

# OPERATION OF THE ELECTRIC ARC FURNACE – WITH EXAMPLES

Luis Ricardo Jaccard<sup>(1)</sup>

## ABSTRACT

Many of the concepts used for operation of arc furnaces were already known at the end of the nineteenth century. In the second half of the twentieth century were made significant improvements not only in the electromechanical project of the furnaces but also on the steel production process, such water cooling walls, foamy slag, transformers with higher power and voltages, oxygen and gas injection and new electrode drive systems. It must be mentioned the most modern electrode position controllers and especially the wide range of information displayed to the operators for monitoring and management of the furnace operation. However, despite all these advances, it seems that in recent decades it has been lost the notion that the operation of these furnaces depends basically on the arc behavior which is based primarily on the values established for voltage, current and reactance of the circuit. The aim of this paper is to clarify some concepts about which it seems to be some confusion. Between others, the following topics will be treated: electrical energy consumption and total energy consumption, arc stability, operational power factor, operational reactance, arc voltage, long arc and unstable arc, long arc and short arc. They are also briefly addressed the issues of the disturbances caused by the furnaces on the power supply and the effects of electrical parameters on the consumption of electrodes and refractory.

**Keywords:** eaf, electric arc furnace, electrical parameters, arc stability, eaf energy consumption, arc voltage

---

<sup>(1)</sup>Luis R. Jaccard – EAF and Electrical Systems Consulting – Brazil - [jaccard@uol.com.br](mailto:jaccard@uol.com.br)

# OPERACIÓN DEL HORNO ELÉCTRICO DE ARCO – CON EJEMPLOS

Luis Ricardo Jaccard<sup>(1)</sup>

## RESUMEN

Muchos de los conceptos aplicados a la operación de los hornos de arco ya eran conocidos en el final del siglo diecinueve. En la segunda mitad del siglo veinte fueron realizadas importantes mejoras en el proyecto electromecánico de los hornos y en el proceso de producción de acero, tales como los paneles refrigerados con agua, la escoria espumosa, los transformadores de alta potencia e elevada tensión, la inyección de energía química y los nuevos sistemas de accionamiento de electrodos, más rápidos e eficaces. No pueden dejar de ser mencionados los reguladores de posición de los electrodos, más modernos y con amplia gama de informaciones para que los operadores puedan monitorear el funcionamiento del horno y aplicar las correcciones que se hagan necesarias. Sin embargo, a pesar de todos esos avances, parecería que en las últimas décadas se ha perdido un poco la noción de que la operación de estos hornos depende básicamente del comportamiento del arco y que éste, por su vez, es función de los valores establecidos para la tensión, la corriente y la reactancia del circuito. El objetivo de este trabajo es intentar aclarar algunos conceptos sobre los cuales a veces existe una cierta confusión. Son tratados, entre otros, los siguientes temas: consumo de energía eléctrica y consumo total de energía, estabilidad de arco, factor de potencia operacional, reactancia operacional, tensión de arco, diferencias entre arco largo y arco inestable y, entre arco largo y arco corto. También son abordados resumidamente los temas de las perturbaciones provocadas por los hornos sobre la red eléctrica y los efectos de los parámetros eléctricos sobre los consumos de electrodos y refractarios.

**Palabras clave:** hea, horno eléctrico, arco eléctrico, parámetros eléctricos, estabilidad de arco, consumo de energía, tensión de arco

## 1. INTRODUCCIÓN

Seleccionamos algunos temas relacionados con los hornos eléctricos de arco sobre los cuales entendemos que a veces existen interpretaciones equivocadas. Aclaramos que este artículo refleja nuestro conocimiento actual y que algunos de estos conceptos, a pesar de haber sido el fruto de un lento aprendizaje, están sujetos a nuevas interpretaciones, de nuestra parte y, ciertamente de la parte de otros. De cualquier forma, en este momento es así que entendemos los temas que a seguir relatamos.

## 2. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y PROGRAMAS DE FUSIÓN

Al contrario de lo que a veces se piensa, el consumo de energía del horno, en condiciones normales, no depende de los parámetros eléctricos de operación y mucho menos del desempeño del regulador de la posición de los electrodos. Comparar los consumos de energía conseguidos con los programas de fusión a), b) o c) no es de gran utilidad, especialmente cuando los consumos que se comparan son solamente los relativos a la energía eléctrica. El consumo de energía para producir una tonelada de acero depende del tamaño del horno, del tipo de carga, de los tiempos de horno parado y de horno operativo, de las pérdidas térmicas en el ambiente y en el agua de enfriamiento de las paredes, de las pérdidas en la escoria, en el pié líquido y en la refrigeración de electrodos y, depende, también, de la temperatura de vaciado del acero, del rendimiento metálico y, entre otros factores, de las pérdidas eléctricas en los conductores. Este último es el único ítem que, en condiciones normales, tiene alguna relación con la operación eléctrica del horno. Para hornos de gran capacidad que operan con tensiones relativamente altas, el rendimiento eléctrico es del orden de 94/95 %; es decir, de cada 400 kWh/t utilizados, solamente 20 a 24 kWh/t son perdidos en los conductores del horno y, lo que es más importante, generalmente un gran aumento de la corriente provoca una muy pequeña disminución del rendimiento. *Nota:* existe una condición extrema en la cual el consumo de energía medido puede realmente aumentar en función de los parámetros eléctricos (ver ítem 8). En general, para hornos de aproximadamente 100 toneladas o más, que funden chatarra, el consumo específico de energía es del orden de 560 kWh por tonelada de acero líquido. Como una parte de esa energía es suministrada por vía química, el consumo de energía eléctrica es siempre igual a “560 kWh/t – consumo de energía química (kWh/t)”. O sea, cuando se comparan diferentes programas de fusión,

---

<sup>(1)</sup>Luis R. Jaccard – Consultoría en HEA y Sistemas Eléctricos – Brasil - [jaccard@uol.com.br](mailto:jaccard@uol.com.br)

el consumo de energía eléctrica, para igual tipo de carga, varía básicamente en función de la mayor o menor proporción de energía química utilizada y no tiene prácticamente ninguna relación con el programa de tensiones y corrientes a no ser el hecho de que la proporción de energía química inyectada aumenta cuando la potencia eléctrica es disminuida, debido al mayor tiempo disponible para inyección. Para saber si hubo una variación en el consumo de energía, deben ser comparados los consumos totales (eléctrico + químico) y no apenas los consumos de electricidad.

