

# BASIC PRINCIPLES TO DEFINE THE EAF OPERATIONAL PARAMETERS - DIFFERENT APPROACH DEPENDING ON THE MELTING STAGE -EFFECTS ON FLICKER PRODUCTIVITY AND ELECTRODE CONSUMPTION

Luis R. Jaccard <sup>(1)</sup>

## ABSTRACT

During the last decades the strategy to define the best EAF electrical operational parameters has changed several times. In the 1970's increased powering emphasized the refractory erosion and, consequently, low levels of voltage, reactance and power factor were recommended. After the arrival of the water cooled panels it was possible to operate with higher voltages during a great portion of the melting period and a significant reduction in electrode consumption was achieved. Later, in the 1980's, the development of the foamy slag allows a new voltage increase, also during the flat bath period, leading to further power increment and electrode consumption reduction.

The operation with high voltages, as it was set up in the last years of the 1980's and, mainly, during the 1990's, compelled to increase the circuit reactance in order to maintain the moderately low levels of power factor required to obtain the arc stabilization at the beginning of the melting period.

Presently, it was confirmed that good foamy slags allow the operation with very high power factors at the last stage of melting, without arc instability. Because of that, a very low reactance is now recommended to increase power factor at this stage, mainly in furnaces that operate with continuous DRI charge.

On the other side, many high power furnaces are fed by weak electric networks that are exposed to voltage fluctuations. In these cases, to reduce the flicker during the first period of scrap melting it is necessary to operate with low power factors and low active power levels. In order to allow operation with low power factors and, at the same time, higher voltages and lower currents, a high value of reactance is necessary. With high transformer voltages, even operating with very low power factors, it is possible to obtain moderately high voltage arcs and, in this way, electrode consumption is maintained at reasonable levels. At the same time, for a certain power factor, a longer arc keeps away the electrodes from the scrap and provides a more stable voltage arc which reduces the flicker a bit more.

Improvements are continuously being made at EAF project and operation. Because of that, some operational strategy that is considered ideal at present could be not recommended in the future. The important matter is to understand the basic principles that rule the relations among the operational electric parameters and, for each case, to apply the best strategy, considering the circuit and the operational goals.

Nowadays it is still possible to find who recommends the operation at the "optimal point" in allusion to a 1954 paper that proposed the operation with the power factor that, for the available voltage and reactance, provoked the maximum arc power. Presently, when higher power is desired it is recommended to increase the voltage.

At the end of the 1980's, when became clear the convenience of operate with high voltages, it was precise to convince some incredulous who thought that a long arc was necessarily an unstable arc and to prove to them that in order to maintain the arc stability was enough to reduce the power factor by means of the reactance increase.

In the last years it has been proved the advantage of the operation with very low reactances during the foamy slag period, when the arc maintains its stability with any power factor value, no matter how high it is. As a consequence, it is possible to conclude that, for the foamy slag period, it is advisable to by-pass the reactor. However, some operators continue to wrongly use for the flat bath period the same principles used to define arc stability during the scrap melting period and recommend to maintain a high value of reactance and / or to decrease voltage, even when there are not refractory erosion problems.

It is commonplace, mainly in Europe, to install very expensive voltage compensators ( SVC's ) in networks with a very high short circuit power, just with the sole purpose of increasing the furnace power. A more detailed analysis of the furnace equivalent circuit would show that the same result could be achieved, with a much smaller investment, reducing the series reactance or increasing the transformer secondary voltage.

This paper intends to explain the EAF electrical parameters correlation and to provide the bases to define the most convenient parameters, for each particular case, depending on the operational goals and according with the electric supply circuit characteristics.

**Key words:** EAF electric parameters, arc voltage, electrode consumption, productivity, flicker, power factor, reactance.

# PRINCIPIOS BASICOS PARA DEFINICION DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS OPERACIONALES DE LOS HORNOS DE ARCO - DIFERENCIACION SEGUN LA ETAPA DE FUSION - EFECTOS SOBRE EL FLICKER LA PRODUCTIVIDAD Y EL CONSUMO DE ELECTRODOS

Luis R. Jaccard (1)

## INTRODUCCION

La cuestión del correlacionamiento de los parámetros eléctricos del horno de arco y de sus efectos sobre los resultados operacionales, a pesar de su enorme simplicidad, suscita frecuentes controversias que normalmente tienen como origen conceptos equivocados, muchas veces transmitidos por entidades que poseen un conocimiento fragmentado del asunto.

## TENSION DE ARCO

La operación del horno de arco es definida totalmente por apenas dos parámetros eléctricos: la **tensión de arco** y la intensidad de corriente.

La **longitud del arco** es una función directa de la tensión del arco, o sea, si el arco posee una determinada longitud, para determinado medio, la tensión sólo puede ser una. Por ejemplo, un arco de 400 milímetros de longitud, forzosamente corresponderá a una tensión de 400 V ( admitiendo 1 V / mm para el caso más común de los hornos para producción de acero ).

$$\text{Longitud de arco: } L_a = K \times V_a.$$

La **potencia activa** ( MW ) de un arco por su vez no es otra cosa que el producto de la tensión de arco por la intensidad de corriente. Cuando se trata de un horno con tres electrodos, la potencia total de los arcos será:

$$\text{Potencia activa total: } P = 3 \times V_a \times I.$$

Cuando se proyecta un horno se sabe que se desea obtener una determinada **productividad** ( ton / h ) y que el consumo específico de energía del horno ( kWh / ton ) corresponderá al tipo de proceso y a las dimensiones del horno. Conocidos esos dos índices, la potencia necesaria para el horno podrá ser calculada como el producto de los mismos. Por ejemplo, si se desea producir 100 toneladas por cada hora de operación del horno y se sabe que el consumo específico de energía eléctrica será de 500 kWh / ton, la potencia necesaria será:  $P = 500 \text{ kWh / ton} \times 100 \text{ ton / h} = 50.000 \text{ kW}$ .

