada 1% de reemplazo, en lugar de chatarra. Además de la contribución energética, el carbón contenido en el arrabio se cuantifica como cualquier otro carbón; y su energía equivalente se obtiene al reaccionar con el oxígeno de la lanza.

**Arrabio (líquido).-** Usando arrabio líquido en la carga las reacciones con el silicio, el manganeso y el carbón son más exotérmicas ya que se inician a más alta temperatura inicial, además del contenido calórico físico del metal líquido. El rango de temperatura del metal cargado en un horno de arco eléctrico es entre 1150° y 1350° C. En este rango de temperaturas el contenido calórico es entre 223 y 272 kWh/t, que representa un promedio de 2.48 kWh/t por cada 1% de adición de reemplazo, en lugar de chatarra.

La contribución energética del Silicio y el Manganeso contenido en el metal caliente, contribuyen con 1.40 kWh/t por cada 1% de reemplazo de chatarra. Típicamente, el contenido de Carbón en el rango de 4.2 a 4.3%, libera también más energía por la misma razón y la eficiencia de la reacción  $C+0.5 O_2 = CO$  se mejora en alrededor de 0.5 kWh/kg C. Adicionalmente, se suma la energía de solución del carbón, del orden de 0.6 kWh/kg. Por lo tanto, el carbón caliente, contribuye con 1.1 kWh/kg equivalente a 0.6 kWh/t por cada 1 % de adición de metal caliente. Así, la contribución neta total del metal líquido, es: 2.48 + 1.40 + 0.6 □□□□ kWh/t por cada 1% de reemplazo en lugar de chatarra. Este valor depende directamente de la temperatura a la cual el metal es cargado y del contenido de Silicio.

Las Energías resultantes que se han reportado al usar metal caliente caen en el rango entre 3.5 a 5.6 kWh/t por cada 1% de reemplazo de chatarra como material de carga <sup>(3,4,5)</sup>. Los valores reportados arriba de 5 kWh/t, han sido, ya sea por temperaturas mayores (1350° C <sup>(3)</sup>) ó contenidos de silicio también mayores (1.0 % <sup>(4)</sup>).

**Hierro Esponja (DRI).-** Para el hierro esponja, y briquetas de hierro (DRI y HBI) la energía adicional es debido al contenido de ganga, Fe sin reducir y adición extra de cal. Los detalles para el cálculo de la energía adicional requerida para fundir los materiales prerreducidos (DRI y HBI) se pueden consultar en la referencia (6). Para una metalización típica de 92 – 93 % con 4 – 5 % de ganga, usamos un equivalente de -1.0 kWh/t por

cada 1% de reemplazo de chatarra. Para DRI y HBI con baja metalización y con contenidos de ganga muy ácida, la energía adicional requerida por cada 1 % de reemplazo de chatarra puede llegar a valores mayores que **-2.0 kWh/t**.

La alimentación de hierro esponja (DRI) caliente es un desarrollo reciente aplicado en algunos hornos <sup>(7)</sup> el ahorro de energía que se ha obtenido en las primeras pruebas oscila entre 20 y 40 kWh/t. Estos números se obtuvieron utilizando comparando los consumos de energía para una mezcla de 50% DRI caliente y 50% chatarra contra el consumo típico para esta mezcla de carga utilizando 50% de hierro esponja a temperatura ambiente.

### **La distribución del consumo total de energía entre los diferentes Hornos**

De acuerdo a la información recabada de nuestro trabajo de Servicio Técnico de muchos hornos eléctricos en el mundo, se ha estructurado una base de datos técnicos con los valores del consumo total de energía. Como se mencionó anteriormente, se requiere la conversión de la energía no-eléctrica a su equivalente en kWh para que la comparación tenga sentido. El resumen es el siguiente:

**Tabla 2: Equivalentes Energéticos**

O <sub>2</sub> lanceado o inyectado	+5.2 kWh por Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Gas Natural por quemadores	+10.5 kWh por Nm <sup>3</sup> gas (con 2.0 Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> )
Gas Propano	+8.0 kWh por l (con 1.5 Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> )
Combustóleo	+11 kWh por l (con 2.0 Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> )
Arrabio	+1.1 kWh por cada 1 % de reemplazo de chatarra
Hierro Prerreducido (DRI)	-1.0 kWh por cada 1 % de reemplazo de chatarra
Arrabio caliente (1150–1350° C)	+4.5 kWh por cada 1 % de reemplazo de chatarra
DRI. caliente	+30 kWh/t reemplazo por frío, (50% DRI )

Estos equivalentes energéticos no son absolutos; se han escogido valores típicos. Es importante resaltar que en nuestros análisis, utilizamos siempre los mismos valores para todos los hornos. De tal manera que si nuestros equivalentes no son precisos, *la comparación entre diferentes hornos*, es útil, bajo la misma referencia. Solo en casos extremos, por ejemplo con altos porcentajes de Arrabio, Hierro Esponja, o metal caliente, la comparación podría ser cuestionable. Afortunadamente, son pocos los casos existentes.

