

SUBMERGED ARC FURNACES – OPTIMAL ELECTRICAL PARAMETERS

Luis Ricardo Jaccard⁽¹⁾

ABSTRACT

The so-called submerged arc furnaces operate with electrodes inserted into a load of ore and coal. The current flows mainly between the pieces of coal and in some cases small arcs occur between different parts. These furnaces are mainly used to produce ferroalloys, such as ferrosilicon and ferromanganese and also to produce certain metals such as tin from the ore reduction. A particular and important characteristic of these furnaces is that the tips of the electrodes must be at certain distance from the furnace floor for the process to occur efficiently and to avoid deposits of unwanted materials. Between 1923 and 1975, several researchers, such as P.V. Andrae, K.L. Morkramer, W. Kelly and J.A. Persson concluded that to obtain the optimum position for the electrodes it was necessary to operate with certain values of voltage and current that depended on the type of load, the active power and the diameter of the electrodes. But in 1975, J. Westly, the creator of Factor C_3 well known to many of the operators of submerged arc furnaces, presented a technical paper in which he claimed to have found no relationship between optimal values of current and voltage and the electrodes diameter. The main objectives of the paper to be presented are: to show that Westly C_3 factor does not correspond to reality, to rescue the concept of Andrae k factor and to provide a simpler formula to find the ideal values of V and I.

Keywords: saf, submerged arc furnaces, Andrae k factor, J factor, Kelly graphs, saf electrode position, optimal electrical parameters

⁽¹⁾Luis R. Jaccard – EAF and Electrical Systems Consulting – Brazil - jaccard@uol.com.br

HORNOS DE ARCO SUMERGIDO – PARÁMETROS ELÉCTRICOS ÓPTIMOS

Luis Ricardo Jaccard⁽¹⁾

RESUMEN

Los hornos llamados de arco sumergido operan con los electrodos insertados en una carga de mineral y carbón. La corriente circula principalmente entre los trozos de carbón y en algunos casos ocurren pequeños arcos entre las diferentes piezas. Estos hornos se utilizan principalmente para producir ferroaleaciones, como ferro silicio y ferro manganeso y también para producir ciertos metales, como el estaño, a partir de la reducción del mineral. Una característica muy particular y sumamente importante de los hornos de arco sumergido es que las puntas de los electrodos deben estar a una cierta distancia de la solera del horno para que el proceso ocurra en forma eficiente y no se produzcan depósitos de materiales indeseables. Entre 1923 e 1975, diversos estudiosos, como F.V. Andreae, K.L. Morkramer, W. Kelly y J.A. Persson concluyeron que para obtener la posición óptima de los electrodos había que operar con ciertos valores de tensión y corriente que dependían del tipo de carga, de la potencia activa y del diámetro de los electrodos. Pero, en 1975, J. Westly, el creador del factor C_3 , actualmente muy conocido de gran parte de los operadores de hornos de arco sumergido, presentó un trabajo técnico en el cual manifestó no haber encontrado relación entre las corrientes y tensiones óptimas y el diámetro de los electrodos. Los objetivos principales del trabajo a ser presentado son: mostrar que el factor C_3 de Westly no corresponde a la realidad, rescatar el concepto del factor k de Andreae y aportar una fórmula de aplicación más simple para encontrar los valores ideales de V e I.

Palabras clave: heas, horno eléctrico de arco sumergido, factor k de Andreae, factor J, gráficos Kelly, posición del electrodo, parámetros óptimos de operación

1. INTRODUCCIÓN

Los hornos eléctricos de reducción que procesan una carga compuesta de mineral y carbón normalmente son denominados hornos de arco sumergido. En realidad, en estos hornos, la energía necesaria para reducir el mineral es generada básicamente por la corriente eléctrica que circula por la carga provocando eventuales micro-arcos entre las piezas de carbón. El circuito eléctrico es formado por el sistema de alimentación, con reactancia X, y la resistencia R de la carga. Una tensión V_0 es aplicada por el transformador que hace circular una corriente I que provoca una caída de tensión en la reactancia X. El resultado es la tensión electrodo-solera V, aplicada sobre la carga. La corriente que circula por la carga es $I = V/R$ (figuras 1a y 1b), generando, en cada arco, una potencia activa $I^2.R$ que también puede ser calculada como V^2/R . Los valores de la tensión electrodo-solera V y de la corriente I definen completamente el comportamiento eléctrico del horno, al menos en lo que se refiere a la productividad y a los consumos de energía e electrodos.

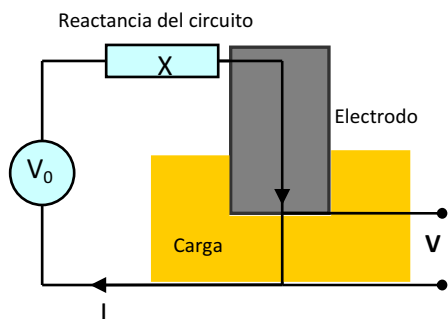


Figura 1a. Circuito eléctrico del horno de arco sumergido
Figure 1a. Electrical circuit of the submerged arc furnace

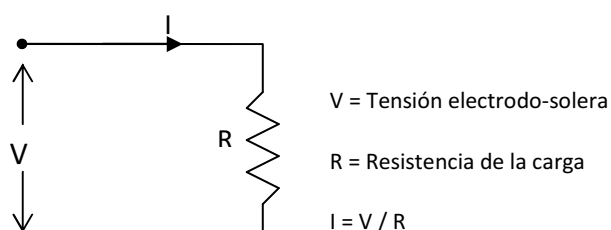


Figura 1b. Parámetros eléctricos del horno de arco sumergido
Figure 1b. Electrical parameters of the submerged arc furnace

⁽¹⁾Luis R. Jaccard – Consultoría en HEA y Sistemas Eléctricos – Brasil - jaccard@uol.com.br

El funcionamiento de estos hornos fue estudiado con profundidad en la primera mitad del siglo pasado, verificándose que para obtener los mejores resultados en relación a consumos de energía y productividad y, también, para evitar la acumulación excesiva de materiales indeseables en la solera era necesario que la punta del electrodo se ubicase en una determinada posición en relación a la carga y que los valores de tensión y de corriente necesarios para que esa condición fuese satisfecha dependían del diámetro de los electrodos.