La cuestión de la definición de los parámetros eléctricos reside en proyectar hornos que obtengan determinada potencia activa, con determinada relación entre tensión de arco e intensidad de corriente (  $V_a / I = R =$  resistencia de arco ). Para determinada potencia, se puede decidir construir un horno que opere con alta tensión de arco y baja intensidad de corriente o, por lo contrario, con baja tensión de arco y alta intensidad de corriente. Para definir la mejor relación es necesario conocer los efectos de la tensión de arco sobre los principales resultados operacionales del horno. En lo que se refiere a la productividad ( ton / h ), que depende apenas de la potencia activa, ya quedó claro que se define por el producto de  $V_a$  e  $I$ . Los otros efectos importantes son los relacionados con el consumo específico de electrodos ( kg / ton o kg / MWh ) y el desgaste de refractarios. En la actualidad, desde la década de 80, ya son perfectamente conocidos los efectos de los parámetros eléctricos sobre el consumo de electrodos. Para determinada densidad de corriente en el electrodo, el **consumo específico de electrodos** es directamente proporcional a la relación entre la corriente y la tensión de arco<sup>1)</sup>:  $C_{ee} \text{ ( kg / MWh )} = K \times I / V_a$ .

$$\text{Consumo para determinada densidad de corriente en los electrodos: } C_{ee} \text{ ( kg / MWh )} = K \times I / V_a$$

Cuando la corriente disminuye, el consumo real, para un determinado diámetro de electrodos, se reduce en una proporción un poco inferior a la prevista por la expresión anterior debido al mayor aumento relativo de la oxidación provocado por la disminución de la densidad de corriente en el electrodo ( mayor tiempo de exposición )<sup>1)</sup>.

Se concluye que, para determinada potencia activa, para reducir el consumo de electrodos se debe operar con alta tensión de arco.

La limitación principal para el aumento de la tensión de arco es la erosión de los refractarios. En general, se puede decir que los factores que provocan la disminución del consumo de electrodos son los mismos que provocan el aumento del desgaste de los refractarios ( y, en casos extremos, de los paneles refrigerados ). O sea, cuanto mayor la tensión de arco, mayor el desgaste de refractarios. El índice de erosión de Schwabe muestra que el desgaste también es proporcional a la potencia activa.

$$\text{Índice de desgaste de refractarios: } R_i = K \times P \times V_a$$

Felizmente, en las últimas décadas fueron introducidos dos perfeccionamientos que permitieron aumentar en gran medida las tensiones de arco, sin provocar grandes aumentos de las paradas de los hornos para reparar los refractarios. Se trata de los paneles refrigerados y, especialmente, la escoria espumosa. Gracias al aumento de las tensiones de arco fue posible pasar de los consumos de electrodos de 10 kg / MWh de los años 70 para los de 3 kg / MWh de la actualidad, en hornos que operan con chatarra, o de 2 kg / MWh, en hornos que operan con carga continua de hierro esponja. Lo anterior significa haber reducido los kilogramos de electrodos consumidos, por tonelada de acero producido, de los 5 a 6 kg / ton de los años 70, para los 1,2 a 1,4 kg / ton actuales. Y, nuevas reducciones están en curso.

En lo que se refiere al desgaste de refractarios, la fórmula completa del factor  $R_i$  incluye la distancia entre el electrodo y las paredes del horno, siendo que la erosión es inversamente proporcional a esa distancia al cuadrado. Por este motivo, en general, es más fácil operar con altas tensiones en hornos de grandes dimensiones. Otro factor a tener en cuenta es la posibilidad de operar con altos índices de  $R_i$  en los primeros minutos de la fusión, cuando la chatarra protege las paredes. Y, también, el hecho que la escoria espumosa de los momentos finales de la fusión tiene un efecto de blindaje sobre el arco, posibilitando que hornos modernos puedan operar en el final de fusión con tensiones y potencias todavía superiores a las del período de fusión de la chatarra. En el caso del período de escoria espumosa, la longitud del arco, o sea la tensión de arco, puede ser más significativa que el propio índice de erosión. Para que el arco permanezca sumergido en la escoria es necesario que esa longitud de arco sea inferior a la altura de la escoria espumosa. Sin embargo, lo que se nota es que siempre hay recursos para aumentar la altura de la escoria espumosa, por lo que se puede esperar que nuevos aumentos de las tensiones de arco sean posibles.

Hornos modernos de gran capacidad, que operan con carga continua de hierro esponja, están utilizando tensiones de arco de 700 V y, de esa manera, están consiguiendo los niveles de consumo de electrodos de 2 kg / MWh, mencionados anteriormente, sin que se verifiquen desgastes exagerados de los refractarios.

### **CIRCUITO EQUIVALENTE DEL HORNO DE ARCO - COSENO FI - ESTABILIDAD DE ARCO - DIFERENCIACION DEL COMPORTAMIENTO DEL HORNO SEGUN LA ETAPA DE FUSION - REACTANCIA - EFECTO DE LOS SVC's**

Hasta aquí, lo que se pretendió probar es que el funcionamiento del horno de arco depende unicamente de la tensión de arco y de la corriente.

Para ampliar la cuestión debemos introducir el circuito del horno de arco. Se trata de una fuente de tensión constante alimentando el arco a través de transformadores, reactores y conductores que poseen cierto valor de reactancia inductiva ( Ver figura 1 ). La tensión de alimentación  $V_0$  es la tensión en vacío entre fase y neutro ( para un horno trifásico corresponde a la tensión entre fases dividida por raíz de tres ). La reactancia  $X$  corresponde a la reactancia inductiva total del circuito y  $V_a$  es la tensión del arco. Circula una corriente  $I$ . La caída de tensión sobre la reactancia es  $V_L = V_0 \times \text{sen } \text{Fi}$  y la tensión de arco es  $V_a = V_0 \times \text{cos } \text{Fi}$ . Con este simple circuito es posible deducir todo el correlacionamiento de los parámetros eléctricos del horno.