El siguiente histograma muestra la distribución de la energía total (kWh/TAL) de nuestra base de datos para hornos con una productividad mayor a 80 t/h:

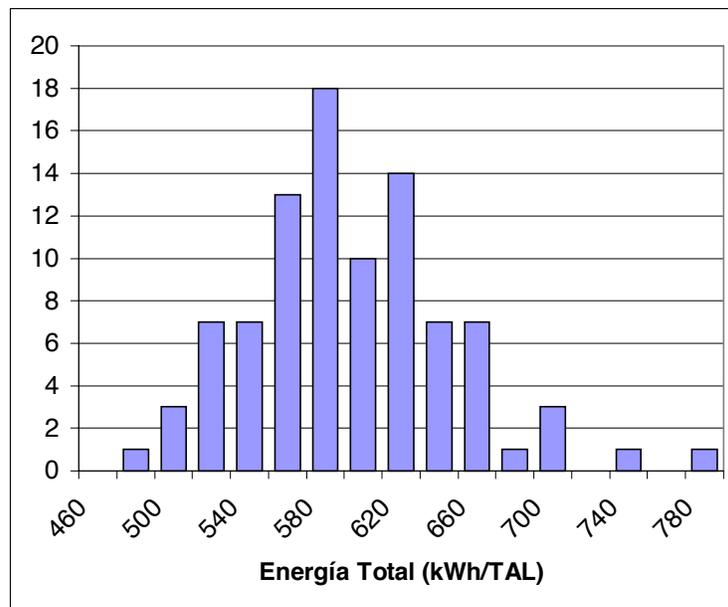


Fig. 1

La distribución es aproximadamente normal (Gaussiana), con una media de **583 kWh/t** y una desviación estándar de 49 kWh/t. El valor mínimo es alrededor de **480**. Solamente 4 de los 92 de esta muestra logran un consumo de energía total por abajo de 500 kWh/t.

Hay que tener mucha precaución de no tomar literalmente la descripción Gaussiana. Por ejemplo, no debemos concluir que un horno podría operar a valores de energía de 3 desviaciones estándar debajo del promedio (426 kWh/t)

### **Factores que afectan el consumo de energía**

Existen muchos factores que afectan al consumo de energía; los principales están relacionados con los materiales de carga y la práctica del horno, aunque también son importantes algunos de los parámetros de diseño del horno. La existencia de tantos parámetros involucrados – más de 10 – y que varios de ellos no son cuantificados o medidos adecuadamente dificulta el análisis estadístico de éstos. Probablemente ocurran interacciones entre parámetros; significando con esto que no todos los parámetros son independientes. Por ejemplo, la merma de la chatarra y la cantidad de aditivos de escoria, están correlacionadas de alguna manera. Sin embargo, estos se discutirán en forma separada.

Nuestros estimados, mencionados a continuación, del impacto de varios parámetros son el resultado de una mezcla de análisis estadístico, cálculos y experiencia. En general estamos haciendo referencia con hornos de 100 toneladas y mayores.

En 1992, Köhle <sup>(8)</sup> identificó cuatro parámetros principales de un análisis de 14 hornos instalados en Alemania. Posteriormente, este análisis se extendió a 35 hornos <sup>(9)</sup> para un estudio del Instituto Internacional del Hierro y el Acero ( IISI ), incluyendo un número mayor de parámetros. Cuando utilizamos los factores de correlación derivado de este trabajo, los identificamos como <sup>(8)</sup> sigue:

## Materiales de Carga

**Chatarra.-** La palabra “chatarra” involucra un gran rango de materiales, en análisis químico, forma, densidad y merma. La *merma* de chatarra a líquido fue reconocida como un parámetro importante en el análisis de Köhler. La reducción de 1% en merma, produce un incremento de 10 kWh/t<sup>(8)</sup>. Esta energía adicional se requiere para fundir los elementos no ferrosos contenidos en la chatarra. El rango de merma de los hornos de nuestra base de datos tiene una variación típica de 86 a 92 %, que en términos de energía equivalen a una diferencia de 60 kWh/t.

