

Las variaciones bruscas del voltaje (flicker) provocadas por los hornos eléctricos de arco y las máquinas extractoras de carbón en piques profundos

Aplicación a un horno de C.A.P. en San Vicente y a las extractoras de Lota y Schwager

1. *Naturaleza del fenómeno del «flicker» y tolerancias admisibles.*—En la industria eléctrica es universal hasta hoy día la exigencia de un adecuado *nivel de voltaje* en terminales del equipo y de una buena *regulación permanente de voltaje* en el sistema de alimentación. Existen prácticas y reglamentaciones al respecto. Las dos condiciones citadas son necesarias para el funcionamiento del equipo conforme a sus características de especificación o planchuela (torque, potencia, velocidad, rendimiento, etc.) y para el más económico aprovechamiento del mismo. A medida que se han extremado las exigencias de nivel y regulación en los últimos años, ha surgido paralelamente una tercera condición impuesta al voltaje: *no tener variaciones bruscas* que causen molestias visuales en el alumbrado o perturbaciones transitorias en el funcionamiento del equipo. A estas fluctuaciones bruscas se las conoce con el nombre de «parpadeo del voltaje» (flicker). Es nuestro propósito dar a conocer sus características y tolerancias admisibles, dimensionamiento de las alimentaciones para no exceder dichas tolerancias y aplicar estas nociones a la instalación proyectada por C. A. P. de hornos eléctricos para fundir acero, que se instalarán en su usina de San Vicente, y a las máquinas extractoras de carbón de Compañías Carboníferas de Lota y Schwager.

Se distinguen el parpadeo «cíclico o periódico» y el «errático o abrupto». En cada caso, el ojo reacciona de manera diferente. Las tolerancias reconocen entonces como determinante un criterio psico-fisiológico, que les da un carácter universal, independiente hasta cierto punto de las condiciones económicas del país, sistema o instalación, a diferencia del *nivel y regulación* del voltaje, que aceptan márgenes más flexibles.

Cuando el voltaje que alimenta un artefacto luminoso sufre una variación brusca ΔV , la intensidad luminosa I de una ampolla incandescente de filamento de tungsteno varía según la función.

$$\Delta I = 3,5 \Delta V (1 - e^{-\frac{Q_t}{V}}) \quad .$$

De acuerdo con la ley de Fichner, se necesita una variación porcentual determinada del «estímulo» (ΔI) para traspasar el umbral de excitación que produce una nueva sensación. Por consiguiente, podemos resumir, diciendo que:

- 1.º La variación máxima de voltaje admisible dependerá de la «periodicidad del flicker cíclico».
- 2.º Idem de la «velocidad de variación» para perturbaciones no cíclicas o esporádicas.
- 3.º Idem del número de perturbaciones en un período determinado.
- 4.º En menor escala del nivel de iluminación y del artefacto.

La deducción anterior nos permite comprender el significado de las 3 curvas que se acompañan, obtenidas por las «Empresas de Utilidad Pública de los Estados Unidos».