#### Tensión de arco

Como ya fue mencionado, este es el parámetro que practicamente define toda la operación del horno. Se observa que  $V_a$  es igual al producto de  $V_0$  y coseno  $\text{Fi}$ .

$$\text{Tensión de arco: } V_a = V_0 \times \cos \text{Fi}$$

Quiere decir que para aumentar la tensión de arco debe ser aumentada la tensión en vacío o aumentado el coseno Fi. A pesar de obvio, es conveniente resaltar, por tratarse de un asunto que también provoca discusiones y malentendidos, que no hay ninguna diferencia en aumentar la tensión en vacío aumentando la tensión secundaria, por medio del cambiador de taps del transformador del horno, o aumentando la tensión primaria a través de un conmutador de taps del transformador de la subestación o de un compensador estático ( SVC ). Así como no hay ninguna diferencia si el aumento de  $V_a$  se consigue reduciendo la reactancia ( aumento del coseno Fi ). El arco sólo va a depender del valor de tensión que exista entre sus extremos. El valor del coseno Fi, medido en la fuente, podrá hacer que el arco sea más o menos estable durante la fusión de chatarra, pero esto ocurrirá en igual medida como consecuencia de cualquiera de las anteriores modificaciones.

La forma práctica de aumentar la tensión de arco es mediante el aumento de la tensión secundaria del transformador o la reducción de la reactancia.

### Coseno Fi

Se trata del coseno del ángulo existente entre la tensión de alimentación y la corriente. Cuando se conocen X y Ra ( resistencia del arco ), el coseno Fi puede ser calculado a partir de la tangente del ángulo:  $\tan \text{Fi} = X / R_a$ . El valor de Ra es variable, entanto que el valor de X es constante ( salvo el efecto de reactancia operacional que será mencionado más adelante ). Por ese motivo, para calcular el valor del coseno Fi en función de los otros parámetros eléctricos conviene utilizar la expresión  $V_L = V_0 \times \sin \text{Fi} = I \times X$ , a partir de la cual se llega a:

$$\sin \text{Fi} = I \times X / V_0$$

$$\cos \text{Fi} = \cos(\arcsin(\text{Fi}))$$

Donde se verifica que el coseno Fi aumenta al aumentar la tensión y al disminuir la corriente y / o la reactancia.

Una cuestión a ser esclarecida, porque es motivo de frecuentes confusiones y lleva a conclusiones equivocadas es la del punto de referencia del coseno Fi. La figura 2 muestra todas las reactancias que componen la reactancia total X. En algunos hornos, el coseno Fi es medido en el punto (4) correspondiente al secundario del transformador del horno, mas, generalmente, es medido en el circuito primario. Cuando los reactores serie están instalados en la sala del transformador del horno, la medición es realizada en el punto (2) correspondiente a la entrada del reactor y cuando los reactores están en la subestación principal, la medición es realizada en el punto (3) del primario del transformador, a la salida del reactor. Se observa en el ejemplo de la figura que los cosenos Fi medidos en todos esos puntos son diferentes, disminuyendo a medida que se acercan de la fuente estable de tensión ( barra teórica de reactancia cero o barra infinita ). Es importante percibir que el coseno Fi utilizado para calcular los parámetros eléctricos del horno, a partir de la tensión en vacío, es el coseno Fi existente en esa barra ideal (0), también llamada de barra infinita. Más adelante, cuando sea tratado el tema de la estabilidad del arco y se establezcan valores de coseno Fi máximos para mantenimiento de esa estabilidad, veremos que esos valores también se refieren al **coseno Fi medido en la barra infinita**. En algunos casos raros de instalaciones de transformadores de hornos alimentados directamente por una barra de alta tensión ( por ejemplo, 115 kV ) y de alta potencia de cortocircuito ( baja reactancia ), el coseno Fi medido en el primario del transformador del horno (4) puede ser muy similar al coseno Fi existente en la barra infinita (0). Contrariamente, en hornos que poseen un transformador rebajador y reactores serie instalados en la subestación principal, es posible, como en el caso de la figura 2, que un coseno Fi 0,85, medido en el primario del transformador, corresponda en realidad a un coseno Fi 0,73, ou inferior, en la barra infinita. Lo anterior es importante porque es común que se pretenda, incorrectamente, establecer comportamientos del horno con base en cosenos Fi medidos en puntos muy alejados eléctricamente de la barra infinita. Como caso extremo puede ser mencionado que si pudiera ser medido el coseno Fi en la punta del electrodo (5), éste sería siempre igual a la unidad, para cualquier valor de reactancia. La forma más correcta de saber cual es el coseno Fi, en la barra infinita, de un horno en operación es midiendo la potencia activa P ( MW ) - que varía muy poco a lo largo del circuito - y calculando la potencia aparente S ( MVA ) como el producto de la intensidad de corriente y la tensión en vacío. En ese caso:

$$\cos \text{Fi} = P ( \text{MW} ) / S_0 ( \text{MVA} )$$

Donde  $S_0 = V_0 \times I$  y,  $V_0$  es la tensión en vacío. I es el valor real de la intensidad de corriente. Para un horno trifásico,  $P = 1,732 \times V_{ff} \times I \times \cos \text{Fi}$  y  $S_0 = 1,732 \times V_{ff} \times I$ .

## Estabilidad de arco

La estabilidad del arco es también una cuestión que se presta a malentendidos. Lo cierto es que para la fusión de chatarra, en especial **para el período inicial de fusión, el arco tiende a ser inestable cuando se utilizan cosenos  $F_i$  elevados**. En ese período, para estabilizar el arco, es necesario que haya un desfase entre la tensión de la fuente y la corriente. De esa manera, cada vez que la corriente de arco se extingue - lo que ocurre 100 veces por segundo cuando la frecuencia es de 50 Hz - la tensión ya posee un valor elevado que permite la inmediata reignición del arco. Si el coseno  $F_i$  es de, por ejemplo, 0,707, la tensión y la corriente están desfasadas  $45^\circ$  y, contrariamente, cuando el coseno  $F_i$  es igual a 1 la tensión y la corriente están en fase, lo que demora la reignición del arco.