2. TEORÍAS SOBRE LA OPERACIÓN IDEAL DE LOS HORNOS DE ARCO SUMERGIDO

En 1923, F. V. Andreae ⁽¹⁾ describió la teoría de la resistencia periférica de acuerdo con la cual los valores de la tensión y de la corriente que propiciaban la obtención de la condición ideal de operación eran una función del diámetro del electrodo. Inicialmente, Andreae dedujo que para cada material existe un valor $k = (V/I).D.p$ que define la posición ideal del electrodo, siendo D el diámetro del electrodo. Posteriormente verificó que el factor k variaba con la densidad de potencia p_d , siendo p_d la relación entre la potencia suministrada por un electrodo y la sección del electrodo ($p_d; P/D^2$). De acuerdo con la teoría de Andreae, apoyada por los estudios posteriores de otros autores, entre los cuales puede ser mencionado Morkramer ⁽²⁾, cuanto más alta es la densidad de potencia, mayor es la temperatura de la carga en las proximidades de la punta del electrodo y, en consecuencia, menor es la resistividad de la carga. Por ese motivo, para colocar el electrodo en la posición ideal después de un aumento de la densidad de potencia es necesario reducir la tensión V. En los años 40, W. M. Kelly ⁽³⁾, con autorización de Andreae, aprovechó una gran cantidad de datos prácticos disponibles para representar el factor k en función de p_d para diferentes materiales. En la figura 2 es mostrado el gráfico de Kelly para los hornos de FeSi75. Posteriormente, en 1970, J. A. Persson ⁽⁴⁾, a partir de las informaciones de Andreae y de Kelly y con base en experiencias propias, encontró una relación matemática que pensó que representaría el comportamiento ideal del horno. De acuerdo con Persson, para cada material existiría una tensión ideal que sería proporcional a la raíz cuadrada del diámetro del electrodo: $V; D^{1/2}$. Siguiendo esa expresión, los gráficos de Kelly, en lugar de rectas corresponderían a hipérbolas.

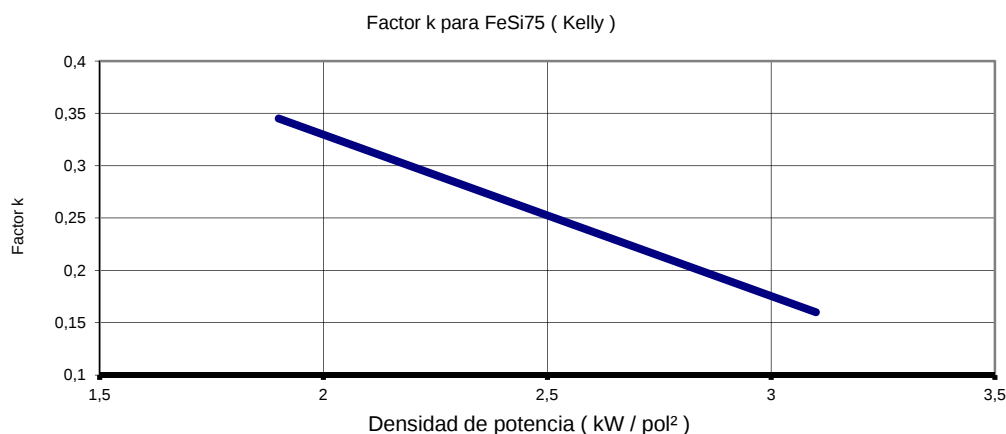


Figura 2. Gráfico del factor $k = (V/I).p.D$, en función de la densidad de potencia p_d , para FeSi75, según Kelly
 Figure 2. Graphic of factor $k = (V/I).p.D$ vs power density p_d , for FeSi75, according with Kelly

Todos los estudios realizados hasta 1975 poseen algo en común; coinciden en la existencia de una correlación entre la tensión electrodo-solera y el diámetro de los electrodos, la cual define la posición ideal del electrodo. Los gráficos de Kelly, basados en los estudios de Andreae, muestran que la tensión y la corriente ideales dependen no sólo del diámetro de los electrodos, pero, también, de la potencia. Según Persson, la tensión ideal dependería solamente del diámetro de los electrodos.

Pero, en 1975, J. Westly ⁽⁵⁾ presentó un trabajo en el cual colocó en duda todos los conceptos anteriores. De acuerdo con sus datos, la tensión y la corriente ideales dependerían únicamente de la potencia y no tendrían ninguna relación con el diámetro de los electrodos. De acuerdo con Westly: $I = C_3.P^{2/3}$ y $V = P^{1/3}/C_3$, siendo C_3 un factor dependiente del material procesado.

Entre 2005 y 2006 realizamos pruebas en hornos de reducción de casiterita y concluimos que la representación gráfica realizada por Kelly a partir de los principios de Andreae es la que mejor retrata la realidad. Basados en nuestra pesquisa ⁽⁶⁾ concluimos que la tensión ideal es directamente proporcional al diámetro de los electrodos e

inversamente proporcional a aproximadamente la raíz cuarta de la potencia activa: $V = J.D/P^{1/4}$, donde J es un factor que depende del material procesado.