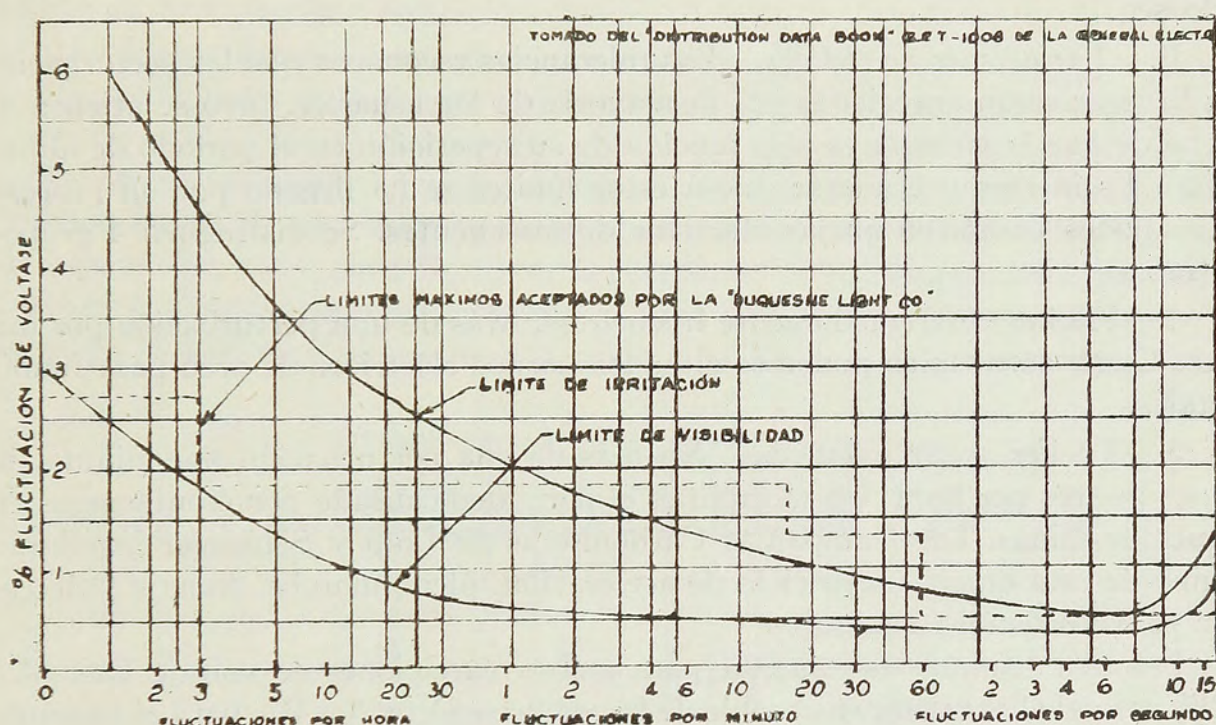


FIG.1.-LÍMITES DE IRRITACIÓN Y VISIBILIDAD DE FLUCTUACIONES DE VOLTAJE.

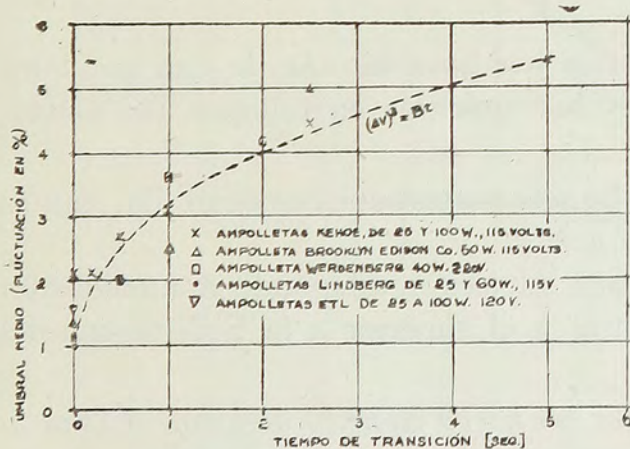
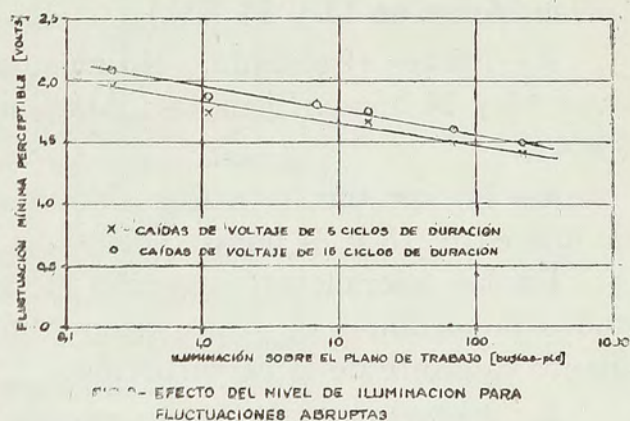


FIG.2.- UMBRAL MEDIO DE PERCEPCION.



«Límite de Irritación y Visibilidad». Por Límite de Irritación debe entenderse aquel que es percibido por todos los observadores, y por Límite de Visibilidad el de los observadores más sensibles.

«Umbral Medio de Percepción en función de la duración de la variación no cíclica».

«Efecto del Nivel de Iluminación sobre el Umbral de Percepción de una variación no cíclica».