*Ejemplo: Un horno de 100 toneladas opera con una tensión de 1000 V, corriente de 60 kA, factor de potencia de 0,74 y potencia activa de 76.900 kW. El consumo de energía eléctrica es de 410 kWh/t y el consumo de energía química es de 150 kWh/t. Con el presunto objetivo de disminuir el consumo de energía eléctrica se reduce la corriente provocando una caída de 10 % en la potencia activa (cayendo para 69.200 kW). Como consecuencia de esta acción, el consumo de energía eléctrica cae para 398 kWh/t y se interpreta inicialmente que la disminución de la corriente provocó una disminución del consumo de energía. En realidad, el consumo de energía continuó en 560 kWh/t y el consumo de energía química aumentó para 162 kWh/t. Es decir, hubo una sustitución de consumo eléctrico por químico y no una reducción de consumo. Además, el tiempo de operación del horno aumentó aproximadamente 8 %. El aumento en el consumo de energía química fue ocasionado por el mayor tiempo disponible para inyección de oxígeno y gas.*

### 3. POTENCIA ACTIVA, CORRIENTE Y TENSIÓN DE ARCO

Hay que tener en mente que el desempeño del arco depende solamente de la tensión de arco  $V_a$  y de la corriente  $I$ . Para cada longitud de arco sólo puede haber una cierta tensión de arco y el valor de la potencia del arco será siempre igual al producto de la tensión de arco por la corriente:  $P(kW) = 3 \times V_a(V) \times I(kA)$ , para hornos con tres electrodos. Si el electrodo está en una cierta posición y hay arco, la tensión de ese arco sólo puede ser proporcional a la distancia entre la punta del electrodo y la carga metálica:  $V_a(V) = L_a(mm)$ . Para igual longitud de arco (posición del electrodo) sólo hay un valor posible de tensión de arco. Para ese valor de tensión de arco, la corriente dependerá del circuito, aumentando cuando aumenta la tensión de alimentación y disminuyendo cuando aumenta la reactancia  $X$  del circuito. El regulador del movimiento de los electrodos tiene como misión colocar el electrodo en una posición que provoque un determinado valor de corriente escogido por el operador. Para ese valor de corriente y para cada valor de tensión aplicada y de reactancia existirá un único valor de tensión de arco, es decir, una única posición del electrodo en relación a la carga. Si debido a un movimiento de la carga metálica el arco se acorta, la corriente aumenta, aumentando la caída de tensión en la reactancia, en consecuencia, la tensión de arco disminuye, y el regulador hace subir el electrodo hasta retornar a la corriente y la longitud de arco originales.

*Ejemplo: si  $P = 60.000 \text{ kW}$ ,  $I = 50 \text{ kA}$ ,  $V_a = 60.000 \text{ kW} / (50 \text{ kA} \times 3) = 400 \text{ V}$  y  $L_a$  aproximadamente 400 mm.*

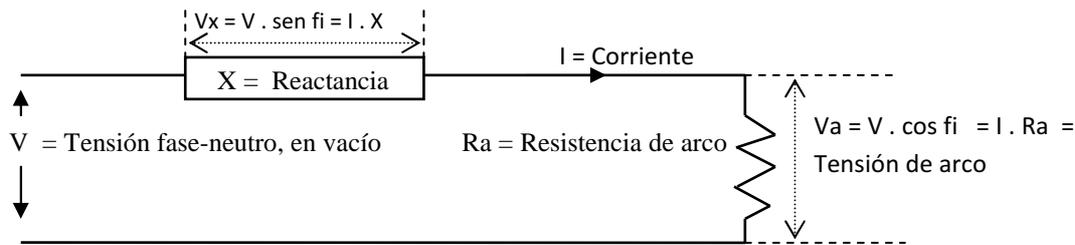
### 4. TENSIÓN DE ARCO Y COSENO FI (FACTOR DE POTENCIA)

En un horno alimentado por una cierta tensión entre fases  $V$ , que opera con una determinada corriente  $I$ , la tensión de arco  $V_a$  dependerá del ángulo  $\phi_i$  (ángulo entre los vectores tensión y corriente). Para un horno trifásico:  $V_a = V \times \cos \phi_i / 1,732$ .

*Ejemplo: si  $V = 600 \text{ V}$  y  $\cos \phi_i = 0,75$ ,  $V_a$  será  $600 \text{ V} \times 0,75 / 1,732 = 260 \text{ V}$*

Para determinada tensión aplicada entre fases, el ángulo  $\phi_i$  dependerá de la intensidad  $I$  de la corriente y de la reactancia  $X$  del circuito:  $\text{seno } \phi_i = I \times X \times 1,732 / V$  (figura 1). Normalmente, como puede ser inferido de la fórmula, un aumento de la corriente o de la reactancia provoca una disminución del factor de potencia y un aumento de la tensión aplicada aumenta el factor de potencia (más adelante será visto que en la zona de arco inestable ocurre lo contrario).

