

USO Y LIMITACIONES DE GRANDES LONGITUDES DE ARCO EN LA OPERACIÓN DE HORNOS ELÉCTRICOS¹

Said Alameddine²

Jose Ignacio de la Peña²

Wayne Adams³

Ben Bowman³

Nicolas Lugo³

Resumen

En la continua jornada para incrementar la productividad, los acereros siempre consideran el aumento de la potencia eléctrica como la primera opción. Una de las opciones para tal fin consiste en el incremento de la corriente de operación. El incremento de la potencia a través de la corriente tiene sus limitaciones prácticas y de diseño, por ejemplo, los cables, los transformadores y los interruptores del horno tienen límites de capacidad de corriente que no se debe sobrepasar. El consumo de electrodos sería otra consideración importante antes de decidir el incremento de la corriente de operación, como medio para incrementar la potencia del horno. Por lo anterior, la tendencia de hoy día es la de incrementar el voltaje secundario. En la actualidad muchas acerías trabajan con voltajes del orden de los 1000 voltios (V), en tanto que el máximo voltaje registrado en operación normal de hornos es del orden de los 1400 V, en tanto que, de acuerdo a nuestra base de datos, el máximo voltaje instalado es de 1700 V. En cuanto al voltaje de arco, los valores máximos registrados en hornos de corriente alterna son de 650 V, mientras que en corriente directa estos varían de 600 a 800 V, típicamente. El objetivo de este trabajo es la exploración de las oportunidades de incrementar el voltaje de arco en los hornos de corriente alterna, con el fin de aumentar el nivel de productividad.

Palabras clave: Arco largo; Voltaje de operación; Arqueo

USE AND LIMITATIONS OF VERY LONG ARCS IN AC FURNACES

Abstract

In their continual quest to increase productivity steelmakers search for higher power. However there are restrictions in increasing the current; for example - a limitation of the furnace breaker capacity, the need to avoid overloading the transformer, along with the desire to avoid an increase in electrical losses and electrode consumption. The tendency therefore is to increase arc voltage, and this requires a suitably high transformer secondary voltage. Today many furnaces operate with a transformer tap above 1000 V, the highest in use being around 1400 V (while the highest available reaches 1700 V!) For the arc voltage, the highest in use is about 650 V, while in DC furnaces even higher arc voltages are used, typically in the 600 to 800 V range. We discuss the opportunities to further increase arc voltage in AC furnaces so that even higher productivity can be achieved.

Key words: Arc length; Operating voltage; Arcing.

¹ Trabajo presentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² GrafTech Int. Ltd, UCAR – Europe :

³ GrafTech Int. Ltd., UCAR- USA; mail : nombre.apellido@graftech.com

1 INTRODUCCIÓN

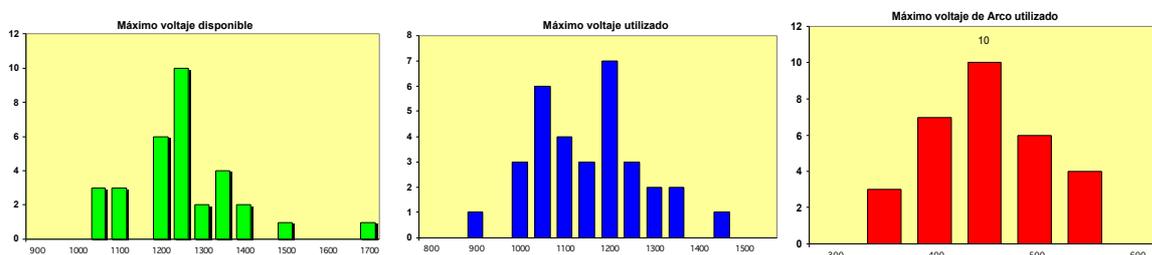
Uno de los medios para incrementar la productividad es por medio de niveles más altos de potencia. Dado que la potencia es el producto de la corriente y voltaje, incrementando el valor de uno de los dos componentes conduce al aumento de potencia. Existen, sin embargo, ventajas en el uso de mayores voltajes de operación:

- Reducción de las pérdidas eléctricas
- Reducción del consumo de electrodos
- Reducción del flicker, dado que la ruta para aumentar el voltaje es a través de incremento de la reactancia de operación.