Aunque no existen normas aprobadas al respecto, las más importantes compañías de servicio público han fijado en sus explotaciones los límites siguientes a la fluctuación del voltaje:

A. *Variaciones cíclicas*.—Puede apreciarse la relación entre las Tolerancias y las curvas límite de Irritación y Visibilidad; «Duquesne Light Co.» (EE. UU.): 0,5% para fluctuaciones desde 20/seg. a 1/min. «Union Gas & Electric Co.» (EE. UU.): no acepta variación alguna de voltaje entre 3 y 12 ciclos/seg. (gama crítica). «British Electric Association» (Gran Bretaña): 0,7% desde 20/seg. a 1/min. «Siemens Schuckert» (Alemania): 0,5% de 3 a 8 ciclos/seg.; 1,0% a 1 ciclo/seg.

B. *Variaciones no cíclicas*.—Las tolerancias reconocen que las perturbaciones bruscas serán apreciadas por la mayoría de los usuarios, pero se atienen al hecho de que la molestia es sólo función de su repetición en el período de alumbrado. Es interesante anotar que a estos límites se ha llegado por un proceso de reajustes basado en quejas efectivas de los clientes. Se distinguen 4 grupos distintos:

1.—Flicker «extremadamente frecuente». Más de una perturbación por minuto. Como caso típico podemos citar los hornos eléctricos de arco para fundir metales.

2.—Flicker «muy frecuente». No más de una perturbación por minuto, ni menos de tres por hora. Un ejemplo es el parpadeo causado por montacargas en piques de minas. Las Compañías Carboníferas de Lota y Schwager instalarán equipo de esta especie cuyo ciclo de aceleración, plena marcha, frenaje y detención es del orden de 2 minutos.

Práctica común es aceptar para ambos variaciones de voltaje hasta 1,5 y 2% para el cliente no responsable de la perturbación y 3 a 4% para el causante de ella, con límites más estrechos, naturalmente, para el primer caso que para el segundo. (La Cía. «Duquesne Light Co.» ha operado 10 años con una tolerancia de 1,5% en sus sistemas primarios en 66 KV y 2% en sus distribuciones o subtransmisiones en 11 y 22 KV.)

3.—Flicker «frecuente». No más de tres por hora ni más de una por hora entre 18 y 24 horas. Ejemplos: Máquinas herramientas en talleres. Tolerancia, 3 a 4%.

4.—Flicker «no frecuente». No más de seis perturbaciones en el día, ni más de una entre 18 y 24 horas. Tolerancia 5 a 8%.

En las tolerancias anteriores el límite inferior corresponde a medidas en nudos importantes de transmisión primaria y el superior a la S/E misma del cliente causante de la perturbación.

2. *Perturbación de voltaje causada por un horno eléctrico de arco*.—El horno eléctrico de arco emplea la potencia calorífica del arco que se establece entre cada uno de sus 3 electrodos (fases) y el neutro, constituido por la masa metálica que se funde (chatarra). Los 3 electrodos están alimentados directamente desde los bornes de baja tensión del transformador (propio del horno en todos los casos), cuyo enrollado primario o de alta tensión es alimentado generalmente de un

circuito de distribución o sub-transmisión propio, o directamente de las barras de A. T. de la S/E de la industria siderúrgica.

Debe distinguirse el horno de arco del horno de resistencia (hornos de reducción del mineral de hierro o de fabricación de ferroaleaciones) en que los electrodos móviles o fijos van sumergidos en la carga. El neutro en ambos casos es la carga que funde, pero en el último tipo el caldeo se produce por efecto RI^2 en que R es la resistencia del *mineral* mismo, relativamente alta, mientras que en el horno de arco la resistencia de la carga se estima nula (es la chatarra misma), y el calor se genera casi totalmente en el arco mismo. La resistencia equivalente del arco no es constante sino que disminuye con la corriente y más rápidamente que el aumento de ésta, lo que le da la característica llamada de *volt-ampere negativa*. Además, la forma de la curva varía a medida que cambia la temperatura y se satura la atmósfera con vapor de metal. Se pueden distinguir 3 períodos en una colada: *puesta de arco, fusión y refino*.