*Ejemplo: Calcular la tensión de arco, el coseno  $\phi_i$  y la potencia activa de un horno cuyo circuito posee una reactancia total de 6 mOhm, es alimentado por una tensión de 800 V (en vacío) y opera con una corriente de 50 kA:  $\text{sen } \phi_i = 50 \text{ kA} \times 6 \text{ mOhm} \times 1,732 / 800 \text{ V} = 0,65$ ;  $\cos \phi_i = 0,76$ , tensión de arco  $V_a = 800 \text{ V} \times 0,76 / 1,732 = 351 \text{ V}$ ,  $P = 3 \times 351 \text{ V} \times 50 \text{ kA} = 52.650 \text{ kW}$ . ( $P$  también puede ser calculada como  $1,732 \times V \times I \times \cos \phi_i$ ).*



**Figura 1.** Circuito equivalente del horno eléctrico de arco

**Figure 1.** Equivalent circuit of the electric arc furnace

## 5. CONSUMO DE ENERGÍA, POTENCIA ACTIVA Y TIEMPO POWER ON

El consumo de energía necesario para producir una tonelada de acero, a partir de chatarra, en hornos de fusión operados correctamente, varía actualmente entre aproximadamente 550 kWh y 620 kWh, dependiendo principalmente de la capacidad de carga del horno. De ese total, 380 kWh corresponden a la energía útil necesaria para fundir y elevar la temperatura de la carga hasta aproximadamente 1620/1640 °C, por lo que el rendimiento normal de estos hornos es de, como máximo, aproximadamente  $100 \times 380 \text{ kWh/t} / 550 \text{ kWh/t} = 69 \%$ . Significa que aproximadamente 31 % de la energía o 170 kWh/t son perdidos (en la escoria, en el ambiente, en el agua de las paredes y en los conductores eléctricos). Normalmente, el acero es afinado en un horno secundario donde se gastan otros 25 a 40 kWh/t, por lo que el consumo total se eleva a 575/680 kWh/t, sin considerar la energía gastada para accionar el sistema de extracción de humos. El rendimiento térmico de los hornos no ha mejorado con el tiempo, contrariamente a lo que hacen pensar algunos artículos que relatan reducciones de consumo basadas en el uso de energía química. Las pérdidas térmicas (kWh/h) han aumentado considerablemente en función de las paredes refrigeradas y de los sistemas de extracción de humos más eficientes, lo que ha sido compensado con los tiempos de producción más cortos, que han conducido a mayores productividades (t/h), manteniendo el consumo específico de energía (kWh/t) en niveles similares a los que se conseguían en los antiguos hornos con paredes de refractarios y sin extracción forzada de humos. Lo que ha cambiado en relación al pasado es que una gran parte de la energía de entrada es provista en la forma de energía química y que las paredes refrigeradas y la escoria espumosa permiten la operación con densidades de potencia muy superiores, reduciendo notablemente los tiempos necesarios para producir una tonelada de acero. Es común actualmente que de un total de 550 kWh/t, aproximadamente 150 kWh/t sean provistos por energía química (inyectores de oxígeno y carbón y quemadores de gas), correspondiendo 400 kWh/t a la energía eléctrica. El principal efecto de la utilización de altas potencias eléctricas y químicas ha sido la reducción del tiempo útil necesario para realizar una colada (conocido como tiempo "power on"). Otros efectos del aumento de la energía química son la reducción del consumo específico de electrodos (kg/t), que es proporcional al consumo específico de energía eléctrica (kWh/t), y la posibilidad de operar en tiempos más cortos sin aumentar la erosión de las paredes (igual tiempo power on con menor potencia eléctrica).

*Ejemplo: Un horno de 120 toneladas opera con un consumo de energía eléctrica de 400 kWh/t e potencia activa promedio de 90.000 kW. El tiempo power on es:  $T = 120 \text{ t} \times 400 \text{ kWh/t} \times 60 \text{ min/h} / 90.000 \text{ kW} = 32 \text{ minutos}$ . Supongamos que para el mismo horno se reduzca la energía aportada en forma química, en 50 kWh/t. Siendo así, el consumo de energía eléctrica aumentará para 450 kWh/t y el tiempo power on aumentará para  $T = 120 \text{ t} \times 450 \text{ kWh/t} \times 60 \text{ min/h} / 90.000 \text{ kW} = 36 \text{ minutos}$ .*

## 6. VARIACIÓN DE LA REACTANCIA CON LA OPERACIÓN DEL HORNO, COSENO FI REAL

El comportamiento del arco no es lineal y por ese motivo la onda de corriente no es perfectamente sinusoidal. Las corrientes armónicas (frecuencias superiores a la de la fundamental) del arco circulan por el circuito provocando un aumento de la reactancia (la reactancia X es el producto de la inductancia por la frecuencia,  $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ ). El motivo principal de la distorsión de la onda es el retardo de la reignición del arco. Cada vez que la corriente pasa por cero (y eso ocurre 120 veces por segundo para un sistema de 60 Hz) el arco se extingue, e inmediatamente precisa ser reiniciado. Dependiendo de la condición del medio, la ignición del arco se torna más o menos rápida. Cuando el arco se establece sobre la chatarra, el retardo en la ignición es mayor y a medida que aumenta la temperatura del ambiente del horno y especialmente cuando el metal forma un baño líquido, el retardo disminuye. Además, y ese es el aspecto que más nos interesa, el retardo de la ignición depende del ángulo fi entre los vectores tensión y corriente. Cuanto más elevado es el coseno fi más lenta es la reignición del

arco (pocos milisegundos) y mayores son la distorsión de corriente y, en consecuencia, la reactancia real del circuito. En términos prácticos, lo importante a ser destacado es que la reactancia real del circuito del horno no es igual a la reactancia calculada con onda sinusoidal sino bastante superior ( $X_{real} > X_{sinusoidal}$ ). Llamamos factor Fop a la relación entre  $X_{real}$  (o  $X_{operacional}$ ) y  $X_{sinusoidal}$ ;  $Fop = X_{real} / X_{sinusoidal}$ . El factor Fop es mayor durante la fusión de chatarra y menor en el afino (baño plano y escoria espumosa) y es tanto mayor cuanto mayor es el coseno  $\phi$  sinusoidal (ver figura 2 con Fop para el inicio de la fusión).