La *forma* de la chatarra está relacionada con la manera como se coloca dentro del horno y con la práctica de fusión. Las piezas pequeñas y largas, como trozos de varilla se pueden soldar entre sí demorando el tiempo para que caigan hacia el baño líquido. Piezas grandes y de alta *densidad* como lingotes, pacas y material reciclado de colada continua pueden requerir de mucho tiempo para que se disuelvan en el baño. Frecuentemente hemos visto que algunas piezas de chatarra, cargadas en la primer cesta, en una colada con varios recargues, se funden totalmente hasta casi al final de la colada<sup>(10)</sup>. El rango de longitud óptima de las piezas cargadas al horno es entre 100 mm y 1000mm, con una densidad, entre 0.6 a 0.9 t/m<sup>3</sup>. Existen, además algunos tipos de chatarra, como la chatarra triturada (shredded), que pueden tener altas densidades. Nuestra opinión es que la diferencia entre una chatarra “ideal” y una “difícil de procesar” puede significar hasta 40 kWh/t.

El contenido de material no-ferroso en la chatarra puede variar desde materiales orgánicos ( aceites, grasas, plásticos y madera) que son exotérmicos y son eliminados en forma de gases, hasta los materiales endotérmicos como Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (óxido), agua, y hasta concreto u hormigón. La reducción completa de 1% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> puede absorber alrededor de 13 kWh/t. Por otro lado, cuando el agua contenida en la chatarra mojada, se evapora y abandona el horno a una temperatura promedio de 1000° C equivale a 6 kWh/t por cada 1% de contenido de agua. En regiones frías del hemisferio norte, la lluvia, nieve y hielo en la chatarra producen el llamado “Efecto Invierno” de alto consumo de energía. Este efecto puede ser del orden de 30 kWh/t.

**Formadores de escoria.-** La carga de elementos formadores de escoria – cal y dolomita – tiene una fuerte influencia sobre la energía, un incremento de 1 % equivale a 16 kWh/t<sup>(8)</sup> de aumento en consumo de energía. El rango de la base de datos de la cantidad de aditivos de escoria es de 26 a 45 kg/t (operaciones con 100% chatarra), que equivalen entre 42 a 72 kWh/t.

Otros substitutos de chatarra como el hierro esponja (DRI), Arrabio (sólido o líquido) tienen sus equivalentes energéticos (mencionados anteriormente) pero obviamente estos también varían en su composición, siendo el más importante, el contenido de silicio en el arrabio.

## Prácticas de Carga

**El número de cestas.-** Tiene su influencia en el consumo de energía, cada vez que se desliza la bóveda se pierde energía, principalmente por radiación del interior del horno y de la bóveda cubierta por la escoria. Basado en un estudio efectuado en los años 80 con hasta 6 cestas de carga, la pérdida de energía por cada recargue era de alrededor de 10 kWh/t por cesta<sup>(11)</sup>. El número de cestas en la actualidad es de 2 a 3 (en las prácticas con alimentación continua, se pueden considerar como *Cero*).

**La distribución de la carga en el Horno.-** La distribución de la carga afecta a la forma como cae ésta y la relación de fusión por radiación y por disolución en el baño. Este es un parámetro difícil de cuantificar; de nuestras observaciones, estimamos una influencia del orden de 20 kWh/t. La altura de la cesta de la cual cae la carga tiene su influencia en la distribución en el horno. La cesta del tipo de “gajos de naranja”, usado en algunos

hornos pequeños, tiene un mejor control en este aspecto, sin embargo, se utiliza poco en hornos grandes debido a que se necesita un operador adicional para abrir la cesta.

La estratificación de la chatarra dentro de la cesta, tiene un impacto importante en la estabilidad del arco durante la etapa de profundización, las subsecuentes caídas de carga y las roturas de electrodos. La chatarra pesada se debe de colocar en la parte inferior del horno. La chatarra ligera en la parte superior permite un arqueo más estable durante la profundización, y mayor nivel de potencia promedio.

**Aditivos de escoria.-** La antracita y el carbón, pueden cargarse en la cesta de chatarra o pueden ser insuflados a través de la bóveda. En principio, la alimentación por la bóveda permite un mejor control del tiempo de solución, a esto le damos una ventaja del orden 10 kWh/t.

**Acero líquido remanente.-** Esta práctica es casi estándar en la industria del acero vía HAE. Debido a la mejora temprana de la estabilidad del arco estimamos que beneficia en alrededor 15 kWh/t. La cantidad de acero remanente no tiene mucha importancia; las variaciones son porque se desconoce el peso. Por ejemplo, si existe demasiado acero remanente, se puede tener menor cantidad de escoria, y viceversa.

### Prácticas de operación

**Programa de Potencia.-** A través del Programa de Potencia, identificamos al Voltaje del Arco como un parámetro importante ya sea en CA como en CD. En estudios recientes derivados de nuestras<sup>(12)</sup> actividades de Servicio Técnico se han detectado más altos consumos de energía total en hornos que operan con arcos muy largos durante el periodo de afino. La pendiente de la correlación es del orden de 30 kWh/t por cada 100 V. Con voltajes más bajos, se producen potencias más bajas, por lo tanto es necesario encontrar una correlación óptima entre consumo de energía, potencia y velocidad de producción.