Esta fórmula, cuando representada en la forma $k = f(pd)$ muestra una fuerte semejanza con los gráficos de Kelly si las rectas son sustituidas por hipérbolas, mientras que la fórmula del factor C_3 llega a resultados completamente diferentes. En la figura 3 puede ser vista una comparación del gráfico original de Kelly, para FeSi75, con las representaciones de la fórmula del factor C_3 y de nuestra fórmula (factor J).

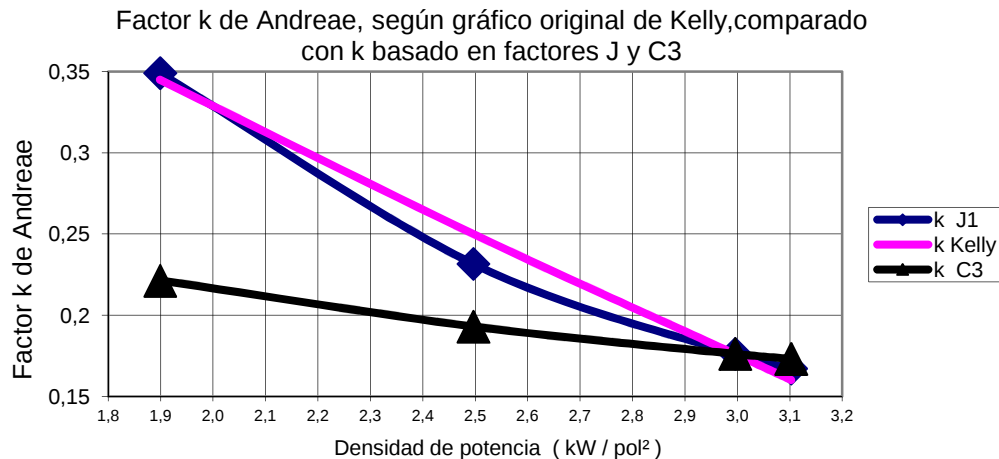


Figura 3. Factor k de Andreae p/FeSi75, según Kelly, comparado con k basado en las fórmulas de los factores C_3 y J.

Figure 3. Andreae factor k according with: Kelly, J factor and C_3 .

Se verifica que la fórmula de Westly no corresponde con la realidad cuando la densidad de potencia es inferior a la máxima.

3. LA FÓRMULA DEL FACTOR J

Después de las pruebas con los hornos de casiterita concluimos que la fórmula de Westly no reflejaba la realidad porque valores similares de C_3 correspondían a niveles de desempeño diferentes y valores completamente diferentes de C_3 provocaban iguales comportamientos (evaluando el desempeño con base en el consumo de energía y en la deposición de materiales sobre la solera).

También evaluamos el factor de Persson ($V/D^{1/2}$), según el cual para igual diámetro de electrodos, un cambio en la potencia no debería provocar la necesidad de realizar aumentos o disminuciones de la tensión ideal, pero esto tampoco fue confirmado en las pruebas, verificándose que para mantener la posición ideal después de un aumento de la potencia era necesario disminuir la tensión (diferente de lo previsto por Persson y opuesto a lo previsto por Westly).

Con base en lo anterior decidimos buscar otra ecuación que representase en forma fiel el comportamiento del horno, llegando a $V = J.D/P^{1/4}$, para hornos con igual distancia entre electrodos. Por el hecho de haber realizado las pruebas en tres hornos que poseían diferentes distancias entre electrodos fue posible concluir preliminarmente que la tensión ideal sería proporcional a la raíz cuadrada de la distancia entre electrodos y, por lo tanto: $V = J_1.D.S^{1/2}/P^{1/4}$, en la cual S es la separación entre centros de electrodos y J_1 es un factor que depende del material procesado.

4. DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA

Dedujimos la ecuación de la tensión ideal con base en los principios establecidos por los autores mencionados anteriormente (con excepción de Westly).

Partimos de la premisa que la condición ideal ocurre cuando una determinada tasa de potencia específica (kW/ton), cuyo valor depende del material procesado, es suministrada a la carga. Cuando la relación entre la potencia y el peso de la carga es demasiado elevada, se desperdicia energía y, lo mismo ocurre cuando la potencia específica es inferior a la ideal. En el primer caso, la energía provista supera el valor necesario para realizar el proceso de reducción y el exceso es utilizado para sobrecalentar el metal y el horno. En el segundo

caso, las reacciones químicas ocurren muy lentamente y el aumento del consumo de energía (kWh/ton) es función de la menor productividad.

Las reacciones químicas ocurren en una zona de reacción cuya sección es proporcional a la potencia. En la figura 4, Dc es el diámetro de la zona de reacción ($Dc^2; P$).