*Ejemplo de cálculo de los parámetros eléctricos: Sea un horno cuyo circuito tiene una reactancia sinusoidal total de 4,2 mOhm (horno de baja reactancia), es alimentado con una tensión fase - fase, de 800 V en vacío y tiene su corriente regulada en 60 kA. El seno  $\phi$  sinusoidal será  $60 \text{ kA} \times 4,2 \text{ mOhm} \times 1,732 / 800 \text{ V} = 0,545$ . El coseno  $\phi$  sinusoidal será 0,838 y Fop aproximadamente 1,37 (inicio de fusión). En este caso,  $X_{real} = 1,37 \times 4,2 \text{ mOhm} = 5,75 \text{ mOhm}$ . El seno  $\phi$  real será:  $62 \text{ kA} \times 5,75 \text{ mOhm} \times 1,732 / 800 \text{ V} = 0,77$  y el coseno  $\phi$  real (factor de potencia real) será 0,64.*



**Figura 2.** “Reactancia real/reactancia sinusoidal” en función del seno  $\phi$  sinusoidal

**Figure 2.** “Actual reactance/sinusoidal reactance” vs sinusoidal sine phi

## 7. EFECTO DE LA REACTANCIA REAL SOBRE LA TENSIÓN DE ARCO Y LA POTENCIA

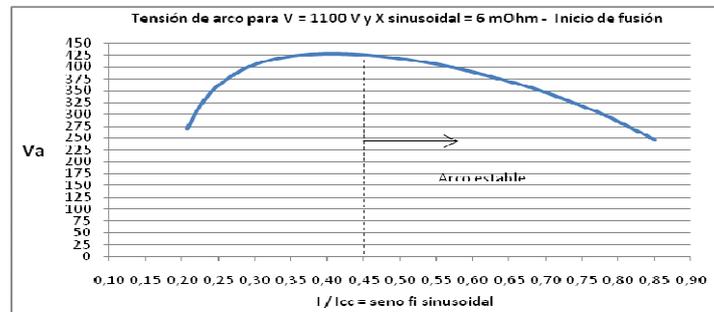
Se mencionó que a medida que el coseno  $\phi$  sinusoidal aumenta, la reactancia real también aumenta y hace con que el factor de potencia real sea muy inferior al previsto con la onda sinusoidal. Como consecuencia, la tensión de arco y la potencia activa reales son muy inferiores a los valores que serían calculados considerando la reactancia sinusoidal.

*Para el ejemplo anterior, la tensión de arco que podría haber sido calculada con la reactancia sinusoidal hubiera sido:  $800 \text{ V} \times 0,838 / 1,73 = 387 \text{ V}$  y la potencia activa prevista sería  $P = 3 \times 387 \text{ V} \times 62 \text{ kA} = 71.982 \text{ kW}$ . Pero, debido al aumento de la reactancia, la tensión de arco en el inicio de fusión será de sólo  $800 \text{ V} \times 0,64 / 1,73 = 296 \text{ V}$  y la potencia activa resultará igual a  $3 \times 296 \text{ V} \times 62 \text{ kA} = 55.056 \text{ kW}$ .*

## 8. ESTABILIDAD DE ARCO, LÍMITE DE ESTABILIDAD Y MÁXIMO COSENO FI

Un efecto importante a ser considerado es que para cosenos  $\phi$  sinusoidales superiores a un cierto límite, al disminuir la corriente, la tensión de arco y el factor de potencia real en lugar de continuar aumentando, se estacionan en un cierto valor y después comienzan a disminuir fuertemente. El punto donde esto ocurre es conocido como límite de estabilidad. Si el valor de corriente que se pretende regular es disminuido a un valor inferior al del límite de estabilidad, el regulador de la posición de electrodos no consigue más mantener un arco relativamente estable, porque, a una disminución de corriente, en lugar de un aumento de la tensión de arco, corresponde una disminución de esa tensión (figura 3). En ese momento, el gradiente de aumento de la reactancia es superior al de la disminución de la corriente. Supongamos que se desea operar el horno con un valor de corriente inferior al del límite de estabilidad. Para disminuir la corriente, el único recurso del regulador es levantar el electrodo para aumentar la tensión de arco. En condiciones normales, al levantar el electrodo ocurre un aumento de la tensión de arco, pero, si se intenta disminuir la corriente a valores inferiores al del límite de estabilidad, al levantar el electrodo ocurre una disminución de la tensión de arco y el arco se extingue porque la distancia electrodo-carga es superior a la correspondiente a esa tensión de arco. Cuando el regulador nota que hubo una interrupción de corriente ordena bajar el electrodo pero la tensión de arco, en lugar de disminuir, aumenta. Debido a esto, la corriente aumenta demasiado, el regulador levanta nuevamente el electrodo, y ese efecto de “bombeo”, si un valor superior de corriente no es regulado, se mantiene indefinidamente. El resultado es una caída muy fuerte de la potencia y, normalmente, un aumento del consumo específico de energía *medido*. Además, los brazos y los electrodos vibran fuertemente, llegando en algunos casos a provocar roturas. El arco

comienza a tornarse más inestable cuando la relación  $X_{\text{real}} / X_{\text{sinusoidal}}$  es superior a aproximadamente 1,40 (seno  $\phi$  sinusoidal de 0,526 y coseno  $\phi$  sinusoidal de 0,85), para a etapa más turbulenta de la fusión. Durante el afino, con escoria espumosa, es posible llegar a valores superiores a coseno  $\phi$  sinusoidal de 0,90, sin problemas de estabilidad. Como consecuencia del efecto de la variación de la reactancia provocada por las corrientes armónicas, el factor de potencia real, en general, no consigue superar valores de aproximadamente 0,70 en el inicio de la fusión, 0,76/0,77 en la mitad de la fusión y 0,82/0,85 en el afino. La condición para que haya estabilidad de arco es que una disminución de la corriente provoque un aumento de la tensión de arco (figura 3).



**Figura 3.** Tensión de arco en función del seno  $\phi$  sinusoidal ( $I/I_{cc}$ ) – Límite de estabilidad

**Figure 3.** Arc voltage vs sinusoidal sine  $\phi$  – Stability limit

*Ejemplo:* Si operando con 885 V en un circuito con 4,3 m $\Omega$  de reactancia sinusoidal, la corriente regulada en la fusión fuese reducida para 52 kA, el seno  $\phi$  sinusoidal caería para  $52 \text{ kA} \times 4,3 \text{ m}\Omega \times 1,732 / 885 \text{ V} = 0,437$  y el coseno  $\phi$  sinusoidal aumentaría para 0,90, entrando en la zona inestable. A una disminución de la corriente correspondería una disminución de la tensión de arco y el regulador no conseguiría mantener adecuadamente el punto de operación.