Existen ciertas limitaciones, sin embargo, en cuanto a los niveles de voltaje de arco que se podrían obtener en cada caso en particular. En este trabajo se discuten los requerimientos de diseño y de operación, necesarios para solucionar ciertos problemas asociados con el uso de mayores voltajes en los hornos de arco eléctrico.

2 LA SITUACIÓN ACTUAL

Enseguida se presentará un breve resumen de la situación actual. Las Figuras 1-a a la 1-c muestran los histogramas de voltajes disponibles en instalaciones alrededor del mundo, la Figura 1-a muestra los voltajes más altos instalados mientras que la Figura 1-b despliega los máximos voltajes en operación y, finalmente, la Figura 1-c que incluye el histograma de voltajes de arco en operación; para este mismo grupo de hornos.



Figuras 1-a,b,c. Máximo voltaje secundario disponible y utilizado en instalaciones de HEA.

Las Figuras 2 y 3, muestran la potencia de operación de estos hornos, en función del diámetro del horno y del voltaje máximo utilizado (respectivamente). Como se podrá ver en las gráficas, existe una gran dispersión. Por otro lado, es de notar también, el hecho de que existen muchas operaciones que alcanzan niveles de potencia superiores a los 100 MW.

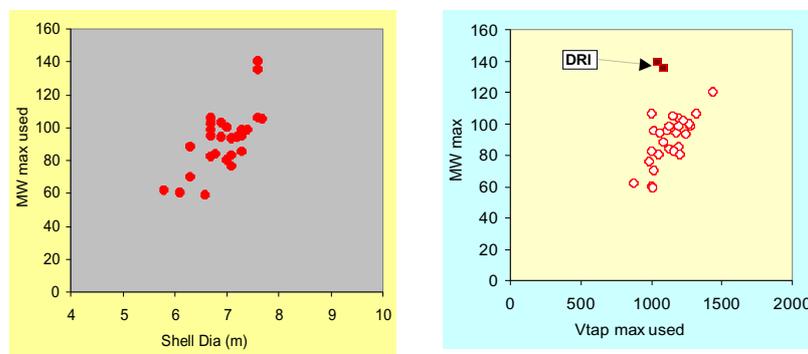
3 FACTORES QUE LIMITAN EL USO DE ALTO VOLTAJE DE OPERACIÓN

3.1 Limitaciones Debidas a la Profundidad de la Escoria Espumante y Pérdidas Térmicas

Como es del conocimiento general, para evitar el desgaste de los refractarios, paneles refrigerados y pérdidas térmicas durante la operación del HEA, es imperativo que los arcos permanezcan cubierto durante la etapa de baño plano en la colada. A medida que se incrementa la longitud de los arcos, se requiere una mayor

profundidad o cantidad mayor de la escoria necesaria para proteger las paredes. Existe la posibilidad que este incremento de escoria en la operación haga disminuir la eficiencia térmica total del horno. ¿Sería posible incrementar el gradiente de voltaje (V/mm), de manera que pudiéramos obtener un voltaje mayor por milímetro? Si fuera posible incrementar el gradiente V/mm, entonces podríamos operar a valores de voltaje mayores; sin necesidad de mayores longitudes de arco ni escorias más profundas.

Los constituyentes del plasma del arco determinan el gradiente de voltaje (V/mm). En el caso de los arcos cubierto con escoria espumante, los constituyentes del plasma de estos arcos provienen de los elementos del medio que los rodean, en este caso, el calcio, proveniente de la escoria, el hierro del metal fundido y el carbono de los electrodos de grafito. De estos elementos, en particular el calcio y el hierro son fácilmente ionizables y juntos determinan las propiedades físicas del plasma del arco, incluido el gradiente de voltaje del mismo.