De mediciones efectuadas en hornos de CD hemos detectado reducciones del orden de 10 kWh/t después de bajar el voltaje de 800 a 700 V durante afino. Estimamos que el Voltaje del Arco empieza a tener su efecto arriba del nivel de 450 V para CA y 600V para CD y opera a razón de 20 kWh/t por cada 100 V. Probablemente este efecto esté ligado a la dificultad de cubrir los arcos completamente con la escoria para prevenir las pérdidas calor hacia los paneles refrigerados. Aunque el espesor de la escoria espumosa para CA es similar que para CD, el límite menor en CA se debe probablemente al resultado del “barrido” del arco y por lo tanto mayor Índice de Desgaste del Refractario, (Fig. 2).

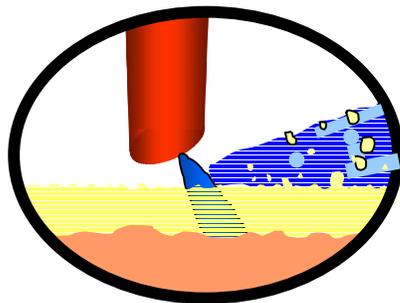


Fig. 2: Arco CA cubierto parcialmente

**La calidad de la escoria espumante.-** El espesor de la Escoria Espumante afecta la cantidad de calor que se transfiere de los arcos hacia las paredes y bóveda. Una referencia de hace tiempo (1992) identificaba una escoria vigorosa y activa asociándola con un consumo bajo de energía comparada con una escoria pasiva<sup>(13)</sup>. En este estudio, la medición cuantitativa de la actividad de la escoria se obtenía del contenido de armónicas del

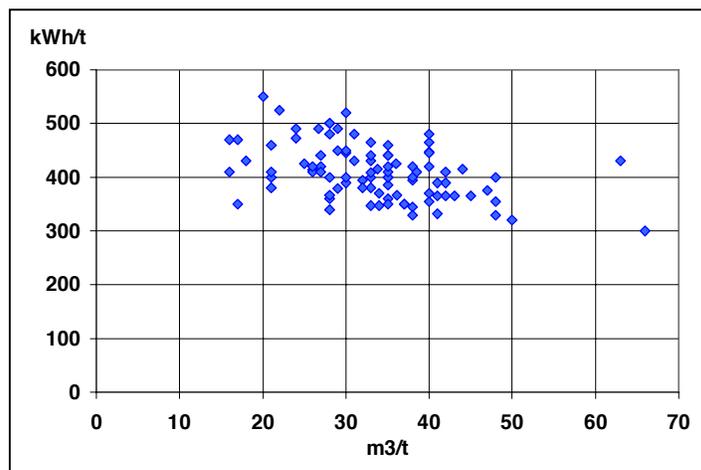
Voltaje del Arco. Se observó un rango de alrededor de 40 kWh/t entre las diferentes escorias espumantes activas y vigorosas.

La calidad de la escoria espumante en términos de espesor y duración, está directamente relacionada con la eficiencia térmica del arco, especialmente en los casos actuales donde se utilizan arcos largos. Hemos estimado que las variaciones en la calidad de la escoria espumante contribuyen con +/-20 kWh/t.

**La práctica de la lanza de oxígeno.-** Independientemente del tipo de lanza que se use en el horno, ya sea lanzas enfriadas por agua o lanzas consumibles, hay grandes variaciones en la efectividad y – por lo tanto en la eficiencia – en las prácticas de alimentación de oxígeno, entre hornos y hasta entre diferentes operadores del mismo horno. Las lanzas requieren atención especial y permanente por parte del operador: las consumibles, necesitan ajustes frecuentes, y las enfriadas por agua necesitan una posición determinada y cuidadosa. A nuestro juicio, las variaciones en la eficiencia de la lanza afectan en +/-30 kWh/t.

La siguiente gráfica ilustra la variación en la efectividad aparente del oxígeno para reducir el consumo de energía eléctrica:

Fig. 3.- Energía eléctrica vs. Consumo de oxígeno



Los sistemas fijos de inyección de oxígeno del tipo “jet coherente” instalados a través de las paredes del horno facilitan la posibilidad de controlarse por computadora. Así, se elimina la mayor parte de la variabilidad del operador. El hecho de que típicamente se instalan en tres o más posiciones alrededor del horno, también favorecen a que las reacciones químicas sean más balanceadas, es decir, desde el punto de vista de contenido de FeO en la escoria y en la y la generación de CO para la escoria espumante. Por estas razones, estos sistemas presentan resultados más consistentes y por lo tanto contribuyen a mejorar la eficiencia del uso del oxígeno.