La puesta de arco se establece por el simple expediente de descender los electrodos hasta la chatarra y provocar el cortocircuito. La curva resistencia de arco corriente es $A1$ (fig. 4). En cuanto el arco se establece, la corriente inmediatamente se desplaza por la curva, alcanzando el valor máximo o de cortocircuito; de igual modo, si por cualquier razón el arco se estira suficientemente (aumento de resistencia), como para disminuir la corriente, no hay tensión para mantenerlo y se corta. Es necesario entonces dar al arco una característica positiva de volt amperes, lo que se consigue con una reactancia $X1$ en serie con el arco.

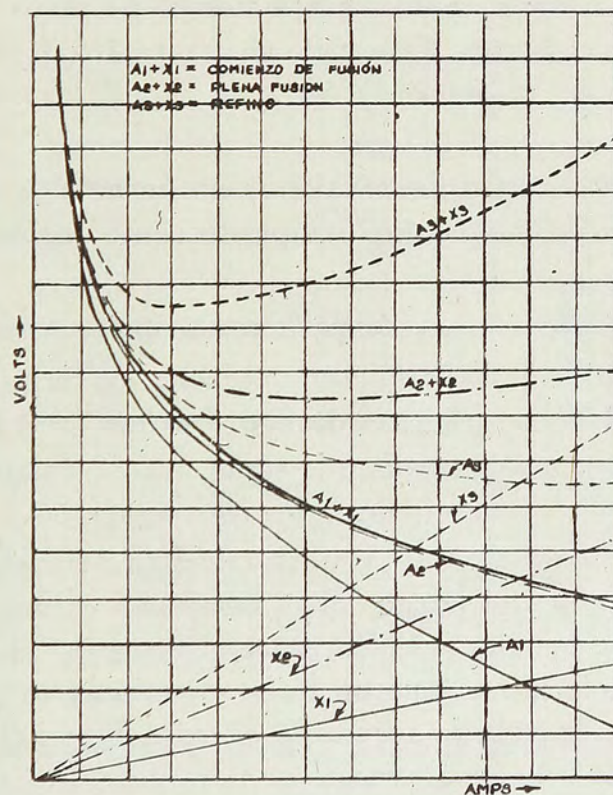


FIG.4.- CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL ARCO.

A pesar del expediente, la materia inicialmente sólida todavía no permite la formación de arco estable. Se conseguirá primero el arco monofásico, se apaga, se restablece en esa u otra fase con una frecuencia, por ejemplo, de un arco por segundo, durante un período de varios segundos, hasta establecer el arco trifásico. Este, a su vez, se apaga y se restablece varias veces con corriente aproxi-

madamente equilibrada antes que los arcos sean estables. En este período de «puesta de arco» las perturbaciones de voltaje en el sistema son enormes, pues provienen de un franco cortocircuito, no limitado más que por la impedancia inherente del sistema X_s hasta la S/E más la impedancia del transformador del horno de los cables de conducción a los electrodos y de los electrodos propiamente tales.

El período de fusión continúa. Durante este período se producen grandes variaciones de potencias reactivas y activa por los cortocircuitos accidentales de las piezas sólidas que emergen de la masa líquida directamente en contacto con los electrodos. Las variaciones de potencia y sus variaciones de voltaje concomitantes son en este período del orden de hasta 15 por minuto, existiendo una relación estadística inversa entre la magnitud y su frecuencia.

Finalmente, a medida que se completa la fusión y comienza el período de *refino*, se consiguen arcos largos, estables y uniformes. Recién el consumo pierde su característica eminentemente variable y se convierte en un consumo no molesto.

Una colada típica de 6 horas de duración puede descomponerse como sigue:

- a) Puesta de arco: algunos segundos de duración;
- b) Comienzo de fusión: $3/4$ de hora;
- c) Plena fusión: 2 horas;
- d) Fin de fusión: 1 hora, y
- e) Refino: $1\ 1/2$ horas. Total, $5\ 1/4$ horas. El resto del tiempo se ocupa en «cargar» y «colar» el horno. Este ciclo se repite 2 ó 3 veces por día según el programa de trabajo de la industria.