Figuras 2 y 3. Potencia de operación en función del diámetro del HEA ⁽¹⁾ y del voltaje de operación ⁽²⁾

Para incrementar el valor de voltaje por unidad de distancia, sería necesario sustituir estos elementos por otros de valores más altos de ionización, tales como oxígeno, nitrógeno, hidrógeno o carbón. Para lograr este propósito se han hecho experimentos inyectando gases tales como vapor de agua (H₂O) y metano CH₄. ⁽³⁾ En principio el resultado de estos experimentos fue positivo, en cuanto a la obtención de mayores valores de voltaje por unidad de distancia (mm) pero los problemas técnicos y el costo relacionados con este proceso no favorecieron su implementación.

3.2 Limitación Debida a la Incidencia de “Arqueos” entre las Mordazas Arriba de la Bóveda

Debido a que no siempre se puede evitar la presencia de flama o gases calientes entre las mordazas del horno, existe siempre el riesgo de formación de cortocircuitos entre las mordazas a medida que el voltaje entre éstas se incrementa. Arcos eléctricos de muy breve duración (evidentes por las ruidosas explosiones que los acompañan) ocasionan daños en las mordazas y demás componentes del secundario del sistema de potencia. Estos arcos, cuando se presentan son de muy poca duración debido a que el arco es repelido por los campos magnéticos de la misma forma que sucede en los interruptores de circuitos eléctricos. En sí, estos eventos cuando suceden de manera aislada no causarían mucho daño a las

mordazas, pero la repetición frecuente de estos fenómenos podría desarrollar efectos indeseados.

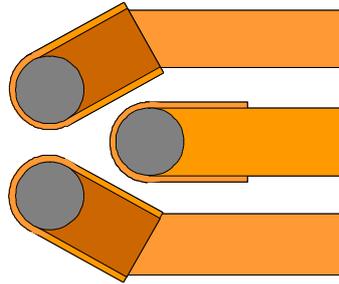


Figura 4. Arreglo de mordazas en hornos modernos con círculo de electrodos reducido

Una tendencia relativamente reciente en el diseño de hornos consiste en arreglar el círculo de electrodos lo más estrecho posible (ver figura).

La práctica común de habilitar el levante automático de los electrodos cuando la protección contra demanda máxima actúa hace más agrava aun la situación en algunos hornos, cuando esto sucede, el voltaje entre las mordazas es aun mayor que en condiciones normales de operación.

La eficiencia del sistema de extracción de humos juega un papel importante durante estos eventos, entre mayor sea la presencia de flamas en los puertos de la bóveda, mayor será el riesgo de generación de arcos entre las mordazas.

3.3 Limitaciones Debidas a la Presencia de Arcos Eléctricos Debajo de la Bóveda

Un problema relativamente semejante ha sido observado con más frecuencia – El flujo de corriente eléctrica en patrones alternos a la corriente del arco. El nivel de corriente alcanzado en algunos casos es tal que interfiere con la regulación de posición automática de los electrodos, la cuál, en un intento de mantener el punto de operación en corriente, actúa elevando los electrodos.

Colegas nuestros reportaron primeramente este fenómeno en la Conferencia de Horno Eléctrico de Venecia en el 2002 ⁽²⁾. En esa conferencia se usó el término de “arqueos inusuales” debido a que visto desde fuera, los electrodos se comportan de una manera “inusual” cuando este fenómeno se hacía presente. A partir de entonces, hemos obtenido evidencia concluyente de que al menos parte de esos efectos indeseables que llevan al levantamiento de electrodos, ocurren justo debajo de la bóveda. Ya sea debido a que la corriente fluye entre los electrodos debido a contacto físico entre éstos y los puertos de la bóveda, o bien que el flujo de corriente sea de una fase hacia la coraza metálica del horno, y de ahí al baño líquido; por el mismo efecto de conducción eléctrica. Todavía no se ha determinado con certeza cuáles son los parámetros de la operación que conducen a la presencia de estos fenómenos.