**Quemadores.-** Si éstos se utilizan, normalmente se colocan ya sea a través de la puerta o en las paredes del horno. En los quemadores, se aplican también los comentarios mencionados para los sistemas de oxígeno, si están bajo el control de una computadora, las variaciones en la eficiencia se relacionarían con las variaciones en el tamaño, densidad y colocación de la chatarra entre colada y colada. El perfil del flujo gas / oxígeno a través de la colada afecta la eficiencia térmica promedio de éstos. Ya que la aplicación de energía de los quemadores comunes, es relativamente baja ( 20 to 60 kWh/t) estimamos una variación pequeña del orden de 10 kWh/t.

**Post combustión (PC).-** Por definición, la post combustión es la oxidación de CO para formar CO<sub>2</sub> (el hidrógeno tiene una contribución mínima). Para CO caliente y oxígeno frío, la energía liberada por esta reacción es del orden de 6.3 kWh/m<sup>3</sup>.

Ya que el inyector trabaja casi en toda la colada, durante toda la carga, es de esperarse que cuando mucho la eficiencia térmica sea del orden del 50 %, equivalente a 3.1 kWh/m<sup>3</sup> ó menos.

Es algo difícil separar las entradas de energía debidas al oxígeno inyectado por lanzas del utilizado para post combustión ya que se requiere efectuar mediciones de balance de energía y de masas. Es común encontrar instalaciones en donde sólo se mide el oxígeno total consumido (Lanzas + PC) por lo tanto, no vamos a intentar efectuar cálculos separados de equivalentes energéticos para la lanza y para PC; todo el oxígeno utilizado se registra como *oxígeno en lanza*.

**Temperatura de vaciado.-** Entre más alta sea la temperatura de vaciado mayor será la entalpía del baño. El calor específico del acero líquido es de 0.24 kWh/t por grado Celsius. Sin embargo, cerca del final de la colada la eficiencia térmica del horno disminuye, ya que el calor es radiado por la escoria – y los arcos, si están descubiertos – hacia las paredes y bóveda enfriadas por agua. Por ejemplo, para un horno de 6.7 metros de diámetro las pérdidas de calor combinadas hacia la bóveda y paredes están en el rango de 10 a 12 MW. Simultáneamente existe una gran pérdida de potencia extraída por el sistema de captación de humos.

En la actualidad, con la operación de alta potencia y escoria espumosa, se podría esperar una eficiencia térmica similar a la de un horno olla, en el rango de 40 a 60 %. Sin embargo, como no se puede medir con exactitud el balance de energías ya que el tiempo para súper-calentar es relativamente corto y con la alta velocidad del flujo de oxígeno, hacen difícil calcular la eficiencia.

El rango en la temperatura de vaciado, de nuestra base de datos varía de 1580°C a 1680°C, que representa, en promedio, un rango de energía de 70 kWh/t<sup>(8)</sup>, (por supuesto, aquellas operaciones que vacíen a más baja temperatura, tienen que compensarla posteriormente en el horno olla).

**Tiempo.-** Las pérdidas térmicas dependen del *tiempo*. El tiempo conectado, excluyendo las demoras, es inversamente proporcional a la potencia promedio total aplicada, y en la actualidad está en el rango de 30 a 60 minutos para diferentes hornos. La causa principal de las *variaciones* en tiempo, se debe a las demoras y puesto que las pérdidas térmicas ocurren durante el total de la colada, el efecto de las demoras también depende del punto en la colada en éstas ocurren. Nuestro estimado del efecto de las demoras sobre el consumo de energía es el siguiente:

**Tabla 3: Consumo de Energía por Demoras**

ETAPA	kWh/t por minuto
Durante Fusión	0.4
Durante Afino	1.7
Entre coladas (< 30 min)	0.5
Entre coladas (> 30 min)	0.2

Nuestros estimados de *0.4 min* al inicio de la colada y de *1.7min* casi al final de la colada se basa en la variación de la eficiencia térmica, que es muy alta durante el periodo de fusión y se reduce abajo del 50 % en condiciones de baño plano, casi al final de la colada.

Las pérdidas debidas a las demoras entre coladas, son relativamente bajas. Aún con acero remanente, la cubierta de escoria se enfría rápidamente disminuyendo las pérdidas térmicas. Independientemente que el

tiempo de vaciado sea de 8 ó de 38 minutos, la diferencia en pérdidas de calor de las capas de escoria que cubren las paredes y bóveda enfriadas por agua, es relativamente pequeña.

La siguiente gráfica muestra la relación entre la energía total y el tiempo de vaciado a vaciado. En este caso (un horno shaft), ocurren demoras durante afino y entre coladas. La pendiente de la línea es de 0.4 kWh/t por minuto.