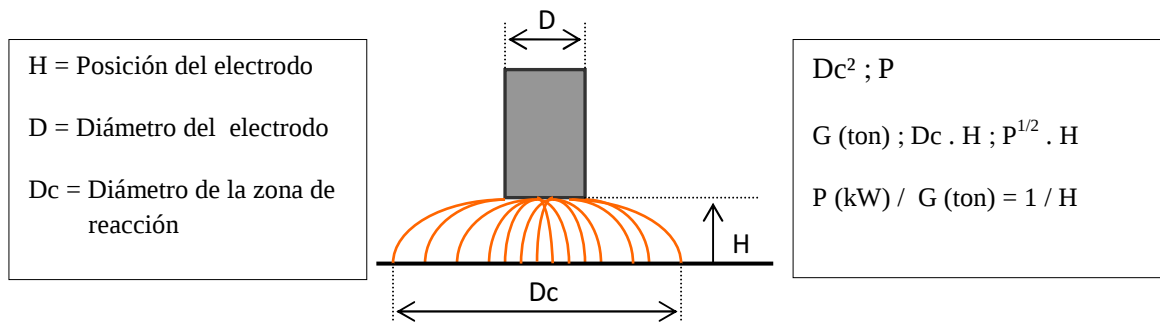


Figura 4. Posición del electrodo H y zona de reacción con diámetro Dc
Figure 4. Electrode position H and diameter Dc of the reaction zone

El peso de la carga que está dentro de la zona de reacción es proporcional a su volumen y éste es proporcional a $H \cdot Dc^2$, donde H es la distancia electrodo-solera que define la posición del electrodo.

La potencia específica (kW/ton) puede ser calculada en función del volumen:

$$P/G \text{ (kW/ton)}; P/Vol \text{ (kW/m}^3\text{)}; P/(H \cdot Dc^2); P/(H \cdot P); 1/H.$$

Lo anterior significa que para cada posición H existe un único valor de potencia específica. Para obtener la potencia específica ideal, el electrodo tiene que estar en la posición ideal. Si la altura H es inferior a la ideal de cada material, la potencia específica es excesiva y, si H es superior a la ideal, la potencia específica es insuficiente. En los dos casos, el consumo específico de energía es superior al óptimo y las reacciones no ocurren en la velocidad ideal. Es interesante notar que, de acuerdo con lo anterior, existe una única altura H ideal para cada material, independiente de la potencia o de la capacidad del horno. Para obtener un aumento de la productividad debe ser aumentado el diámetro Dc de la zona de reacción, lo cual es conseguido aumentando la potencia. Pero, la altura ideal de la zona de reacción, desde la solera hasta la punta del electrodo, es única para cada material procesado.

Como Dc es bastante superior a D (figura 4), la resistencia de la carga es: $R = r \cdot H/Dc = r \cdot H/P^{1/2}$, siendo r la resistividad de la carga.

A esta altura debemos referirnos a los estudios realizados por Downing y Urban (7), en 1965, que comprobaron que la resistividad del material varía en forma inversa con la densidad de potencia ($r; 1/(P/D^2)$). Reemplazando esa expresión en la fórmula de la resistencia, resulta: $R; D^2 \cdot H/P^{3/2}$. Y, para determinado H; $R; D^2/P^{3/2}$.

Recordando que $R = V^2/P$, se concluye que $V^2; D^2/P^{1/2}$ y, finalmente:

$$V ; D / P^{1/4}$$

Llamando J_0 al factor de proporcionalidad correspondiente a cada material: $V = J_0 \cdot D/P^{1/4}$, siendo $J_0 = V \cdot P^{1/4}/D$.

Las pruebas realizadas mostraron, también, una correlación entre la tensión ideal y la raíz cuadrada de la distancia entre centros de electrodos. Esto podría ser explicado de la siguiente forma: el efecto de un electrodo sobre el otro equivale a un aumento de la densidad de potencia sobre la carga de valor inversamente proporcional a la separación entre electrodos: $pd; P/S^2$. Con base en lo anterior es posible concluir que $Dc^2; P \cdot S^2$ y que $Dc; P^{1/2} \cdot S$, llegando a $V; S^{1/2}/P^{1/4}$.

La fórmula final es:

$$V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$$

Donde, $J_1 = V \cdot P^{1/4}/D \cdot S^{1/2}$ es un factor que depende básicamente de la resistividad del material procesado.

Se concluye que la tensión ideal es directamente proporcional al diámetro del electrodo y a la raíz cuadrada de la separación entre electrodos e, inversamente proporcional a la raíz cuarta de la potencia activa.

La proporcionalidad entre la tensión ideal y la raíz cuadrada de la separación entre electrodos debe ser válida sólo dentro de cierta faja de densidad de potencia. Para valores excesivamente bajos de densidad de potencia (figura 5) la tensión ideal debe tender a un valor máximo constante, porque D_c se aproxima de D y la resistencia de la carga pasa a ser inversamente proporcional a D^2 .

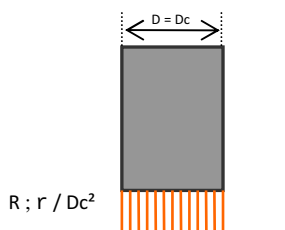


Figura 5. Para densidades de potencia muy bajas, D_c es similar a D y la ecuación del factor J_1 deja de ser cumplida.

Figure 5. For low power densities, D_c is similar to D and the J_1 factor equation ceases to be fulfilled.

Además, la separación entre electrodos, para una cierta potencia, no puede ser demasiado grande porque causa depósitos de material frío en la solera del horno.

Dado que la posición de los electrodos es regulada con base en los valores de corriente y de potencia y no por los valores de tensión electrodo-solera, que son más difíciles de medir, de un punto de vista práctico es más conveniente definir la correlación de la corriente con los otros parámetros, en lugar de usar los valores de tensión. Para eso debe ser reemplazado $V = P/I$ en la fórmula anterior, con lo que se obtiene:

$$I = P^{5/4} / (J_1 \cdot D \cdot S^{1/2})$$

Se verifica que para mantener el electrodo en la posición ideal después de un cambio en el valor de la potencia, manteniendo el mismo diámetro de electrodos, el aumento o la disminución de la corriente a ser realizado es superior al que había sido previsto por Westly ($P^{5/4}$ en lugar de $P^{2/3}$).