Las condiciones de la fase caliente de la delta de refractario ya por estar altamente impregnada de partículas metálicas o bien por las altas temperaturas debidas a la combustión de monóxido de carbono o de finos de carbón, parecen tener relevancia en el caso. Obviamente, la distancia entre los electrodos y el orificio de la delta deberán ser también muy importantes.

En cuanto a las mordazas, los gases calientes son conductores eléctricos. Cualquier cosa que los haga más conductores de lo normal (alta temperatura / finos de carbón, etc.), aumenta el riesgo de arqueos entre las mordazas. Todo esto se hace más

crítico en presencia de voltajes secundarios mayores, hornos con círculo de electrodos muy reducido, así como en casos de sistema de extracción de humos deficientes, etcétera.

El tema de “arqueos” a través de los gases presentes en el HEA será tratado con más detalle posteriormente. Uno de los factores que se ha probado de utilidad en estos casos, sin embargo, es el uso de los sistemas de enfriamiento de electrodos por medio de anillos de aspersion de agua. La presencia de una capa uniforme de agua en la superficie de grafito del electrodo ayuda a mantenerlos fríos, inhibiendo el flujo de corriente de los electrodos hacia el medio gaseoso que lo rodea.

3.4 Limitaciones Debido a Erosión de la Bóveda y Delta Debido a la Radiación de Calor

La radiación interceptada por la delta aumenta a medida que se incrementa la longitud del arco, especialmente durante el período inicial de la colada, en la etapa de profundización. Otro punto de vital interés en este aspecto, es la distancia entre la chatarra sólida y la parte interna de la bóveda después del recargue.

3.5 Limitaciones Debido a la Capacidad de los Interruptores de Circuito

La capacidad de interrupción de los interruptores de circuito se ha incrementado con el paso de los años. Hoy en día la máxima capacidad de interrupción típica para un circuito de 33 a 34.5 kV es del orden de los 3000 Amperios. Basado en lo anterior, la máxima capacidad eléctrica disponible para un HEA es de 171 a 190 MVA. Si bien la práctica convencional es la de interrumpir el flujo de corriente subiendo los electrodos antes de operar los interruptores, los fabricantes tienen que considerar las emergencias que en ocasiones conducen a interrupciones bajo carga; a la hora de diseñar los sistemas de relevación de los hornos

Existe sin embargo, la posibilidad de enlazar dos interruptores en paralelo, pero la ventaja de interrupción es relativamente pequeña.

Así mismo, los interruptores pueden sufrir sobrecalentamiento de los contactores durante etapas prolongadas de interrupción de altas corrientes, conduciendo así a la degradación de las placas de contacto.

3.6 Limitaciones Debido a Inestabilidad del Circuito Eléctrico

Esto está relacionado con la combinación de alto voltaje – baja corriente – alto factor de potencia en la operación. La corriente máxima de operación de los transformadores de horno no se da en los “taps” de máximo voltaje secundario. Los transformadores generalmente se diseñan para operar a máxima potencia aparente (MVA) solamente en unos cuantos “taps” o derivaciones.

Esta situación se debe en muchos casos a cuestiones de diseño. Para poder operar en niveles estables, un valor de factor de potencia suficientemente bajo será necesario. En este punto cabe también mencionar la eliminación de los circuitos de conexión delta–estrella que anteriormente se usaba para reducir el voltaje del secundario. Lo anterior conlleva a la incapacidad e algunos hornos de operar a niveles adecuados de estabilidad eléctrica sin el uso de reactores.

3.7 Limitaciones Debido a Inestabilidad del Arco Mismo

No tenemos conocimiento de las limitaciones en cuanto a longitud de arco, considerando que haya suficiente voltaje para mantenerlo. Se sabe sin embargo que los arcos demasiado largos van siempre acompañados con cierta inestabilidad de por sí. La estabilidad del jet de plasma gaseoso generado por el efecto magnético de

arco pierde velocidad a medida que este se aleja del punto de generación en el electrodo. Entonces, para un valor de intensidad de corriente dado, la estabilidad del arco disminuye a medida que se incrementa su longitud. Dicha inestabilidad podría también conducir a la extinción temporal del arco, durante la etapa crítica de inicio de fusión.