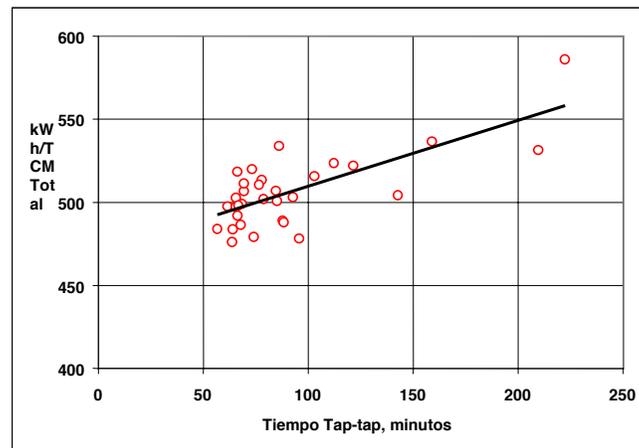


Fig. 4.- kWh / TCM Total vs. Tiempo Vac-a-Vac

**Hornos de Cubas Dobles (Twin Shell).**- En los hornos de cubas dobles, una cuba pierde calor (energía) mientras que la colada se desarrolla en la otra. Comparando la operación de uno de estos hornos trabajando en operación normal, es decir alternando cubas, con un horno convencional, hemos registrado valores de alrededor de 27 kWh/t de energía adicional requerida por el horno de doble coraza, mientras que otros autores mencionan aproximadamente 30 kWh/t<sup>(9)</sup>.

**Cubierta de escoria en bóveda y paredes.**- Es común ver que la superficie de los paneles enfriados por agua (principalmente en la bóveda) no esté cubierta de escoria, debido a que carecen de retenedores de escoria ó bien que éstos han sido erosionados durante la operación. Para superficies cubiertas con escoria la transmisión máxima de calor es alrededor de 220 kW/m<sup>2</sup>, pero si no existe escoria, la superficie se convierte en un “cuerpo negro” y puede absorber la radiación de calor a razón 700 kW/m<sup>2</sup> cuando la superficie interior está a una temperatura de 1600 °C. Estimamos que las pérdidas de energía sea alrededor de 3 kWh/t por cada metro cuadrado sin cubrir.

**Sistemas de extracción de humos/ horno hermético.**- Entre los diferentes hornos existe una gran variación en la cantidad de aberturas (entrada /salida de aire / gases), como la puerta de escoria, el sello de la bóveda, los puertos de electrodos, entrada de quemadores / lanzas, orificio de vaciado, etc. Consecuentemente, la cantidad de aire que se introduce al horno también varía, así como las pérdidas de calor hacia el exterior.

Cuando se atacan las fugas de energía, el consumo se podría reducirse en valores alrededor de 15 kWh/t<sup>(15)</sup>. En algunos hornos se han medido efectos mayores<sup>(16)</sup> – arriba de 50 kWh/t para un horno hermético. Tenemos la experiencia de una acería con dos hornos “idénticos”, que difieren solamente en la velocidad de extracción del sistema depurador de humos, con una diferencia de 20 kWh/t en el consumo total de energía (la mayor energía con la mayor velocidad de extracción).

**Electrodos enfriados por agua.-** Debido al descontrol ó exceso en el flujo de agua para enfriamiento de los electrodos, es posible que una parte del agua se introduzca al horno. Este exceso de agua es extraído posteriormente en forma de vapor, junto con los demás gases a través del cuarto agujero. Si la temperatura de salida está en el rango de los 1000 °C, la energía extraída es del orden de 0.6 MWh por m<sup>3</sup>, ó sea de 6 kWh/t para una colada de 100 t. Siendo el flujo de agua del orden de 1 m<sup>3</sup>/h por electrodo, se introducen varios metros cúbicos durante una colada. Hemos estimado variaciones hasta de 20 kWh/t debidos a este concepto.

Es una realidad que la oxidación del electrodo se reduce si se incrementa la cantidad de agua que lo cubre, sin embargo, el costo del incremento en consumo de energía, podría ser mayor que el ahorro en consumo de electrodos.

### **Diseño de Horno**

**Sistemas de Recuperación de Energía (Shaft, Consteel, precalentamiento de chatarra).** – Tenemos información de varios hornos que cuentan con alguna forma de recuperación de energía, ya sea por medio del uso del sistema Shaft, Consteel, o precalentamiento de cestas. Del grupo de 92 hornos de nuestra base de datos con productividad superior a los 80t/h considerados en nuestro estudio, 19 hornos utilizan cierto tipo de precalentamiento de chatarra (21 %). Es de esperarse que estos hornos reporten una reducción en el consumo total de energía, pero, ¿cuanto?