5. COMPARACIÓN DE NUESTRA FÓRMULA CON LOS GRÁFICOS DE KELLY Y CON LA FÓRMULA DE WESTLY (FACTOR C3)

Como ya fue mencionado anteriormente, nuestra fórmula, deducida a partir de los resultados encontrados en hornos de reducción de casiterita se adapta casi perfectamente al factor k de Andreae representado por Kelly para FeSi75. Esto significa que calculando V a partir del gráfico $k = f(pd)$ de Kelly para ese material, también se obtiene $V; D/P^{1/4}$.

Para verificar si la fórmula podría ser aplicada para otros materiales deducimos los valores de los exponentes x e y de la fórmula $V; D^x/P^y$ a partir de los gráficos de Kelly y encontramos los siguientes valores (tabla 1):

Material	x	y
FeMn	0,70	0,10
FeSi75	1,02	0,26
CaC ₂	0,94	0,22
AlSi	0,80	0,15
FeSi50	0,68	0,09

Tabla 1. Comparación de las curvas realizadas por Kelly para el factor k de Andreae con la fórmula $V = D^x/P^y$

Table 1. Comparison between Kelly graphic of Andreae factor k and $V = D^x/P^y$

Se observa que la fórmula $V = J \times D / P^{1/4}$ se adapta perfectamente con los gráficos del factor k realizados por Kelly no sólo para FeSi75 como también para CaC₂.

Para FeMn y FeSi50 los efectos de D y P sobre V , según los gráficos de Kelly, son inferiores a los previstos por nuestra fórmula y un poco más próximos a los encontrados por Persson ($V; D^{1/2}$).

La fórmula de Westly ($I;P^{2/3}$; $V;P^{1/3}$), a pesar de duramente criticada por J.A. Persson en las discusiones finales del encuentro de la AIME de 1975, se transformó en la famosa fórmula del factor C_3 , conocida por la mayoría de los operadores de hornos de arco sumergido. El factor k cayó en desuso, probablemente por ser de difícil aplicación. No obstante, basados en gran parte en los trabajos teóricos y prácticos realizados por diversos autores entre 1923 y 1975 y, también, por las pruebas que realizamos en hornos de casiterita entre 2005 e 2006, creemos que la fórmula del factor C_3 , de Westly, no corresponde con la realidad. ¿Entonces, como puede ser explicado que esa fórmula continúe siendo aplicada para conocer los valores óptimos de I y V cuando se desea aumentar la potencia y que no sean encontradas mayores discrepancias con la realidad? La explicación está en el hecho de que los hornos normalmente operan con la máxima densidad de corriente permitida por los electrodos y que, en consecuencia, para realizar un aumento de potencia debe ser aumentado el diámetro del electrodo. Si el diámetro del electrodo no fuese aumentado, la corriente para mantener el electrodo en la posición ideal no sería proporcional a un valor próximo de $P^{2/3}$ y si proporcional a aproximadamente $P^{5/4}$, obligando a utilizar una corriente muy superior. De igual forma, la tensión debería ser disminuida de acuerdo con $1/P^{1/4}$ y no aumentada según $P^{1/3}$. El error de la fórmula es más visible cuando se quiere disminuir fuertemente la potencia, pues la reducción de I deberá ser mucho mayor que la recomendada por la fórmula de Westly y la tensión electrodo-solera deberá ser aumentada y no disminuida como previsto por esa fórmula.

Veamos un ejemplo de aumento de potencia: “Un horno de FeSi75 con electrodos de pasta de 1150 mm opera correctamente con 70 kA y potencia activa de 17,7 MW. Se desea aumentar la potencia para 23 MW y, aplicando la fórmula del factor C_3 , se concluye que la corriente debe ser aumentada para 83 kA. Por nuestra fórmula, si el diámetro del electrodo permaneciese el mismo, la corriente debería ser aumentada para 91 kA. Sin embargo, dado que las corrientes de 83 kA o de 91 kA son demasiado elevadas para el electrodo de 1150 mm, probablemente será decidido aumentar el diámetro para, por ejemplo, 1250 mm. Así, utilizando nuestra fórmula, con ese diámetro, la corriente para mantener la posición ideal del electrodo debería ser de 83,7 kA, similar a la calculada con el factor C_3 ”.

En su trabajo (5), Westly concluye que “*si un horno es operado con, por ejemplo, 20 MW, la resistencia (V/I) ideal de la carga será la misma si el horno opera con electrodos de 1250 mm o de 1550 mm, desde que los materiales de la carga sean los mismos... y continua.... esta conclusión, aparentemente en conflicto con el concepto de Andreae, ciertamente provocará preocupación, pero, nosotros tenemos que aceptarla ya que la experiencia confirma que es realmente así... y, entonces... ¿adónde va a parar el principio de Andreae.....?*”. Entendemos que lo anterior no es verdadero, si la fórmula de Westly (factor C_3) fuese correcta, el horno de 23 MW del ejemplo anterior podría operar con un electrodo de grafito de 700 mm, dado que éste soportaría la corriente de 83 kA y, de acuerdo con sus conclusiones, el diámetro del electrodo no tendría influencia sobre la tensión ideal. Pero, de acuerdo con el factor k y con nuestra fórmula, para operar con el electrodo en la posición ideal, con 23 MW y diámetro de 700 mm debería ser utilizada una corriente de aproximadamente 160 kA (que no sería soportada por el electrodo) y no de 83 kA. Y, si la corriente de 83 kA fuese usada con el electrodo de 700 mm para obtener los 23 MW, el electrodo operaría demasiado alejado de la carga provocando deposición de materiales en la solera y alto consumo específico de energía.