Por ese motivo, se dice que para operar en la fusión de chatarra con arco estable es necesario que el coseno  $F_i$  sea inferior a un cierto valor que depende de la etapa de fusión. Por ejemplo, cuando el horno está en la etapa de penetración de la chatarra, ese valor máximo puede ser igual a 0,70 y algunos instantes después puede llegar a 0,80 o más. En realidad **la estabilidad del arco es una cuestión relativa que se manifiesta como un aumento de la reactancia del circuito**. Se dice que el arco está muy inestable, si la relación entre la reactancia operacional y la reactancia física ( llamada de sinusoidal ) asume un valor muy elevado. Llamamos de factor reactancia operacional  $F_{op}$  a la relación "reactancia operacional / reactancia sinusoidal"  $X_{op} / X_{sin}$  que puede ser calculada como el cociente entre la potencia activa calculada para el horno con la reactancia sinusoidal y el valor de la potencia activa real:

$$P_{sinusoidal} = V^2 \times \cos F_i \times \sin F_i / X_{sin}$$

$$P_{real\ medido} = V^2 \times \cos F_i \times \sin F_i / X_{op}$$

$$F_{op} = X_{op} / X_{sin} = P_{sinusoidal} / P_{real\ medido}$$

Normalmente,  $F_{op}$  varía durante el período de fusión de la chatarra entre 1,16 ( para coseno  $F_i = 0,65 / 0,70$  ) y 1,38 ( para coseno  $F_i = 0,80$  o un poco superior ). A medida que la chatarra es fundida y el arco pasa a operar sobre un baño plano de acero líquido, el factor de reactancia operacional se reduce a valores del orden de 1,05 y, cuando se opera con escoria espumosa, como veremos más adelante, el factor de reactancia operacional, además de ser muy bajo, se mantiene en un valor fijo, independiente del coseno  $F_i$ .

Lo curioso es que aún cuando el horno está operando con una excelente escoria espumosa y el arco está perfectamente estable, observándose que la reactancia operacional es casi igual a la sinusoidal, hay quienes se preocupan con una supuesta inestabilidad y recomiendan mantener una alta reactancia para reducir el coseno  $F_i$ .

## Diferenciación del comportamiento del horno según la etapa de fusión - Valor de la reactancia

### *Fusión con escoria espumosa*

De acuerdo con experiencias realizadas en hornos que operan con carga continua de hierro esponja<sup>2)</sup> y, por eso, **con una excelente escoria espumosa, es posible operar con cosenos  $f_i$  próximos de la unidad sin que ocurra inestabilidad del arco**. Esto es: el factor  $F_{op}$  se mantiene constante para cualquier valor de coseno  $f_i$ . Una vez hecha esta constatación, se llega a la conclusión que lo ideal para este período es operar con el máximo coseno  $F_i$  que el circuito permita, o sea con la menor reactancia posible. Quiere decir: para el período de fusión con escoria espumosa, lo ideal es operar con la máxima tensión en vacío y la mínima reactancia, para obtener la máxima tensión de arco que el refractario permita. Para esto, se recomienda eliminar el reactor serie. Cuando se desee operar con la máxima potencia activa posible, para obtener la máxima productividad, será utilizada la máxima corriente permitida por el transformador y por el horno. Y, cuando se prefiera disminuir al mínimo el consumo de electrodos, será empleada una corriente inferior a la nominal. En este caso, el coseno  $F_i$  ( en la barra infinita ), una vez eliminado el reactor, podrá alcanzar valores muy superiores a 0,90 sin que la reactancia operacional aumente.

La máxima potencia activa posible, sin sobrecargar el transformador del horno, en esta etapa muy estable de la fusión, en la cual no existen limitaciones de coseno  $F_i$ , para el caso teórico de un circuito con reactancia cero, será:

$$P ( MW ) = S ( MVA ) \times \cos F_i = S ( MVA ) \times 1$$

Hipóticamente, la potencia activa podría ser igual a la potencia aparente ( coseno  $F_i = 1$  ). En algunos casos reales, los hornos, después de eliminado el reactor, están operando con cosenos  $F_i$  del orden de 0,93 ( medidos en la barra infinita ) y sería posible obtener cosenos  $F_i$  todavía superiores si los transformadores dispusieran de tensiones más

elevadas o si fuera conveniente operar con potencias muy inferiores a la nominal, para lo cual se utilizarían corrientes muy inferiores a la nominal.

Se concluye que en el período de fusión **con escoria espumosa**, en hornos que todavía no alcanzaron condiciones demasiado elevadas de desgaste de refractarios, **lo ideal es operar con mínima reactancia** porque, por el hecho de no ocurrir un aumento de la reactancia operacional, es posible operar con muy elevados cosenos  $F_i$  que permiten obtener la máxima potencia activa o el mínimo consumo de electrodos.

Infelizmente, algunos softwares utilizados para el cálculo de los parámetros del horno aplican para la operación con escoria espumosa el mismo criterio utilizado para la operación en la fusión de chatarra y recomiendan, sin necesidad, la utilización de valores de reactancia elevados o de tensiones más bajas, para disminuir el coseno  $F_i$ , provocando potencias inferiores a la máxima posible y consumos de electrodos superiores a los mínimos. En el caso real de un horno que ya operaba con el reactor cortocircuitado durante el final de fusión, la aplicación de este criterio equivocado, después de la implantación de un nuevo regulador de la posición de electrodos, provocó un aumento de 0,6 kg / ton en el consumo de electrodos y una disminución de la potencia activa.