## 9. FACTOR DE POTENCIA Y MÁXIMA POTENCIA ACTIVA CON DETERMINADA TENSIÓN Y DETERMINADA REACTANCIA SINUSOIDAL

Otro efecto interesante de la variación de la reactancia en función del coseno  $\phi$  sinusoidal es que la máxima potencia activa que se puede obtener con una determinada tensión y una determinada reactancia sinusoidal no ocurre con un coseno  $\phi$  real de 0,707 como ocurriría si la reactancia no variase en función del coseno  $\phi$ , sino con un coseno  $\phi$  real del orden de 0,63.

## 10. MÁXIMA POTENCIA ACTIVA POSIBLE CON DETERMINADO TRANSFORMADOR

Si bien la máxima potencia para determinada tensión y reactancia ocurre con muy bajos valores de factor de potencia, es posible y, generalmente, preferible, operar con factores de potencia más elevados. Ya fue mencionado que la potencia activa no es otra cosa que el producto de la tensión de arco por la corriente y que la tensión de arco es igual al producto de la tensión aplicada por el factor de potencia real, siendo que el factor de potencia real puede aumentar, como ya fue mencionado, hasta un cierto valor que, para fusión, normalmente, no supera 0,76, pudiendo llegar en el afino a valores un poco superiores a 0,82.

*Ejemplo:* Verificar cual es la máxima potencia activa con la cual se puede operar con un transformador de 120 MVA, sin sobrecargarlo, en el período de fusión. Suponiendo que las tensiones y reactancias del circuito se puedan adaptar para conseguir el factor de potencia real de 0,76, la máxima potencia posible para fusión sería  $120.000 \text{ kVA} \times 0,76 = 91.200 \text{ kW}$ .

## 11. MÁXIMA POTENCIA POSIBLE CON DETERMINADA REACTANCIA

Normalmente, la acería posee uno o más hornos alimentados por transformadores que permiten la utilización de diferentes valores de tensión y corriente. El circuito eléctrico, compuesto por la red de alimentación (transformadores y reactor) y por los conductores del horno, posee un cierto valor de reactancia sinusoidal total ( $X_{\text{sinusoidal}}$ ). Normalmente, los valores de las reactancias, referidos a la tensión secundaria varían entre 3,5 m $\Omega$  (circuitos con SVC y transformador del horno tipo acorazado con baja impedancia) y aproximadamente 7 m $\Omega$  (con reactor) para hornos de alta potencia, y pueden ser superiores a 12 m $\Omega$  para pequeños hornos con transformadores de muy baja potencia (por ejemplo, 2 MVA). Para entender el efecto de la reactancia sobre la potencia del horno, es preferible utilizar la fórmula:  $P = V^2 \times \text{coseno } \phi \text{ real} \times \text{seno } \phi \text{ real} / X$

real. El producto “coseno  $\phi$  x seno  $\phi$ ” es prácticamente constante para cosenos  $\phi$  entre 0,60 y 0,80 (varía entre 0,48 y 0,50), concluyéndose que para cada valor de tensión, la máxima potencia activa posible es inversamente proporcional a la reactancia real. La relación  $I \times X / V$  deberá tener un valor tal que el coseno  $\phi$  sinusoidal se mantenga dentro de la zona de operación estable<sup>(2)</sup> (figura 3).

*Ejemplo: Sea un horno alimentado a través de un circuito cuya reactancia sinusoidal es de apenas 4 mOhm (baja reactancia, sin reactor y con SVC), alimentado por un transformador con tensión máxima de 900 V. La máxima potencia activa posible, considerando un factor de potencia de 0,76 y un  $Fop = 1,40$ , para fusión será  $P = (900 \text{ V})^2 \times 0,76 \times 0,65 / 1,40 \times 4 \text{ mOhm} = 71.453 \text{ kW}$ . La tensión de arco será  $V_a = 900 \text{ V} \times 0,76 / 1,732 = 394,9 \text{ V}$ , la corriente será de  $71.453 \text{ kW} / 3 \times 394,9 \text{ V} = 60,3 \text{ kA}$  (electrodo de 600 mm) y la potencia del transformador deberá ser de, como mínimo,  $71.453 \text{ kW} / 0,76 = 94.017 \text{ kVA}$ .*

## 12. PÉRDIDAS ELÉCTRICAS Y POTENCIA DE ARCO

Hasta este punto, tratamos de la tensión de arco y de la potencia activa sin considerar la caída de tensión y las pérdidas que ocurren en la resistencia del circuito eléctrico. La resistencia del circuito hace con que la tensión de arco y la potencia de arco reales sean inferiores a los valores calculados anteriormente.

*Ejemplo: En un horno de 120 toneladas, la resistencia de pérdidas de los conductores es de 0,35 mOhm. Si el horno opera con 1000 V, 50 kA y factor de potencia real de 0,75, la tensión del arco será  $1000 \text{ V} \times 0,75 / 1,732 - 50 \text{ kA} \times 0,35 \text{ mOhm} = 415 \text{ V}$ . La potencia de los arcos será  $3 \times 50 \text{ kA} \times 415 \text{ V} = 62,250 \text{ kW}$  y la potencia activa total será  $1,732 \times 1000 \text{ V} \times 50 \text{ kA} \times 0,75 = 64.950 \text{ kW}$ . El rendimiento eléctrico, en este caso, es:  $100 \times 62250 \text{ kW} / 64950 \text{ kW} = 95,8 \%$ .*

## 13. MÁXIMA POTENCIA DE ARCO

Así como fue concluido que el coseno  $\phi$  real con el cual se obtiene la máxima potencia activa es muy inferior al valor de 0,707 - en realidad del orden de 0,63 aproximadamente - se puede concluir que el factor de potencia real con el cual se obtiene la potencia de arco máxima no es del orden de 0,74, como señalan algunos artículos técnicos<sup>(1)</sup>, y sí de aproximadamente 0,66, para fusión.