6. CONSUMO DE ENERGÍA Y FACTOR DE POTENCIA (COSENO FI)

Como fue explicado, para obtener el mínimo consumo específico de energía eléctrica, el electrodo debe operar en una determinada posición en relación a la carga. No obstante, dos hornos que procesan el mismo material y que están operando con el electrodo en la posición ideal pueden consumir diferentes cantidades de energía para obtener una tonelada del mismo producto. Un motivo para que eso ocurra puede ser la operación con diferentes rendimientos eléctricos. El rendimiento eléctrico es tanto mayor cuanto mayor es la resistencia de la carga: $\eta_e = 1/(1 + r/R)$, donde r es la resistencia de pérdidas de los conductores y $R = V/I$ es la resistencia de la carga. De la anterior se concluye que si la posición ideal se obtiene con un valor de tensión superior, el rendimiento eléctrico también es mayor y el consumo de energía es menor. Por lo tanto, si con un electrodo de mayor diámetro es posible obtener la posición ideal con una tensión mayor, puede llegarse a la conclusión que un diámetro de electrodo mayor propicia la obtención de un consumo de energía menor.

En la figura 6 se verifica que un horno trifásico de FeSi75 con una resistencia de pérdidas de 0,3 mOhm, operando con potencia de 20 MW podría estar operando con rendimiento eléctrico de 0,74 (pérdidas eléctricas de

26 %) si los electrodos fuesen de 115 cm y con rendimiento eléctrico de 0,86 (pérdidas eléctricas de 14 %) si utilizase electrodos de 150 cm de diámetro (considerando igual r para ambos hornos).

Una ventaja importante de operar con tensiones más elevadas es la obtención de un aumento del coseno ϕ . Se observa en la figura 6 que el aumento de la tensión posibilitado por el aumento del diámetro de 115 cm para 150 cm, en un horno de 20 MW con una reactancia de 1,3 mOhm, eleva el coseno ϕ de 0,58 para 0,78. Considerando como verdadera nuestra fórmula ($V; 1/P^{1/4}$), para mantener la posición ideal, a un aumento de potencia debería corresponder una disminución de la tensión y, eso es lo que felizmente ocurre cuando el horno opera con coseno ϕ superior a 0,707.

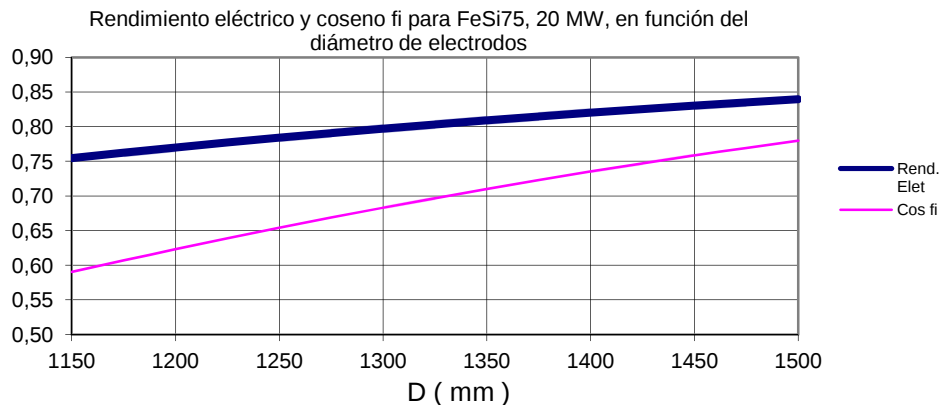


Figura 6. Rendimiento eléctrico y coseno ϕ en función del diámetro de electrodos, para FeSi75, 20 MW.

Figure 6. Electrical efficiency and power factor vs. electrode diameter, for FeSi75, 20 MW.

Al contrario, cuando el horno opera con coseno ϕ inferior a 0,707, un aumento de la corriente provoca, además de la caída de la tensión, una disminución de la potencia, lo cual lleva a concluir que para cosenos ϕ inferiores a 0,707, las variaciones de la corriente alrededor del valor de referencia causan desvíos mayores sobre la posición ideal. En el gráfico de la figura 7 se verifica que la posición ideal, para 15,5 MW, en el horno con electrodos de 115 cm de diámetro, se obtiene con una corriente de 64 kA y coseno ϕ próximo de 0,707. En este caso, si la corriente aumentase para 73 kA, la potencia real caería para 14,2 MW, alejándose fuertemente del valor ideal para esa corriente (16,9 MW).

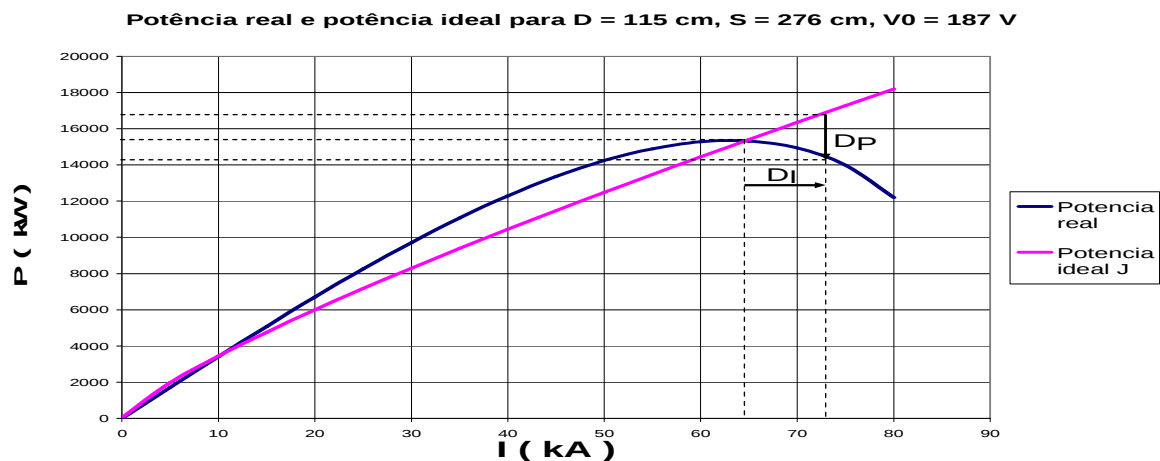


Figura 7. Con bajo coseno ϕ una pequeña variación de la corriente provoca un fuerte desvío de la posición ideal.