#### *Fusión de chatarra - Aumento de la reactancia*

En el caso de la fusión de la chatarra, especialmente en el período de penetración y en el inicio de fusión, de acuerdo con lo que ya fue mencionado anteriormente, es necesario observar algunos valores límites de coseno  $F_i$  ( medidos en la barra infinita ) para no provocar una inestabilidad exagerada del arco. Admitamos, sin tomar esto como premisa, que ese coseno  $F_i$  no deba superar el valor de 0,80.

Por otro lado, la operación en la fusión de chatarra, especialmente en el inicio, puede ser realizada con elevados valores de tensión de arco sin que ocurran desgastes excesivos del refractario, porque las paredes del horno están protegidas por la chatarra. Y, de esta manera, es posible operar con altas potencias y bajos consumos de electrodos. La conveniencia de utilizar altas tensiones implica, a veces, en la necesidad de aumentar la reactancia del circuito. Del circuito equivalente de la figura 1, se concluye que la reactancia necesaria para obtener un determinado coseno  $F_i$  puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$X = V_0 \times \text{sen } F_i / I \times F_{op} \quad \text{o} \quad X = V_{ff} \times \text{sen } F_i / I \times F_{op} \times 1,732, \text{ para un horno trifásico}$$

Para un coseno  $F_i$  0,80 (  $\text{sen } F_i = 0,60$  ) y un factor  $F_{op} = 1,38$  se obtendría la siguiente fórmula:

$$X = V_{ff} \times 0,60 / I \times 1,732 \times 1,38 = 0,25 \times V_{ff} / I$$

En la expresión anterior se verifica que cuanto mayor es la relación  $V / I$  mayor es la necesidad de reactancia. **Por ese único motivo** en los hornos que operan con chatarra y con altas relaciones  $V / I$  ( para obtener bajos consumos de electrodos ) se hace necesario aumentar la reactancia del circuito del horno y, para esto, **son instalados reactores serie<sup>3)</sup>**.

#### Efectos de la estabilización de la tensión de alimentación utilizando compensadores estáticos ( SVC' s )

Otro equívoco común es el propagado por los fabricantes de compensadores estáticos ( SVC' s ), utilizados para estabilizar la tensión en un punto del circuito de alimentación. Éstos dicen que el compensador estático, al estabilizar la tensión de alimentación, aumenta la potencia activa del horno y, algunos llegan a sugerir que la estabilización de la red tiene efectos estabilizadores sobre el arco. Los SVC estabilizan la tensión en un determinado punto del circuito, normalmente en la salida de los transformadores rebajadores de la subestación ( punto (2) del circuito equivalente de la figura 2 ). Al estabilizar ese punto del circuito es como si estuvieran cortocircuitando la reactancia entre el punto (0) y el punto (2) y, de esta manera, están llevando la barra estable del punto (0) para el (2). En otras palabras, **la estabilización de la tensión en el punto (2) equivale a una reducción de la reactancia**. El efecto provocado es un aumento del coseno  $F_i$  y, para la operación en la fusión de chatarra, si el coseno  $F_i$  era inferior a 0,80, ocurre un aumento de la potencia. Sin embargo, el mismo efecto podría ser conseguido, con un costo muy inferior, si la reactancia del reactor serie fuese disminuida o si la tensión del transformador del horno fuese aumentada. En lo que se refiere a la posibilidad del SVC estabilizar el arco, se trata de una hipótesis absurda, porque, como se puede ver en el circuito equivalente, la reducción de la reactancia equivale a un aumento del coseno  $F_i$ . Es verdad que en el caso de la operación con escoria espumosa, cuando no hay límite para el coseno  $F_i$ , el efecto de la reducción de la reactancia siempre es positivo para el aumento de potencia, mas, al igual que en el caso de la fusión de chatarra, sería más económico cambiar el transformador por otro de mayor tensión o eliminar el reactor

caso existiera y, así, conseguir un aumento de potencia igual o superior. Los SVC sólo son justificados cuando es necesario reducir el flicker.

## FLICKER

Las fluctuaciones de tensión provocadas por el horno sobre la red de alimentación, cuando superan ciertos límites, pueden ocasionar fluctuaciones de la iluminación de los consumidores residenciales ( flicker ).

De acuerdo con la nomenclatura moderna ( después de los estudios de la UIE y de la norma IEC de 1986 ) el flicker puede ser estimado por la siguiente expresión:

$$\text{Nivel de Flicker: } Pst = Kst \times Scf / Scn$$

En la cual Scf es la potencia de cortocircuito del horno y Scn es la potencia de cortocircuito de la red de alimentación. Kst é un factor que dependería del tipo de horno y del tipo de operación. Sin embargo, para cualquier tipo de horno y de operación - con chatarra - hemos verificado que los valores de Kst son similares. Inclusive, hornos modernos que operan con reguladores de última generación provocan, para igual valor de Scf / Scn, iguales valores de Pst que hornos antiguos con sistemas de accionamiento de baja respuesta. Por lo tanto, el factor definidor de los niveles de flicker es la relación entre la potencia de cortocircuito del horno y la potencia de cortocircuito de la red.

La potencia de cortocircuito del horno es directamente proporcional a la tensión del horno al cuadrado e inversamente proporcional a la reactancia total del circuito del horno:

$$\text{Potencia de cortocircuito del horno: } Scf = V^2 / Xsin$$

Mas, infelizmente, la potencia activa del horno también es proporcional a la tensión al cuadrado e inversamente proporcional a la reactancia del circuito:

$$\text{Potencia activa del horno: } P = V^2 \times \cos Fi \times \text{sen } Fi / Xsin \times Fop$$

Por lo tanto,

$$Scf = P \times Fop / \cos Fi \times \text{sen } Fi$$

Se concluye que **para reducir la potencia de cortocircuito del horno es necesario disminuir la potencia activa.**

Para evaluar el efecto del coseno Fi sobre el flicker destacamos la relación "flicker / potencia activa" ( o "flicker / productividad" ), que, como se deduce de lo anterior, es igual a:

$$\text{Relación flicker / potencia activa: } Pst / P = Kst \times Scf / Scn \times P = Kst \times Fop / Scn \times \cos Fi \times \text{sen } Fi$$

Como Fop aumenta fuertemente cuando el coseno Fi pasa de 0,60 para 0,80 y disminuye muy poco cuando pasa de 0,60 para valores inferiores y, al mismo tiempo, el producto  $\cos Fi \times \text{sen } Fi$  se mantiene em um valor máximo constante entre los cosenos Fi 0,60 y 0,80 y comienza a disminuir en mayor proporción cuando el coseno Fi es inferior a 0,60, se puede concluir que **para operar el horno con la mínima relación "flicker / potencia" es conveniente utilizar cosenos Fi del orden de 0,60<sup>4</sup>**.