Hemos visto que la desviación estándar del total de energía entre los 92 hornos de la base de datos, es de 49 kWh/t. No existen razones para decir que estos 19 hornos tienen significativamente diferentes variaciones, sin embargo, 9 de los 17 hornos que tienen el más bajo consumo de energía están comprendidos en esta categoría (53%). También, 2 de estos 19 hornos están en el periodo de arranque. Por lo tanto, restando estos dos de los 19, quedan 17 hornos cuya energía total promedio es de **542 kWh/t**, alrededor de **40 kWh/t** abajo del promedio de los 92 hornos con productividad mayor que 80 t/h. Esto demuestra que efectivamente estos hornos tienen un sistema de recuperación de energía. Nuestro mejor estimado oscila en promedio entre 30 y 50 kWh/t.

Se debe de notar que la energía debida a los quemadores que trabajan después del sistema de recuperación de energía para propósitos del medio ambiente, no está incluidos en nuestro cálculo de energía total

**CD ó CA.-** No pudimos distinguir ninguna diferencia sistemática en el consumo de energía total entre hornos de corriente alterna y de corriente directa. Esta conclusión ha sido reportada previamente.

**Forma del Horno.-** Cuando los hornos operaban, hace 30 años, con paredes de material refractario, había una tendencia de diámetros relativamente grandes para obtener niveles bajos de índice de refractario. Una tendencia reciente de hornos más altos, tiene la ventaja teórica de menores pérdidas térmicas (área de la bóveda relativamente menor) y alguna posibilidad para mejorar la transferencia de calor de post combustión. Sin embargo tenemos muy pocos ejemplos para estimar una ganancia de energía por ésta causa. Si el horno es suficientemente grande de tal forma que requiera una sola cesta de carga, entonces, las pérdidas por recargue quedarían eliminadas (alrededor de 10 kWh/t por cesta), como se mencionó anteriormente

### Resumen de factores clave

En la siguiente tabla, se presenta un resumen de los efectos en la energía total:

Tabla 4: Resumen de factores clave

<b>Cálculos o correlaciones</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Relación</b>	<b>Efecto potencial en kWh/t Total</b>	
		<b>Decrece</b>	<b>Aumenta</b>
Voltaje del arco en Afino	por 100 V arriba de 450AC o 600DC		<b>20</b>
Demora durante Afino	por cada 10 minutos		<b>17</b>
Adiciones de Escoria	por cada 10 kg/t chatarra		<b>16</b>
Merma	por cada 1 % de reducción		<b>10</b>
DRI (o HBI)	por cada 10 % de adición		<b>10</b>
# de Cestas	por cesta		<b>10</b>
Bóveda cubierta por escoria	por cada 3 m <sup>2</sup> sin cubrir		<b>10</b>
Temp. De vaciado	por cada 10°C > 1600°		<b>7</b>
Demoras <30 min. entre coladas	por cada 10 minutos		<b>5</b>
Demoras durante Fusión	por cada 10 minutos		<b>4</b>
Demoras >30 min. entre coladas	por cada 10 minutos		<b>3</b>
Metal Caliente	por cada 10 % de adición	<b>45</b>	
Doble Coraza	Pérdidas / Desconexión		<b>27</b>
Arrabio	Por cada 10 % de adición	<b>11</b>	
DRI caliente	Por cada ton de sustitución	<b>30</b>	
<b>Estimaciones</b>			
		<b>Rango</b>	
Sistemas de ahorro de Energía	Shaft, Consteel, Precal.	<b>30 a 50</b>	
Práctica de Lanza	Variaciones en eficiencia	<b>30</b>	<b>30</b>
Física (forma) de Chatarra	Velocidad de Fusión	<b>20</b>	<b>20</b>
Análisis de la Chatarra	Oxido, agua, etc.	<b>20</b>	<b>20</b>
Calidad de Escoria Espumante	Variaciones en altura	<b>20</b>	<b>20</b>
Sist. Humos / Sello Horno	Fugas de Aire	<b>15</b>	<b>15</b>
Práctica de Cargas (distr)	Estabilidad del arco, Caída de carga	<b>15</b>	<b>15</b>
Post combustión	Por cada 10 m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> /t	<b>30</b>	
Enfriamiento de electrodos	Agua hacia el horno	<b>10</b>	<b>10</b>
Acero líquido remanente	Estabilidad del arco	<b>10</b>	
Fundentes al Horno	(relativo a carga por cestas)	<b>10</b>	
Sistema Co-Jet	Control de O <sub>2</sub> , uniformidad	<b>15</b>	
Quemadores	Variaciones en eficiencia	<b>5</b>	<b>5</b>
Diám. de profundización	Caídas de carga	<b>5</b>	<b>5</b>

Algunos de estos parámetros evidentemente están interrelacionados. Por ejemplo, la cantidad de adiciones para escoria tiende a estar ligado al rendimiento de la chatarra. En forma similar, el incremento de la energía por voltaje del arco depende de la altura de la escoria espumante. El hecho de que todos estos parámetros no son independientes significa que no es posible obtener la suma de todos los efectos favorables en forma simultánea.