Figure 7. With low power factors, small changes of current cause a strong deviation of the ideal position.

Pero, en el caso del horno con electrodos de 150 cm (figura 8), una potencia de 17,5 MW puede ser obtenida con 52 kA y alto coseno ϕ , verificándose que para variaciones de corriente entre 25 kA y 60 kA el electrodo se mantiene prácticamente en la posición ideal.

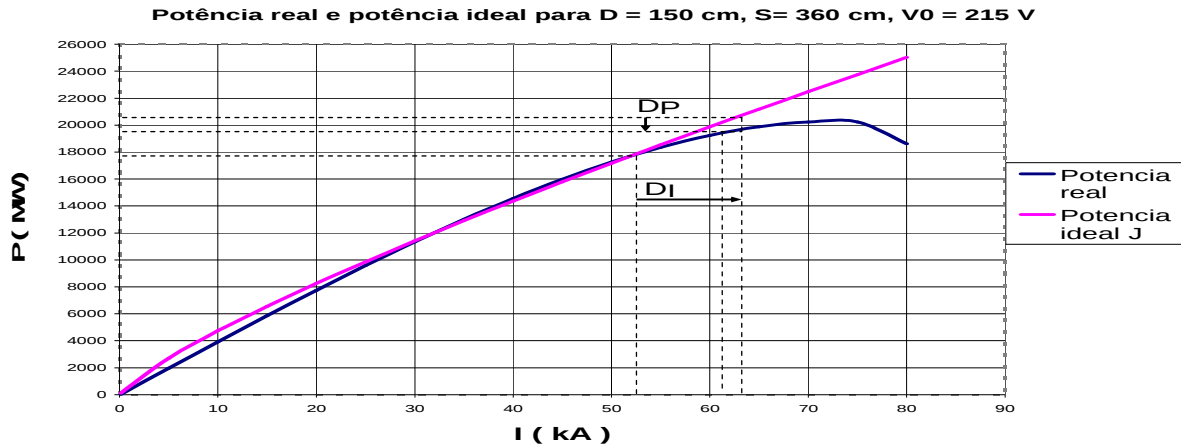


Figura 8. Con altos cosenos fi, fuertes variaciones de la corriente causan pequeños desvíos de la posición ideal.

Figure 8. With high power factor, strong current variations cause small deviation from the ideal position.

7. CONSUMO DE ELECTRODOS

La correlación entre el consumo específico de electrodos y los parámetros de operación de los hornos de arco era, hasta los años 80, un asunto sobre el cual se sabía muy poco. Se aceptaba que el consumo de 4 a 6 kg de electrodo por tonelada producida en los hornos de arco directo utilizados para producir hierro y acero era algo natural e inmutable. En 1972, W. E. Schwabe⁽⁸⁾ ya había publicado un excelente artículo que explicaba brillantemente la física del consumo de electrodos pero en el cual, infelizmente para los consumidores, no deducía una fórmula que, en forma práctica, permitiese entender fácilmente que acciones había que tomar para reducir significativamente el consumo de electrodos. Sólo en el final de los años 80, debido al aumento del precio del grafito, provocado por el encarecimiento del petróleo, fue realizado un esfuerzo mayor para entender esa cuestión e verificado que para reducir el consumo debía ser aumentada la tensión de arco.

En 1988 presentamos nuestra fórmula ⁽⁹⁾ para cálculo del consumo específico de electrodos: $C_e \text{ (kg/t)} = K \cdot (I/V) \cdot (D^2/d^2) \cdot q_{ee}$, en la cual D es el diámetro original de los electrodos, d es el diámetro de la punta de los electrodos después del desgaste, q_{ee} (kWh/t) es el consumo específico de energía eléctrica y K es un factor que depende de la calidad de los electrodos. El factor D^2/d^2 representa el efecto de la oxidación lateral.

En la figura 9 puede ser visto como disminuye el consumo de electrodos al aumentar, en igual proporción, el diámetro y la separación entre electrodos en un horno trifásico de FeSi75 de 20 MW, partiendo de la premisa de una muy baja oxidación lateral. El consumo podría caer a la mitad utilizando electrodos de 150 cm en lugar de electrodos de 115 cm. La reducción del consumo de electrodos no es consecuencia directa de la menor densidad de corriente en el electrodo, pero sí de la posibilidad, proporcionada por el electrodo de diámetro mayor, de operar en la posición ideal con tensiones más altas y corrientes más bajas.