## 14. ARCO LARGO Y ARCO INESTABLE

Es común que sea confundido lo que es arco largo con lo que es arco inestable. Algunos fabricantes atribuyen a sus reguladores la capacidad de estabilizar arcos de gran longitud. En realidad, la estabilidad del arco no tiene mucho que ver con su longitud ni con el regulador. Un arco puede tener más de un metro de longitud y ser perfectamente estable, desde que los valores de tensión, corriente y reactancia sean aquellos que conduzcan a la operación en la zona de arco estable (coseno  $\phi$  sinusoidal inferior a cierto valor). Inclusive, para igual factor de potencia, es probable que un arco largo sea más estable que uno corto, porque, para el primero, las variaciones de la longitud del arco provocadas por el movimiento de la carga metálica serán proporcionalmente menores. También debe ser entendido que dentro de la zona considerada estable ( $X_{\text{real}}/X_{\text{sinusoidal}}$  hasta 1,45 aproximadamente), la inestabilidad del arco es una cuestión relativa y a veces puede ser más conveniente operar con una tensión más alta, que provoca, para igual corriente, una reactancia real mayor, pero, al mismo tiempo, una potencia activa superior ( $P = K \times V^2/X_{\text{real}}$ ). En el caso de la operación con escoria espumosa, para igual corriente y tensión, el arco se desestabiliza un poco cuando queda descubierto porque al bajar el nivel de la escoria el medio de conducción vuelve a ser el aire y no la escoria, esta última más fácilmente ionizable.

## 15. ARCO LARGO Y ARCO CORTO

Cuando entre los años 80 y 90 se dejó de operar con los arcos muy cortos, que recomendaba la teoría de los hornos UHP, comenzó a ser usada la expresión “arco largo”. Actualmente, este término a veces es utilizado de forma equivocada, dándose a entender que arco largo significa operación con baja corriente y arco corto significa operación con alta corriente. Es verdad que al disminuir la corriente la longitud de arco aumenta un poco, porque normalmente aumenta el factor de potencia, pero mucho más aumentaría si fuese aumentada la tensión aplicada (tap del transformador) o disminuida la reactancia. Además, si la corriente es disminuida hasta un valor inferior al del límite de estabilidad, el arco en lugar de ser más largo será en realidad más corto (por favor, ver figura 3). Es lo que ocurre actualmente cuando algunos operadores disminuyen exageradamente la corriente después de la perforación de la carga con el presunto objetivo de abrir más el arco; frecuentemente el resultado es opuesto al esperado y, siempre, la potencia cae violentamente.

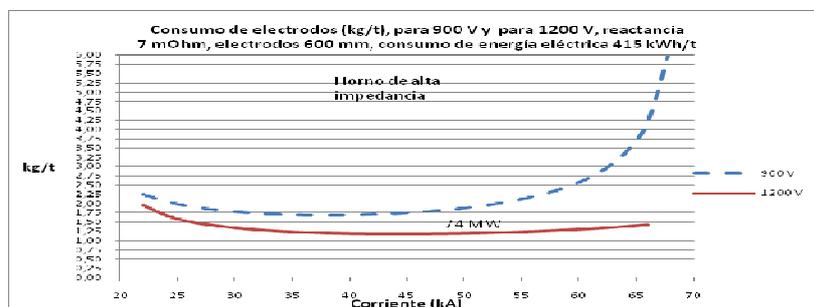
## 16. CONSUMO DE ELECTRODOS

El consumo de electrodos (kg/t), para igual consumo de energía eléctrica (kWh/t), es proporcional a la relación entre la corriente y la tensión del arco  $I/V_a$  (consumo de punta) y a una relación un poco más compleja que corresponde al consumo por oxidación (ver fórmula completa <sup>(3)</sup> en los ejemplos) pero que básicamente muestra una dependencia con  $(H \times D/I^2)$ , donde  $H \times D$  es la superficie de oxidación del electrodo ( $H$  es la altura de oxidación y  $D$  es el diámetro del electrodo). Con base en la fórmula se concluye que el consumo de electrodos es inversamente proporcional a la tensión de arco, siempre y cuando el diámetro del electrodo se adapte a la corriente (al disminuir corriente, disminuir diámetro de electrodos). No siempre una reducción de la corriente provoca una disminución del consumo de electrodos porque cuando la corriente es demasiado baja en relación al diámetro de los electrodos una reducción de corriente provoca un aumento del consumo (figura 4). Este efecto se agudiza todavía más cuando la corriente cae abajo del límite de estabilidad. En la práctica, en hornos de baja capacidad no es posible reducir el consumo de electrodos a los niveles que se obtienen en hornos de alta capacidad, principalmente por el efecto proporcionalmente mayor de la oxidación.

*Ejemplo 1:* Sea un horno que opera con tensión de arco de 350 V, corriente de 62 kA, electrodos de 600 mm y consumo de energía eléctrica de 400 kWh/t. La potencia activa será  $P = 3 \times 350 \text{ V} \times 62 \text{ kA} = 65.000 \text{ kW}$ . El consumo de electrodos usando nuestra fórmula<sup>(5)</sup>, considerando una altura de oxidación de 1,6 m será:  $C_{ee} \text{ (kg/t)} = 0,4 \text{ MWh/t} \times 10 \times (62 \text{ kA} / 350 \text{ V}) \times [0,5 + (0,25 + 30 \times 1,6 \text{ m} \times 60 \text{ cm} / 62 \text{ kA}^2)^{0,5}]^2 = 1,60 \text{ kg/t}$ .

*Ejemplo 2:* En el mismo horno, la potencia es aumentada aumentando la tensión de arco para 500 V y manteniendo la corriente de 62 kA y el electrodo de 600 mm. Potencia =  $3 \times 500 \text{ V} \times 62 \text{ kA} = 93.000 \text{ kW}$ . Consumo de electrodos:  $0,4 \times 10 \times (62/500) \times [0,5 + (0,25 + 30 \times 1,6 \times 60 / 62^2)^{0,5}]^2 = 1,12 \text{ kg/t}$ .