3. *Método de cálculo para determinar si un horno de arco es aceptable en un sistema eléctrico determinado.*—Hemos adoptado como recomendable el siguiente método:

Primer problema: *Determinación de la variación de potencia.*

Llamaremos X_s la reactancia del sistema hasta los terminales de alta tensión del transformador del horno (tensión de distribución, 13,8 KV en el caso de C. A. P. en San Vicente). La reactancia que sigue, transformador, reactor si lo hay, barras y cables desde el transformador a los electrodos, y los mismos, es ajustada por los fabricantes a un valor total promedio de 50% referido a los KVA de planchuela del transformador del horno. Este resultado es una simplificación cuya consecuencia inmediata es una relación entre el tamaño del horno y los saltos de potencia. La experiencia indica que un buen criterio es adaptar para la verificación de la fluctuación de voltaje admisible al salto $P + jQ$, que se produce con una frecuencia del orden de 5 a 10 veces por hora dentro de una colada. Los datos de Jones & Stearns en EE. UU. están representados en la figura 5.

Naturalmente, no serán éstas las fluctuaciones mayores de potencia activa o reactiva ni tampoco las más frecuentes. Existe una relación probabilística inversa entre la frecuencia de las variaciones de potencia y su magnitud. La Cía. «Duquesne Light Co.», según B. M. Jones, indica los siguientes valores como saltos de potencia máximos por considerar para cada tamaño de horno en el cálculo de la fluctuación de voltaje máxima.

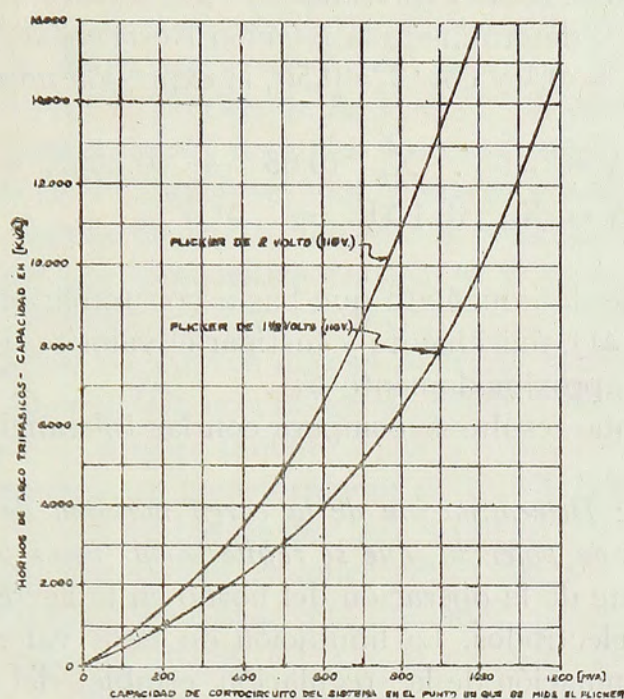


FIG. 5- CAPACIDAD MÁXIMA DEL HORNO EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD DE CORTO-CIRCUITO DEL SISTEMA

KVA del transf. del horno	Salto monofásico máximo	F. de P.
2.000	2.300	43
3.000	3.100	46
4.000	3.800	47
5.000	4.300	50
6.000	5.000	52
7.500	5.600	55
10.000	6.500	60
12.000	7.000	63,5
15.000	7.750	68,5
16.000	8.000	70

Estas cifras han llevado al autor mencionado a fijar, de acuerdo con un cálculo semejante al detallado en el segundo problema, la capacidad máxima del horno que se puede instalar en un sistema eléctrico determinado, lo que debe interpretarse, a nuestro juicio, únicamente como lo deseable para no empeorar de ninguna manera las condiciones de regulación del voltaje previas a la puesta en servicio del horno (ver fig. 5).

Es un hecho fatal, determinado por razones económicas, que es necesario aceptar el desmejoramiento de la regulación instantánea. Un criterio económico realista es el que se esbozó más arriba, y en el que ENDESA y C. A. P. han concordado para resolver el suministro.