Por supuesto, no todas las acerías pueden utilizar los tipos de chatarra que son “mejores” desde el punto de vista de energía; ya que esta simplemente no está disponible o su costo es prohibitivo. Nuestra intención, es que la lista de esta tabla sea un recordatorio de los parámetros que se deben de investigar para buscar el más bajo consumo de energía total.

### **Conclusiones**

La comparación del consumo de energía para diferentes hornos es válido si esta se hace basada en la energía *total*. Para esto hemos desarrollado la siguiente ecuación:

$$E. \text{ Total (kWh/t)} = \text{eléctrica} + 10.5\text{gas} + 5.2(\text{O}_2 - 2\text{gas} - 2\text{oil} - 1.5\text{LPG}) + 1.1\text{arrabio (\%)} - 1.0\text{DRI (\%)} + 4.5 \text{arrabio-líquido (\%)}$$

Usando esta ecuación hemos encontrado que el consumo promedio de energía total de 92 hornos con velocidad de producción de arriba 80 TAL/h es de 583 kWh/TAL, con una desviación estándar de ~50 y un mínimo de ~480 kWh/TAL.

## Referencias

1. B.G. Kelley, “**Natural gas - The other raw material, Part 2**”, Direct from Midrex , 2<sup>nd</sup> Qtr 1997, Vol 22, No.3.
2. E. Inagaki, K. Izumi and M. Ichikawa, “**Integrated oxygen enrichment control to attain maximum overall economy in steelmaking arc furnaces**”, Proc. Electroheat Congress, Madrid, Oct. 1988, Paper A6.2.
3. W. Piklbauer and R.Simm, “**Corex based minimills for high quality steel**”, Steel Times Int., Vol 23, 1999, pp 18-22.
4. D.J. Bester and W. Peters, “ **The charging of liquid iron and sponge iron into the electric arc furnace**”, Furnace & Refractory Engineer, Vol 2, No. 1, 1996, pp1-2.
5. Paul Wurth, “**Scrap-hot metal integrated EAF**”, 25<sup>th</sup> Symp. New Melting Technologies, St. Petersburg, FL, May 1997.
6. S.F. Turcotte, A.H. Marquis and T.E. Dancy, “**The use of Direct Reduced Iron in the electric arc furnace**”, Ch. 10., *Electric Furnace Steelmaking*, Iron & Steel Soc., 1985.
7. K. Bergman, R. Gonzales, M.A. Pedroza and M. Herrera, “**Twin electrode DC EAF**”, 6<sup>th</sup> European Elec. Steelmaking Congress, METEC, Duesseldorf, June, 1999.
8. S. Köhle, “**Influencing factors on the energy consumption and electrode consumption in arc furnaces**”, (in German) Stahl u. Eisen, Vol 112, 1992, No.11, pp 59-67.
9. S. Köhle, “**Improvements in EAF operating practices over the last decade**”, Elec. Furn. Conf. AIME, Pittsburgh, 1992, pp59-67.
10. H. Gaye, P. Destannes, J.L. Roth and M. Guyon, “**Kinetics of scrap melting in the converter and electric arc furnace**”, 6<sup>th</sup> Int. Iron & Steel Congress, Vol 4 : Steelmaking, Oct., 1990, Nagoya, pp 11-17.
11. B. Bowman, V. de Tommasi and R. Vezzani, “**Influence of the number of basket recharges on arc furnace performance**”, VDEh Electric Steel subcommittee Seminar, Cremona, 1983.
12. B. Bowman, N. Lugo and T.P. Wells, “**Influence of tap carbon and arc voltage on electrode and energy consumption**”, Elec. Furn. Conf. AIME, Orlando, 2000, pp649-57.
13. K. Timm and T. Pfeiler, “**Optimisation of the operation of an AC arc furnace**”, (in German) Elektrowärme Int., 50, 1992, B2 199-205.
14. G. Schmeiduch and F. Oeters, “**Influence of some operating parameters on the refractory wear in arc furnaces**”, (in German), Stahl u. Eisen, Vol 100, No. 20, 1980, pp 1188-94.
15. F. Porzucek, V. Cucchiario, Th. Bernet, Ph. Destannes, A. Gaggioli and D. Rocchi, “**Experimentation of an airtight electric arc furnace at Unimétal Neuves-Maisons**” (in French), Rév. Met., Vol 90, Nov. 1993, pp1463-73 .
16. M. Bender, “**Influence of electric arc furnace pressure on power consumption**”, Iron & Steel Eng., April 1996, pp 73-77.