Contrariamente, la estabilidad del arco se incrementa en función de la corriente de operación. Esto ha permitido que los hornos de corriente directa (CD) que generalmente operan a mayores niveles de corriente que los hornos de corriente alterna (CA), operen con arcos más largos. Cabe sin embargo mencionar que se ha determinado que las fluctuaciones del arco son mayores en los hornos de corriente directa.

3.8 Limitaciones de Aspecto Legal en el Voltaje de Diseño

Por razones de seguridad existen limitaciones en cuanto al máximo voltaje de secundario en los transformadores de horno. El máximo valor de voltaje secundario aprobado por la comunidad europea (IEC) es de 1500 V. No tenemos información acerca de los límites de diseño en otras regiones.

3.9 Limitaciones Debido a Sobrecalentamiento de los Paneles del Horno

La potencia de operación de los hornos se ha incrementado de una manera constante durante los últimos años, esta situación ha llevado a la sustitución de algunos de los paneles de acero del horno por paneles de cobre; debido a las limitaciones de conducción térmica del acero. Durante la etapa de fusión, algunos de los paneles del horno quedan expuestos a la radiación del arco, esta situación se agrava a medida que se incrementa el voltaje de operación.

3.10 Chatarra y Regulación de Electrodo

Por una variedad de razones los hornos son cargados frecuentemente con chatarra de alta densidad. Debido a limitaciones de estabilidad de arco asociada con chatarra pesada, este tipo de chatarra se convierte en una limitación para el uso de arcos largos, especialmente durante la etapa inicial de fusión. Esta situación se elimina una vez que se logra generar suficiente escoria para cubrir los arcos. Esta situación también se presenta cuando se tienen oscilaciones de corriente debidas al pobre rendimiento del sistema de regulación de los electrodos.

4 DISCUSIÓN: ¿CUÁL ES LA MÁXIMA LONGITUD DE ARCO POSIBLE?

Resumiendo los diferentes conceptos enumerados en los incisos anteriores podríamos agruparlos en dos grupos mayores, desde un punto de vista técnico – un grupo relacionado con el consumo de energía, y el otro relacionado con los patrones indeseados del arco, ya sea arriba de la bóveda o dentro del horno.

4.1 Eficiencia Eléctrica

En cuanto al uso eficiente de la energía eléctrica en la operación se cuenta con evidencia de que los hornos están perdiendo eficiencia con operaciones con voltajes de arco de 550 a 650 V con longitudes de arco correspondientes a 600 mm. Incrementando la cantidad de escoria para cubrir estos arcos conlleva al incremento de las pérdidas térmicas (al vaciar la escoria caliente) así como la reducción de la eficiencia metálica (incremento de FeO total). La alternativa de incrementar la altura de la escoria (no la cantidad) no parece ser viable tampoco, especialmente para las

operaciones basadas en carga de 100% chatarra. Las continuas variaciones en la composición química del material de carga y la escoria, probablemente interfieran con el control preciso de basicidad, viscosidad de la escoria y con la generación de CO.

4.2 Arqueo Eléctrico Debido a Gases Calientes

Dado que la presencia de arcos eléctricos en ambientes de alta temperatura son importantes para las operaciones con alto voltaje de secundario hemos examinado con mayor detalle este punto.

El pico de voltaje entre las mordazas ocurre en el momento en que se levantan los electrodos para romper el arco. Si el voltaje nominal, por ejemplo, es de 1300 V, entonces el pico de voltaje entre las mordazas es del orden de los 2000 V, (considerando un 5% de sobrevoltaje).