Segundo problema: *Verificación de la fluctuación de voltaje.*

La fijación del salto $\Delta P + j \Delta Q$, nos ha inducido a usar la expresión aproximada de la regulación.

$$\Delta V = \Delta I \cdot R_s \cdot \cos \varphi + \Delta I \cdot X_s \cdot \sin \varphi$$

en que todos los términos están expresados en "por unidad", referidos a una base común. En un caso determinado la relación Resistencia/Reactancia es fija y calculable. Para $R/X = 0.1$ y $\cos \varphi = 0.50$, la expresión anterior se convierte en

$$\Delta V = \Delta I \cdot X_s (0.05 + 0.866), \text{ o}$$

$$\Delta V = X_s (0.1 \Delta P + \Delta Q)$$

de donde se desprende de inmediato que basta con tomar en cuenta el salto de potencia reactiva $X_s \Delta Q$, únicamente y castigar el valor resultante en un porcentaje igual a $5/0.866$, aproximadamente 6%.

El valor de ΔV que resulte se compara con las tolerancias indicadas en número 2.

Tercer problema: *Determinación de la carga máxima de duración de varios segundos a bajo factor de potencia, que se repite varias veces por colada.* Esto dependerá exclusivamente de la operación del horno en la acerería y de su sistema de regulación de los electrodos. La limitación de estos valores tiene una doble importancia: la determinación de la «regulación estable» del sistema y las necesidades de potencia activa requeridas. En la figura 6 hemos dibujado las curvas potencia-corriente para un horno de arco considerado como un consumo de voltaje fijo e impedancia variable.