Para operar con estos bajos valores de coseno Fi, sin aumentar excesivamente los consumos de electrodos, es necesario aumentar la tensión del transformador. Y, para poder operar con estas dos condiciones - alta tensión y bajo coseno Fi - es necesario aumentar las reactancias (  $X = V \times \text{sen } Fi / 1,732 \times I \times Fop$  ). El aumento de la tensión, además de permitir un aumento menor del consumo de electrodos ( provocado por la necesidad de operar con bajo coseno Fi ), hace que, para igual coseno Fi, se pueda operar con un arco más largo que, al separar el electrodo de la chatarra, provoca una menor fluctuación de las corrientes y las tensiones. En resumen:

Mejor condición para reducir flicker: coseno Fi próximo de 0,60

Para que no caiga tanto  $Va = V_0 \times \cos Fi$ , con la disminución de coseno Fi: aumentar  $V_0$

Para poder operar con alta  $V_0$  y bajo coseno Fi: aumentar reactancia (  $X = V_0 \times \text{sen } Fi / I \times Fop$  ).

Se concluye que **para este caso debe ser aumentada** en gran medida **la reactancia**. Lo ideal es instalar un reactor de valor adecuado que pueda ser cortocircuitado al final de la fusión ( Figura 3 ), cuando el horno opera con escoria espumosa.

En realidad, para igual potencia de cortocircuito del horno e igual potencia activa del horno, el flicker es superior durante el inicio de fusión y va disminuyendo a medida que la fusión avanza, hasta alcanzar un nivel mínimo durante la operación con escoria espumosa ( Figuras 4a y 4b ). Por ese motivo, para disminuir el flicker provocado por el horno de arco es suficiente reducir la potencia en el inicio de fusión e ir aumentándola a medida que el arco se estabiliza. La condición ideal de operación es con altas tensiones durante todo el ciclo de fusión y con valores de reactancia muy elevados que permitan la operación con bajas potencias y, cosenos  $F_i$  de aproximadamente 0,60 durante el inicio de la fusión, que lleguen a 0,80 en la mitad de la fusión, al reducir la reactancia, y alcancen el máximo valor de coseno  $F_i$  y potencia permitido por el circuito, después de eliminar la reactancia, en el período de escoria espumosa.

Es claro que este tipo de operación, destinado a disminuir el flicker, disminuye la potencia del horno en el inicio de fusión y sólo puede ser justificado cuando productividades inferiores a las máximas son admisibles y se prefiere no hacer una inversión de alto valor en un compensador de flicker.

## CICLOS DE FUSION

Con base en lo anterior podemos indicar algunos criterios para definición de los ciclos de fusión, aclarando que esta recomendación se refiere al tipo de horno existente en la actualidad pero que nuevos desarrollos en el proyecto o en la operación de los hornos pueden, a cualquier momento, conducir a otros criterios de operación y que cada caso debe ser examinado con base en las particularidades del circuito y en función de los objetivos operacionales.

- a) Operación con 100 % de HRD - Máxima productividad ( Figura 5 )  
Mínima reactancia ( eliminar el reactor, caso exista ).  
Máxima tensión secundaria ( hasta donde el refractario lo permita ).  
Corriente nominal.  
Coseno  $F_i$  sin límites, generalmente entre 0,80 y 0,90, según el circuito.  
Consumo de electrodos: 2,0 kg / MWh o menor.
- b) Operación con 100 % de HRD - Mínimo consumo de electrodos.  
Mínima reactancia ( eliminar el reactor, caso exista ).  
Máxima tensión secundaria ( hasta donde el refractario lo permita ).  
Corriente inferior a la nominal con valor que permita la potencia deseada ( inferior a la máxima ).  
Coseno  $F_i$  sin límites, generalmente entre 0,85 y 0,95 según el circuito y el valor de la corriente.  
Consumo de electrodos: 1,80 kg / MWh o menor.
- c) Operación con 100 % de chatarra - Reactor fijo ( Figura 6 ).  
Reactor de reactancia mediana.  
Inicio de fusión con tensión inferior a la máxima y corriente nominal, coseno  $F_i$  aprox.: 0,70.  
Fusión con la máxima tensión y corriente nominal, coseno  $F_i$  aprox. 0,75 / 0,80.  
Final de fusión con la máxima tensión y corriente nominal, coseno  $F_i$  sin límites, generalmente del orden de 0,80 según el circuito.  
Consumo de electrodos: 3,5 kg / MWh
- d) Operación con 100 % de chatarra - Máxima productividad - Reactor variable. ( Figura 7 ).  
Reactor de reactancia relativamente alta al inicio de fusión, mediana en el medio de la fusión y nula en el final de fusión.  
Inicio de fusión con tensión máxima y corriente nominal, coseno  $F_i$  aprox.: 0,70 - Reactor 100 %  
Fusión con la máxima tensión y corriente nominal, coseno  $F_i$  aprox 0,75 / 0,80 - Reactor en valor intermedio.  
Final de fusión con la máxima tensión y corriente nominal, coseno  $F_i$  entre 0,80 y 0,90 - Reactor 0 %  
Consumo de electrodos: 2,8 kg / MWh.  
Productividad superior a la del caso c).
- e) Operación con 100 % de chatarra - Para reducción del flicker - Reactor variable  
Reactor de reactancia muy alta al inicio de fusión, mediana en el medio de la fusión y nula en el final de fusión.  
Inicio de fusión con tensión máxima y corriente nominal, cos  $F_i$  aprox 0,60 - Reactor 100 %

Fusión con la máxima tensión y corriente nominal, coseno  $\text{Fi}$  aprox. 0,75 / 0,80 - Reactor en valor intermedio.  
Final de fusión con la máxima tensión y corriente nominal, coseno  $\text{Fi}$  aprox. 0,80 a 0,90 - Reactor 0 %.  
Consumo de electrodos de aprox. 4 kg / MWh.