La rigidez dieléctrica del aire está dada por la siguiente ecuación:

$$kV/cm = 25.7 \left(\frac{300}{T} \right)$$

Donde T es la temperatura del gas en grados Kelvin (K)⁽²⁾. Entonces, a 3000 °K el campo eléctrico será del orden de los 2.5 kV/cm. Si el gas alrededor de las mordazas fuera puro aire, no habría razón para que haya “arqueo” entre las mordazas, dado que la mínima separación entre éstas es de algunos centímetros (ver figura enseguida). Sin embargo, una publicación de Alexandrov y Bazelyan⁽⁴⁾ enfatiza la importancia del papel que juega la densidad de electrones en este fenómeno. En aire a temperatura entre 1000 y 3000 °K la fuente principal de electrones es debido a ionización de moléculas de NO (con un potencial de ionización de 9.5 eV).

Por ejemplo, a 2000 °K la chispa del arco se produce en cuestión de milisegundos cuando la densidad de electrones es 10^{10} por cm^3 . La figura 5 muestra los resultados de los cálculos para aire alrededor de las mordazas con una densidad de 10^{12} por cm^3 .

Los gases saliendo por los puertos de la bóveda y entre los electrodos reciben calor

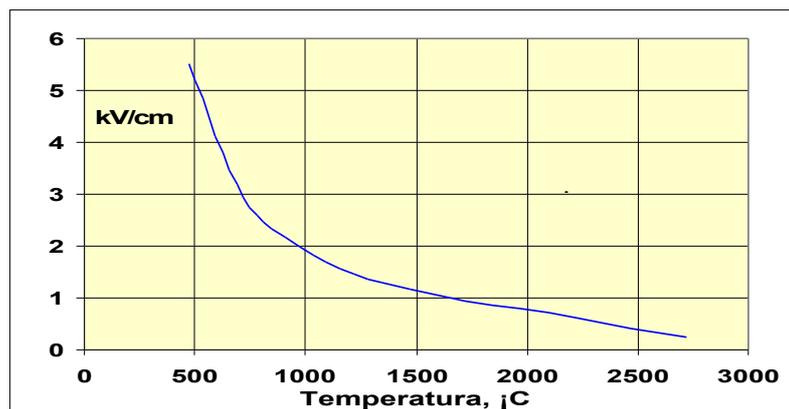


Figura 5. Rigidez dieléctrica del aire en función de la temperatura (Alexandrov and Bazelyan)⁽⁴⁾

proveniente de la combustión dentro del horno, por ejemplo la combustión de CO a CO₂ etc. y acarrean consigo muchas partículas ionizadas metálicas, gaseosas y de polvos. Por lo anterior, la concentración de electrones será mas alta que en el caso del aire puro. En cálculos hechos para aire conteniendo partículas ionizadas de metal de hierro (con valor de ionización de 7.8eV) muestra que la concentración de

electrones se incrementa de 1.3×10^{10} a 2000°K (1727°C) hasta 1.1×10^{12} por cm^3 a 2500°K (2227°C). Es entonces fácil de suponer que habrá condiciones en las cuales el arco eléctrico se presente a valores inferiores a los 0.5 kV/cm . Dado que muchos hornos cuentan ya con voltajes de secundario que producen diferencia de voltaje entre mordazas del orden de los 2kV , existe entonces el riesgo grande de la presencia de arqueo entre mordazas.

De esta manera se concluye que la presencia de arcos eléctricos es más fácil de presentarse bajo las siguientes condiciones:

- Alto voltaje de secundario
- Hornos con círculo de electrodos estrechos
- Alto flujo de gases de combustión (CO) entre las mordazas y los electrodos
- Presencia de vapores metálicos fáciles de ionizar (bajo punto de ionización)
- Sistemas deficientes de extracción de humos y polvos (flama arriba de la bóveda).

Dado que la tendencia en el diseño de hornos apunta hacia el incremento de los primeros cuatro de los puntos anteriores, podríamos decir que este fenómeno será más común en el futuro.