*Ejemplo 3:* Un horno de baja capacidad que opera con baja potencia, tensión de arco de 250 V, corriente de 25 kA, electrodo de 350 mm y consumo de energía eléctrica de 400 kWh/t. La potencia de arco es  $P = 3 \times 250 \text{ V} \times 25 \text{ kA} = 18.750 \text{ kW}$ . Consumo de electrodos:  $0,4 \times 10 \times (25/250) \times [0,5 + (0,25 + 30 \times 1,6 \times 35 / 25^2)^{0,5}]^2 = 1,96 \text{ kg/t}$ . En el mismo horno, si el consumo eléctrico aumentase para 500 kWh/t, el consumo de electrodos aumentaría para  $1,96 \text{ kg/t} \times 500 \text{ kWh/t} / 400 \text{ kWh/t} = 2,43 \text{ kg/t}$ .



**Figura 4.** Consumo de electrodos (kg/t) para 900 V e 1200V, reactancia 7 mOhm, electrodos de 600 mm

**Figure 4.** Electrode consumption for 900 V and 1200 V, 7 mOhm reactance, 600 mm electrode

## 17. RADIACIÓN DE CALOR - REFRACTARIOS

La erosión de los refractarios es medida por el índice de irradiación de calor  $R_i$  (de Schwabe)<sup>(3)(4)</sup>:  $R_i \text{ (kW.V/cm}^2\text{)} = P_a \times V_a / 3 \times d^2$  (donde  $d$  = distancia electrodo-pared).

Para igual potencia de arco se puede operar con alta tensión de arco y baja corriente o con baja tensión de arco y alta corriente, adecuando las tensiones del transformador y las reactancias para cada caso. La operación con alta  $V_a$ , según fue visto, permitirá obtener menor consumo de electrodos y la operación con menor  $V_a$  podrá aumentar el consumo de electrodos pero permitirá obtener un menor índice de erosión de refractarios. En ciertos hornos que operan con una potencia específica relativamente baja puede ser conveniente aumentar el índice de irradiación para fundir mejor la chatarra en los puntos calientes y evitar que ocurra adherencia de metal y escoria en las paredes.

*Ejemplo:* Un horno de 120 toneladas, con electrodos de 600 mm, tiene un diámetro de 5.900 mm y círculo primitivo con diámetro de 1250 mm. La distancia electrodo-pared será  $(5.900 \text{ mm} - 1250 \text{ mm} - 600 \text{ mm}) / 2 = 2025 \text{ mm} = 220,5 \text{ cm}$ . El horno va a operar con potencia de arco de 85.000 kW. Consideramos dos posibilidades: a) operar con tensión de arco de 600 V (arco largo, alta reactancia) y b) operar con 430 V de tensión de arco. En el caso a), la corriente será de  $85.000 \text{ kW} / 3 \times 600 \text{ V} = 47,2 \text{ kA}$  y en el caso b) será

85.000 kW / 3 x 430 V = 65,9 kA. El índice Ri será  $Ri = 85.000 \text{ kW} \times 600 \text{ V} / 3 \times 220,5 \text{ cm}^2 = 349 \text{ kW.V/cm}^2$  para el caso a) y  $Ri = 85.000 \text{ kW} \times 430 \text{ V} / 3 \times 220,5 \text{ cm}^2 = 250 \text{ kW.V/cm}^2$  para el caso b). El valor de 349 kW.V/cm<sup>2</sup>, para la práctica actual, es demasiado elevado para operación en el final de fusión, antes de establecerse la escoria espumosa, y, en este caso sería preferible optar por la alternativa b), con tensión de arco de 430 V y corriente de 65,9 kA ( si el transformador lo permitir). El consumo de electrodos será, para un consumo de energía eléctrica de 400 kWh/t: caso a)  $C_{ee} \text{ (kg/t)} = 0,4 \times 10 \times (47,2/600) \times [0,5 + (0,25 + 30 \times 1,6 \times 60 / 47,2^2)^{0,5}]^2 = 0,95 \text{ kg/t}$  y para el caso b)  $C_{ee} \text{ (kg/t)} = 0,4 \times 10 \times (65,9/430) \times [0,5 + (0,25 + 30 \times 1,6 \times 60 / 65,9^2)^{0,5}]^2 = 1,30 \text{ kg/t}$ . Para el caso a) será necesario operar con reactancia alta y en el segundo caso, con reactancia baja. El primer caso permitirá un consumo de electrodos bastante menor pero con mayor sacrificio del refractario y de los paneles.

## 18. LONGITUD DE ARCO – FUSIÓN Y AFINO

En la fusión podrá operarse con arcos largos o arcos cortos. Habiendo chatarra alrededor de los electrodos, la potencia del arco será utilizada para calentar y fundir la carga metálica, independientemente del arco tener una longitud de 300 mm o de 500 mm (los kWh/t continúan los mismos a pesar que hay quienes creen que un arco más largo proporciona un mejor rendimiento térmico). El único cuidado es mantener un arco más corto en los primeros segundos para proteger la bóveda. Una ventaja de operar con arco largo será la reducción del consumo de electrodos. También, en ciertos casos, dependiendo del tipo de chatarra procesada y de las dimensiones del horno, será preferible realizar la fusión con alto índice de radiación para evitar que piezas de chatarra se adhieran a las paredes del horno y, para esto será necesario operar con altas tensiones, ajustando la reactancia de forma a obtener un arco estable. Es importante mantener en el inicio de la fusión un coseno  $\phi$  sinusoidal suficientemente bajo como para tener un arco bastante estable, operando con una adecuada relación “corriente x reactancia / tensión” (en el inicio de la fusión, el arco es más inestable y el factor de potencia real difícilmente supera el valor de 0,70). En la operación con escoria espumosa, lo ideal es operar con alta longitud de arco y también con alta corriente (alta potencia). El límite para la altura del arco dependerá de cada horno y de sus facilidades para hacer una buena escoria espumosa que cubra el arco y proteja las paredes. En hornos grandes son comunes longitudes de arco entre 400 mm y 600 mm, pero del punto de vista eléctrico nada impediría que tensiones y longitudes de arco superiores sean utilizadas, como de hecho son utilizadas en algunos hornos de corriente continua.