## COMENTARIOS FINALES

Los criterios utilizados para definir los parámetros eléctricos de operación de los hornos de arco han ido variando con el correr del tiempo. En los años 70 era fundamental poder operar con altas potencias sin destruir los refractarios y para eso se recomendaba operar con bajos niveles de tensión, reactancia y coseno  $\text{Fi}$ . Después del advenimiento de los paneles refrigerados fue posible operar con tensiones más altas durante buena parte de la fusión y de esta manera fue conseguida una importante reducción de los consumos de electrodos. Posteriormente, el desarrollo de las escorias espumosas permitió aumentar todavía más la tensión y la densidad de potencia en los períodos de final de fusión y afino, con lo cual fueron conseguidos nuevos aumentos de productividad y nuevas reducciones de los consumos de electrodos.

El tipo de operación con altas tensiones, implantado en el final de los años 80 y, principalmente, durante toda la década de los 90, obligó a aumentar la reactancia del circuito para garantizar los relativamente bajos niveles de coseno  $\text{Fi}$  necesarios para la estabilización del arco en el período inicial de la fusión. Actualmente, en el final de fusión, las buenas escorias espumosas permiten que los hornos operen con altísimos cosenos  $\text{Fi}$ , sin que ocurra inestabilidad del arco, verificándose la conveniencia de reducir al mínimo la reactancia del circuito en ese período, para aumentar la potencia activa y disminuir el consumo de electrodos.

Por otro lado, cada vez más hornos de alta potencia son alimentados por redes eléctricas relativamente débiles, obligando a operar con bajas potencias y bajos cosenos  $\text{Fi}$  durante los primeros minutos de la fusión de cada carga, para evitar un nivel excesivo de flicker. Para evitar el aumento exagerado del consumo de electrodos, que sería provocado por el bajo coseno  $\text{Fi}$  en este período, se recomienda operar con tensiones elevadas y, para conseguir la operación con esas altas tensiones y los bajos cosenos  $\text{Fi}$ , es necesario aumentar considerablemente la reactancia. De esta forma son disminuidas las fluctuaciones de tensión, no sólo por la reducción del coseno  $\text{Fi}$  pero también por la mayor longitud de arco que al separar el electrodo de la chatarra reduce el porcentual de fluctuación de las tensiones y corrientes.

Las mejoras que permanentemente están siendo introducidas en el proyecto y en la operación de los hornos de arco hacen que una estrategia de operación que actualmente es considerada ideal pueda no ser la más recomendable en el futuro. Lo importante es entender los principios básicos que rigen las relaciones entre los parámetros eléctricos de operación y, para cada caso, aplicar la mejor estrategia, considerando el circuito y los objetivos operacionales. Aun en los días actuales es común oír hablar del "punto óptimo" de operación del horno, refiriéndose a un trabajo de 1954 que proponía operar el horno con el coseno  $\text{Fi}$ , que, para la tensión y reactancia disponibles, provocaba la máxima potencia de arco. Hoy en día, cuando se desea una potencia superior, se recomienda aumentar la tensión de arco.

Cuando, al final de los años 80, se verificó la conveniencia de operar con altas tensiones durante la fusión de chatarra hubo que convencer a quienes creían que un arco largo era necesariamente un arco inestable y mostrar que bastaba aumentar la reactancia a un valor adecuado para estabilizar el arco. Ultimamente, ha sido comprobada la ventaja de operar con la menor reactancia posible en el final de fusión, cuando la escoria espumosa estabiliza el arco con cualquier coseno  $\text{Fi}$ , por más alto que sea, llegándose a la conclusión que para ese período es conveniente eliminar el reactor serie, especialmente en los hornos que operan con carga continua de hierro esponja. Sin embargo, hay quienes continúan utilizando equivocadamente para el período de escoria espumosa los mismos criterios usados para definir la estabilidad de arco en el período de fusión de chatarra y recomiendan, aun para ese período, un aumento de la reactancia o una disminución de la tensión, aun cuando no existen problemas con refractarios.

Es cada vez más común, especialmente en Europa, encontrar empresas que instalan costosos compensadores de tensión ( SVC ' s ) con el único propósito de aumentar la potencia del horno, cuando, en realidad, un análisis más profundo del circuito muestra que el mismo resultado podría ser conseguido, con pequeña o ninguna inversión, mediante la reducción de la reactancia serie o el aumento de la tensión secundaria del transformador.

El objetivo de este trabajo fue mostrar los principios básicos que relacionan los parámetros de operación y dar elementos para que, dependiendo de la red eléctrica de alimentación y de los objetivos operacionales, se puedan definir los parámetros más convenientes para cada caso.