4.3 La Importancia del Círculo de Electrodo

El problema debido a la corriente del arco siguiendo patrones diferentes al normal en el HEA tanto arriba, como abajo de la bóveda, definitivamente adquiere más severidad cuando se incrementa el voltaje secundario y con el diseño del círculo de electrodos de diámetro reducido. Cabe mencionar que esta situación es relativamente nueva, ya que en los hornos de antaño nunca se veía esto, debido a que el voltaje de operación era mucho más bajo. La cuestión del diámetro óptimo del círculo de los electrodos hace necesario una mayor consideración. La siguiente tabla presenta una lista de ventajas y desventajas de tener un diámetro reducido en el círculo de electrodos:

Pro y contra de círculos de electrodos de diámetro reducido:	
Pro	Contra
Incremento de distancia entre arco y panel (reducción de carga térmica en paneles refrigerados)	Incremento de la fuerza de repulsión magnética del arco con la posibilidad de neutralizar el efecto de reducción del diámetro del círculo de electrodos
Generación de un solo orificio de profundización en la chatarra en lugar de tres más pequeños	Requiere un sistema mecánico en el secundario más rígido con el objeto de evitar el contacto entre las mordazas durante la fusión
Reducción del tamaño de la delta (reducción de costo en este rubro)	Mayor riesgo de arqueo en el área de la bóveda

La tendencia actual de seguir incrementando el voltaje secundario, podría llevarnos a reconsiderar el diámetro óptimo del círculo de los electrodos.

4.4 ¿Podrían los Voltajes de CA Alcanzar los Niveles de CD?

¿Porqué los hornos de corriente directa pueden operar con arcos mas largos que los de corriente alterna? Esto, más que nada es una cuestión de ubicación y orientación del arco. En los hornos de corriente directa el arco permanece vertical (y centrado en el horno) durante la mayor parte de la colada, permaneciendo, por lo tanto, retirado

de las paredes y su potencia no estará dirigida hacia los paneles refrigerados. (considerando un diseño correcto de HEA). La mayor corriente a que operan los hornos de corriente directa sirve, también para estabilizar el arco; como se ha mencionado anteriormente.

Una vez que los arcos están cubiertos por la escoria las diferencias entre CA y CD son menos significantes y se podría incluso pensar que bajo estas circunstancias los arcos de corriente alterna podrían alcanzar niveles semejantes a los de corriente directa.

Esencialmente, la desventaja de los arcos de corriente alterna es debido al efecto de repulsión magnética entre los tres arcos. En este aspecto podríamos mencionar una patente ⁽⁵⁾ recientemente otorgada a GraftTech (UCAR) para la reducción de la deflexión de arco por medio de campos magnéticos de corriente alterna. Con esta tecnología sería posible incrementar el diámetro del círculo de los electrodos sin peligro de dañar las paredes del horno en los puntos calientes. Sin embargo, para incorporar esta idea, se necesitaría rediseñar el horno, para minimizar la generación de corrientes parásitas (corrientes de eddy).

REFERENCIAS

- 1 B. Bowman, P. Stafford and S. Alameddine, “**Unusual arcing phenomena in modern arc furnaces**”, 7th Eur. Electric Steelmaking Conf., Venice, 2002, p 1.203-212.
- 2 N.H.S. Uhm, “**Properties of plasmas generated by electrical breakdown in flames**”, Physics of Plasma, Vol 6, No. 11, 1999, p 4366-4374.
- 3 D. Capodilupo, M. Paura, D. Neuschütz and D. Spirin, “**New electrode for ecological and economical steelmaking**”, 7th Eur. Electric Steelmaking Conf., Venice, 2002, p 2.301-311.
- 4 .L. Alexandrov and E.M. Bazelyan, “**The mechanism of re-breakdown within a post-arc channel in long non-uniform air gaps**”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol 31, 1988, p 1343-1351.
- 5 US Patent no. 6,549,557 B1, “**AC arc furnace with auxiliary electromagnetic coil system for control of arc deflection**”. (2003)