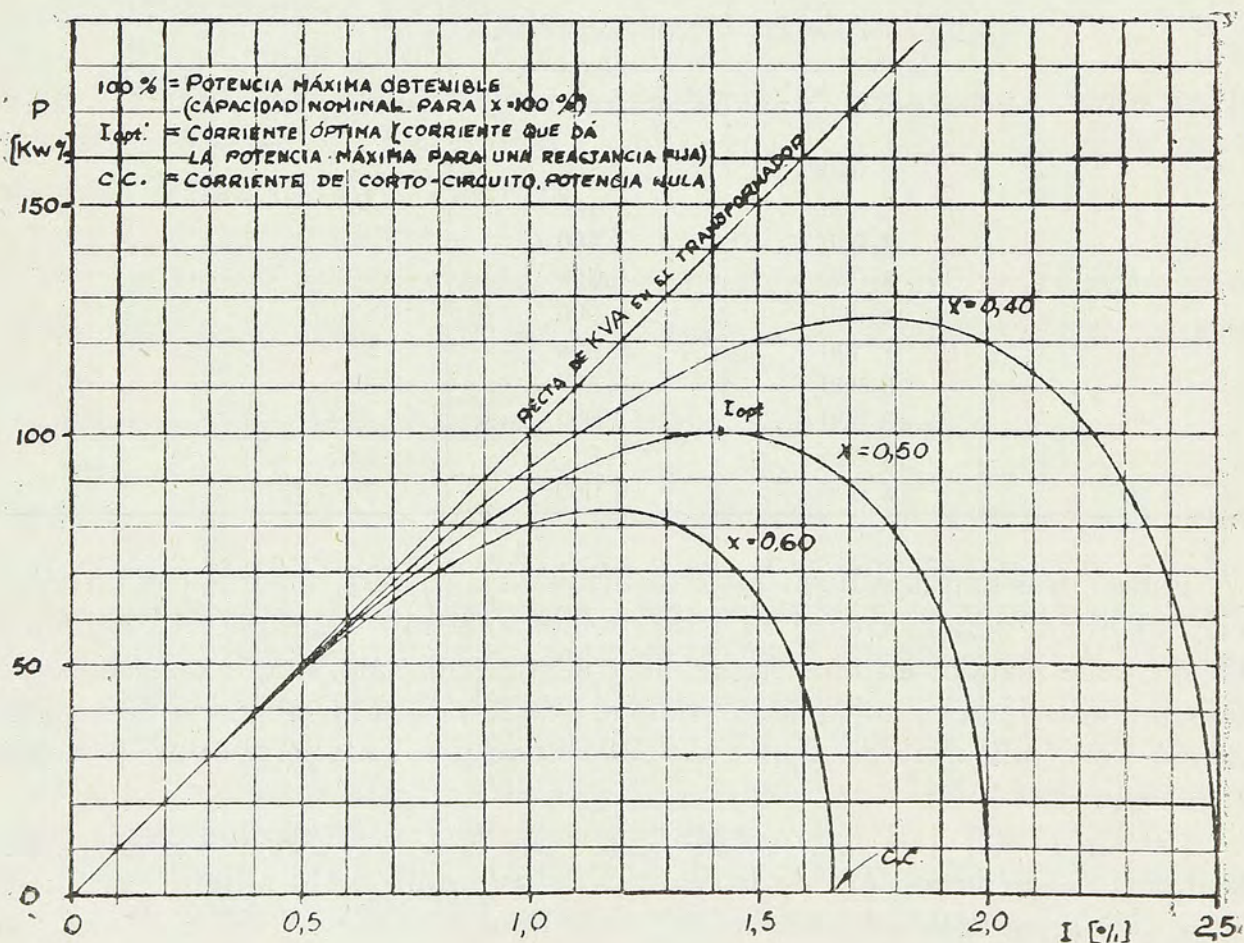


FIG. 6.- CURVAS DE POTENCIA DEL HORNO DE ARCO

Cuarto problema: *Determinación de las fluctuaciones de voltaje para condiciones anormales en el sistema eléctrico*, por ejemplo, menor capacidad síncrona de respaldo (unidades generadoras o condensadores síncronos fuera de servicio,

apertura de líneas de interconexión de sistemas), o mayor reactancia en el sistema de transmisión, como líneas o transformadores fuera de servicio.

4. *Determinación de la reactancia X_s del sistema.*—Debe computarse toda la reactancia que va desde los bornes de A. T. del transformador del horno hasta la fuente generadora equivalente, incluídos los condensadores y motores sincrónicos. La duración de las fluctuaciones que hemos recomendado tomar, prácticamente instantáneas, conducen necesariamente a considerar para la maquinaria síncrona la reactancia promedio entre transiente y subtransiente.

5. *Los hornos eléctricos de C. A. P. en San Vicente.*—La C. A. P. debía decidir entre la instalación de nuevos hornos Siemens-Martin y hornos de refino al arco. Esto fijaba un tonelaje económico de producción anual y, por lo tanto, un tamaño de horno. El primer tamaño fijado fué un horno de 75 por 90 ton. por colada, lo que requería un transformador de 17.500 KVA a 13.800 volt. Este se conectaría el año 1954 a las barras de C. A. P. en su S/E San Vicente, alimentada desde la Central generadora Abanico. Para ese año, la potencia síncrona sería la actual, 86.000 KVA en Abanico (4 unidades generadoras), 1 condensador síncrono en Concepción de 20.000 KVA y la maquinaria síncrona en motores de la propia C. A. P. La verificación conforme al método indicado en 3, arrojaba fluctuaciones del voltaje del orden de 4,9% en barras de C. A. P. y 3,1% en barras de 154.000 volt. de ENDESA en su S/E. Concepción. En vista de que de la barra de 154 KV de Concepción se alimentan los servicios públicos de la ciudad de Concepción y vecinas y toda la zona industrial y minera de la costa de Concepción y Arauco, incluso Huachipato, se adoptó como fluctuación máxima admisible el valor 1,5% para las condiciones del método de cálculo adoptado. La solicitud de C. A. P. no era, por lo tanto, aceptable a priori. Se presentaban de inmediato dos soluciones al problema eléctrico:

a) Dividir la capacidad del horno en 2 unidades. Esto equivale a tener una fluctuación de potencia para el cálculo de 1,2 veces la producida por una sola unidad de capacidad igual a la mitad de la unidad original. Este arbitrio solo no alcanzaba a llevar el parpadeo a límites aceptables.

b) Añadir a lo anterior el financiamiento por parte del cliente de mayor potencia síncrona, en un condensador síncrono de 15.000 KVA y diseño especial (baja reactancia transiente). Representaba una solución anti-económica para C. A. P.

Fué imprescindible entonces que C. A. P. escalonara su programa de expansión a fin de posibilitar la instalación de los hornos. No era posible la instalación de condensadores estáticos en serie en el sistema de transmisión, porque el problema principal era rebajar el parpadeo en Concepción y San Vicente, lo que obligaba a una instalación de este dispositivo en la línea de transmisión, antes de su llegada a este punto, solución anti-económica y técnicamente complicada en 154 KV.