## REFERENCIAS

- 1) JACCARD L. R. - Consumo específico de eletrodos - Correlação com os fatores de operação - 1988 - 43º Congreso Anual de la ABM - Belo Horizonte - Brasil
- 2) ORTEGA J.; SOLIS H.; VASQUEZ J.; LLANES R.; JACCARD L.R. - Modernización y optimización del horno nº 5 de la acería de planchones de Sidor - 2003 - 14º Seminario de Acerías del IAS - Buenos Aires - Argentina
- 3) JACCARD L. R. - Atual estágio da tecnologia dos fornos elétricos de corrente alternada a arco longo - 1996 - XXVII - Seminario sobre fusión, refino y solidificación de los aceros - ABM - Belo Horizonte - Brasil - Publicado en la revista "Metalurgia e Materiais" de la ABM - Vol 53, nº 464, Abril 1997
- 4) JACCARD L. R. - Alternativa para redução das perturbações dos fornos elétricos a arco - 1994 - XXVI Seminario sobre fusión, refino y solidificación de los aceros - ABM - Salvador - Brasil

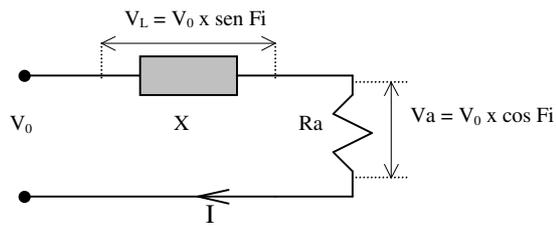


Figura 1. Circuito equivalente del horno de arco  
Figure 1. EAF equivalent circuit

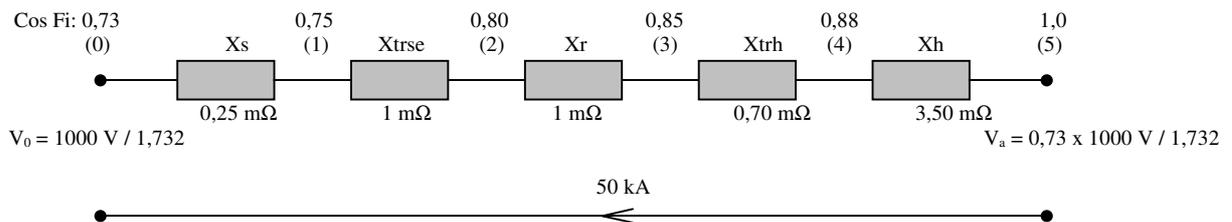


Figura 2. Circuito equivalente completo mostrando como el coseno Fi varía con el punto de medición  
Figure 2. Equivalent circuit showing the power factor dependence with the measurement point

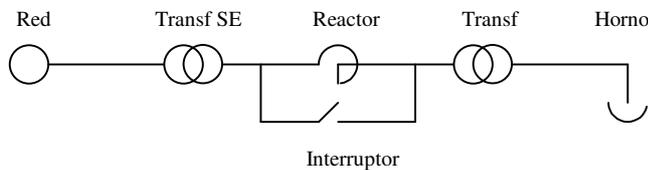


Figura 3. Para el período de escoria espumosa, el reactor puede ser eliminado cerrando el interruptor  
Figure 3. The switch is closed to reduce reactance during the foamy slag period

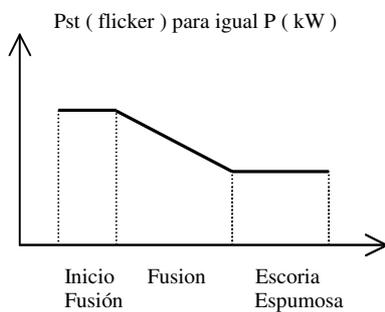


Figura 4a. Variación del flicker en función del período de fusión  
Figure 4a. Flicker along melting

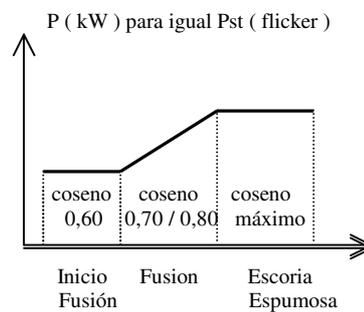


Figura 4b. Tipo de operación para reducir el flicker  
Figure 4b. Melting cycle for flicker reduction

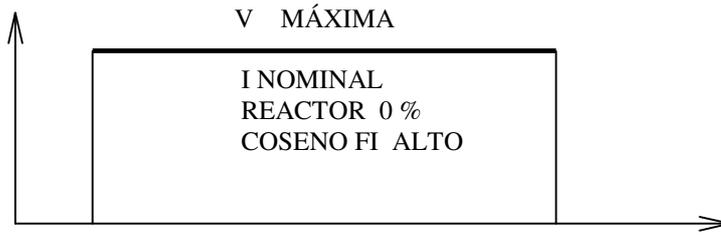


Figura 5. Ciclo de fusión con 100 % de HRD, máxima productividad  
Figure 5. Melting cycle for 100 % DRI, highest productivity

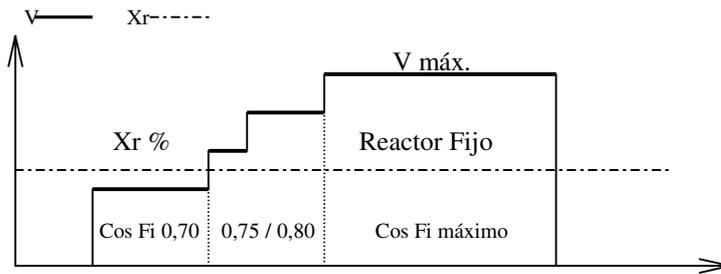


Figure 6. Ciclo de fusión con 100 % de chatarra, reactor fijo  
Figure 6. Melting cycle for 100 % scrap, fixed reactor

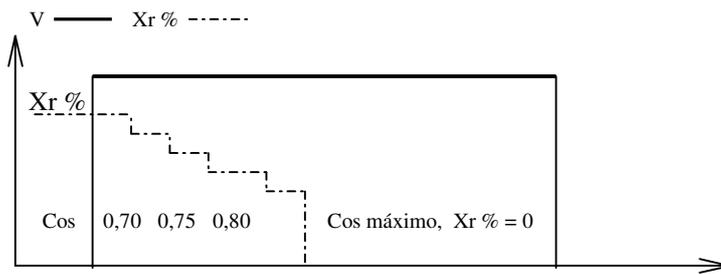


Figura 7. Ciclo de fusión con 100 % de chatarra, reactor variable  
Figure 7. Melting cycle for 100 % scrap, variable reactor