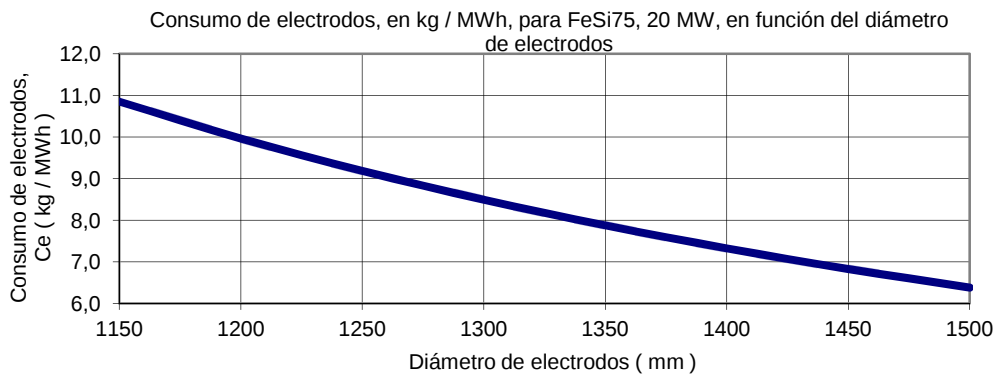


Figura 9. Consumo de electrodos (kg/MWh), para FeSi75, en función del diámetro de los electrodos, para 20 MW.

Figure 9. Electrode consumption (kg/MWh) vs electrode diameter, for FeSi75 and power of 20 MW.

8. CONCLUSIONES

Partiendo de la premisa que la condición ideal de operación de los hornos de arco sumergido ocurre cuando una determinada tasa de potencia específica (kW/ton) es suministrada a la carga fue deducido que para cada material existe una única posición óptima del electrodo (distancia óptima de la punta del electrodo a la solera del horno). Fue también concluido que los valores de tensión y corriente que propician el posicionamiento ideal del electrodo dependen de su diámetro y de la separación entre las diferentes columnas, como fue expresado en la ecuación " $V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$ ", válida en cierto entorno de densidad de potencia p_d (kW/cm²). Esa fórmula confirma los resultados de los gráficos del factor k de Andreae realizados en la década de 40 por W. M. Kelly aprovechando una gran cantidad de datos prácticos. La principal diferencia es una leve corrección que transforma las rectas en hipérbolas. La fórmula de Westly $I = C_3 \times P^{2/3}$ que establece que la corriente ideal no depende del diámetro de los electrodos, no corresponde a la realidad.

Los gráficos del factor k y la fórmula del factor J permiten llegar a algunas conclusiones de carácter práctico:

- a) Cuando se trata de hornos existentes, con determinados valores de diámetro y separación entre electrodos, para mantener el electrodo en la posición ideal, después de un aumento del valor de la potencia activa, es necesario realizar una disminución de la tensión electrodo-solera $V; 1/P^{1/4}$ en lugar del aumento que era previsto por la fórmula del factor C_3 , de Westly ($V; P^{1/3}$). El aumento de corriente para mantener la posición ideal en esas circunstancias es proporcional a $P^{5/4}$ y no a $P^{2/3}$ como había sido previsto por la fórmula del factor C_3 .
- b) Aplicando nuestra fórmula o la del factor k al proyecto de nuevos hornos se verifica que, para igual potencia, hornos de arco sumergido con electrodos de mayor diámetro permiten la operación ideal con menores corrientes y mayores tensiones, posibilitando reducciones del consumo de electrodos y, en menor medida, del consumo de energía. Una limitación práctica para conseguir esos objetivos, especialmente en hornos de alta potencia, es la dificultad de producir electrodos de diámetro cada vez mayor.
- c) Una clara ventaja de obtención de tensiones electrodo-solera ideales más elevadas (mediante la utilización de mayores D y S) es la de favorecer la operación con cosenos ϕ superiores a 0,707. Si el horno opera con cosenos ϕ inferiores o próximos de 0,707, un aumento de la corriente provoca una reducción de la potencia real, en lugar del aumento requerido para mantener la posición ideal del electrodo (ver figura 7). Por lo contrario, cuando el horno opera con altos cosenos ϕ , a un aumento o una disminución de la corriente corresponde una variación en igual sentido de la potencia y el electrodo se mantiene en una posición más próxima de la ideal (ver figura 8). Esto es particularmente importante para hornos que operan con alta potencia y procesan cargas de baja resistencia eléctrica (menor coseno ϕ para igual reactancia).

REFERENCIAS

1. Andreae, F. V.: Trans A.I.E.E. 69, 557 (1950) – Trans. Electrochem Soc. 52 152 (1927).
2. Morkramer, K. L.: Dimensionierungsgrundlagen von Elektro-Reduktionsoföfen, Electrowärme Band 19, Nr 3, März 1961 – Traducción al inglés.
3. Kelly, W.M.: "Design and Construction of the Submerged Arc Furnace" Carbon and graphite News (1952), Vol 5, Nº1.
4. Persson, J.A.: "The Significance of Electrode to Hearth Voltage in Electric Smelting Furnaces" AIME Electric Furnaces Proceeding, 28, 174 (1970).
5. Westly J.: "Critical Parameters in Design and Operation of the Submerged Arc Furnaces" Electric Furnaces Proceedings (1975) – AIME Meeting.
6. Jaccard, L. R.: "Correlação entre tensão ideal, potência e diâmetro de eletrodos nos fornos de arco submerso – Fator "J" - XXXVIIIº Seminário de Aciaria – Internacional – Belo Horizonte – Brasil (2007).
7. Downing J.H, Urban, L.: "Electrical Conduction in Submerged Arc Furnaces" AIME Electric Furnace Proceedings, (1965).
8. Schwabe, W.E. "The mechanics of consumption of graphite electrodes in electric steel furnaces" Jornal of Metals (1972).
9. Jaccard L.R. "Consumo específico de eletrodos em fornos elétricos a arco – Correlação com os fatores de operação" – 43º Congresso Anual – ABM – Belo Horizonte – Brasil (1988).