## 19. OPERACIÓN CON MENORES NIVELES DE FLICKER Y DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

En forma resumida, sin entrar profundamente en este importante tema, podemos decir que los niveles de flicker (parpadeo de la iluminación) y de distorsión armónica son proporcionales a la potencia de cortocircuito Scf del horno (potencia reactiva cuando los electrodos entran en contacto directo con la carga metálica). Del punto de vista operacional lo que puede ser realizado para disminuir en aproximadamente 20 % los niveles de perturbación (flicker y armónicas) es operar con bajo factor de potencia real (aproximadamente 0,63/0,65), porque con esta condición se obtiene una menor relación Scf/P, además de un arco más estable <sup>(6)</sup> (figura 5). Para operar con tan bajo factor de potencia debe ser previsto un transformador de mayor capacidad nominal.

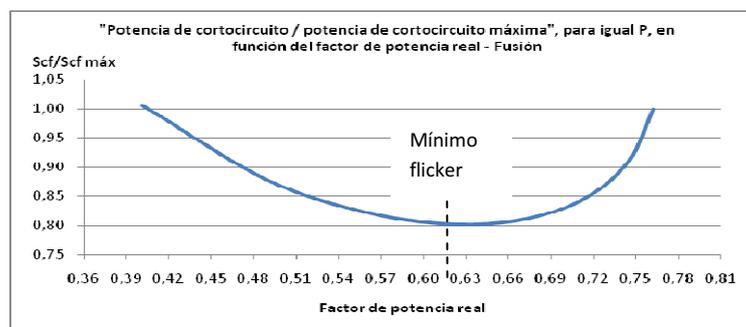


Figura 5. Operando con bajos cosenos  $\phi$ , para igual potencia se obtienen los menores niveles de flicker

Figure 5. Lower power factors lead to lower flicker levels

## 20. PROYECTO Y OPERACIÓN DEL HORNO

Los valores de tensión, corriente y reactancia a ser utilizados serán elegidos por los responsables de la operación del horno en función del equipamiento disponible y de los objetivos operacionales establecidos. Las tensiones y corrientes máximas y mínimas del transformador, así como las reactancias del circuito, son establecidas por el proyectista del horno en conjunto con los operadores del horno. La corriente máxima que podrá ser utilizada dependerá de los valores nominales del transformador y de los conductores. La corriente mínima será definida por el límite de estabilidad de arco, para fusión y para afino, y dependerá de los valores de tensión y reactancia previstos. En condiciones normales el horno será operado con la máxima corriente admisible y la máxima potencia. La máxima potencia activa en la fusión, con determinada potencia de transformador (MVA), ocurrirá con un factor de potencia real de 0,76/0,77. Si se desea disminuir el flicker y las armónicas, para igual potencia activa, será preferible operar con los más bajos factores de potencia, por ejemplo 0,63/0,66, en la fusión, pero será necesario un transformador de mayor potencia. El consumo específico de electrodos será mínimo al operar con la máxima tensión de arco al mismo tiempo que con alta densidad de corriente en el electrodo (electrodo de diámetro adecuado para la corriente). El horno podrá ser operado con alta reactancia o con baja reactancia. Si la reactancia es alta, el arco podrá ser estabilizado con corrientes bajas y, con un diámetro de electrodos adecuado será posible obtener los menores consumos de electrodos con la contrapartida de mayor erosión de refractarios, porque, para igual potencia, operando con menor corriente serán necesarias mayores tensiones de arco. En todos los casos es conveniente recordar que la energía total consumida (química + eléctrica) será proporcional al trabajo realizado más las pérdidas térmicas y, que si se realiza un aumento de la potencia eléctrica sin aumentar la potencia química ocurrirá un aumento del consumo específico de energía eléctrica (kWh/t) y una disminución del consumo específico (kWh/t) de energía química, pero, normalmente, se mantendrá el consumo específico de energía total anterior. Esto vale también para definir el tiempo de fusión de cada carga, que debe ser relacionado con la energía específica total consumida e no solamente con la energía eléctrica.

## 21. CONCLUSIONES

Actualmente existen cada vez más instrumentos para monitorear la operación del horno eléctrico de arco, pero para aprovechar esa gran cantidad de información y no correr el riesgo de implementar prácticas erróneas es necesario entender el funcionamiento del horno eléctrico de arco. Fueron destacados algunos conceptos básicos de la operación de los hornos eléctricos de arco y discutidas algunas prácticas actuales.

## REFERENCIAS

- (1) SCHWABE W.E. – 1954 – Determination of the optimum current in an arc furnace – Iron and Steel Engineer, June 1954.
- (2) JACCARD L. R. - 2008 – Reatância indutiva do circuito do forno a arco e aplicação de reatores série – XXXIX Seminário de Aciaria - ABM – Internacional – Curitiba - Brasil
- (3) SCHWABE W.E. – 1961 – Fundamentals of heat distribution and refractory wear in electric steel furnaces – Iron and Steel engineer – December, 1961.
- (4) SCHWABE W.E. – 1962 – Arc heat transfer and refractory erosion in electric steel furnaces - AIME Electric Conference, Cincinnati, Ohio.
- (5) JACCARD L. R. - 1988 – Consumo específico de eletrodos em fornos elétricos a arco – Correlação com os fatores de operação" – 43º Congresso Anual – ABM – Belo Horizonte – Brasil.
- (6) JACCARD L. R. – 1993 - Alternativa para redução das perturbações dos fornos elétricos a arco – XXVI Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Aços – ABM – Salvador - Brasil.
- (7) JACCARD L.R. – 2005 - Principios básicos para definición de los parámetros eléctricos operacionales de los hornos de arco, diferenciación según la etapa de fusión, efectos sobre el flicker la productividad y el consumo de electrodos – IAS – Conferencia 2005 – San Nicolás de los Arroyos – Argentina.