Sugerimos entonces al cliente un mejor aprovechamiento de la potencia síncrona de sus dos compresores de 6.000 HP-13,8 KV, conectándolas a una barra especial directamente en paralelo con los dos hornos de menor capacidad equivalente al horno grande, y esta barra, alimentada a su vez desde la barra principal de C. A. P. a través de reactores de pantalla en serie. Los compresores de 6.000 HP sirven actualmente al alto horno de C. A. P., uno en funcionamiento permanente y el otro de reserva. La solución esbozada ha sido acogida por C. A. P. y los fabricantes del equipo, y obligará al funcionamiento permanente de ambos

compresores. Se instalará primeramente un solo horno de 12.000 KVA, al que seguirá un segundo gemelo cuando el sistema eléctrico lo permita. Además, para llevar las fluctuaciones de voltaje al límite máximo escogido, se operará inicialmente el transformador del primer horno a una capacidad reducida a 7.500 KVA, mediante voltaje reducido en el secundario. Los reactores de pantalla tienen por objeto hacer aportar a los compresores sincrónicos una mayor cuota de energía reactiva en proporción a la que aporta el sistema Abanico desde Concepción si ellos no existieran, disminuyendo así la fluctuación de voltaje porcentual desde Abanico a San Vicente a costa de una mayor fluctuación porcentual entre San Vicente y la barra de hornos y compresores. El límite máximo a esta reactancia queda fijado por la condición de no provocar inestabilidad del funcionamiento de los compresores en el sistema. El resultado final conseguido de acuerdo al método de cálculo esbozado quedó como sigue:

Fluctuación máxima en barras del horno, 5%;

Fluctuación máxima en barra de S/E. de C. A. P. en 13,8 KV, 1,7%, y

Fluctuación máxima en barra de 154 KV Concepción, 1,1%.

Suministro a las máquinas extractoras de Compañías Carboníferas de Lota y Schwager.—Estas dos compañías están instalando cada una dos máquinas extractoras de carbón de 1.600 y 2.000 KW respectivamente. Las profundidades de los piques desde donde extraerán el carbón son 530 y 926 metros respectivamente. La cabria está accionada por una polea directamente acoplada a un motor de corriente continua, en conexión Ward-Leonard, con un generador directamente acoplado a un motor de inducción de 5.250 volt. para Lota y 3.300 volt. para Schwager. La alimentación a estos motores provendrá directamente de los transformadores de 66.000 volt. en las SS/EE. de Lota y Schwager, servidas ambas desde la S/E. común de Coronel de la ENDESA, en 66.000 volt.

Cada ciclo de extracción consta de un período de aceleración del orden de 15 seg. en que la carga fluctúa desde vacío hasta un 175% para descender en 5 a 8 seg. al valor de velocidad de régimen. Al llegar los carros a la superficie sobreviene el período de deceleración y frenaje con un salto brusco instantáneamente casi el 100% de la carga, seguido por un corto período de marcha en vacío. El ciclo total para Schwager es 135 seg. y 108 para Lota.

El motor de inducción representa el motor eléctrico ideal para estos consumos fuertemente variables por la amortiguación que significa el deslizamiento en relación al torque. El efecto de volante necesario fué conseguido por el fabricante sin necesidad de incorporar un volante extra.

El funcionamiento de esta máquina con el ciclo descrito es perfectamente regular a lo largo de cada turno en la mina. Por consiguiente, para el cálculo de las fluctuaciones de voltaje en Coronel, 66 KV, se supuso la superposición de efectos de una máquina de Lota y una de Schwager, y se planteó la condición de que para esta condición que podría repetirse una vez cada 16 minutos la perturbación en Coronel no fuera superior a 1,5%. Esta condición pudo ser cumplida por los fabricantes sin recurrir, como se dijo antes, a incorporar inercia adicional en forma de volantes.

Conclusión.—Los resultados aceptables a que se ha podido llegar en el planteamiento del problema de alimentación a consumos de demandas industriales fuertemente variables como los hornos de arco y máquinas extractoras de minas,

ha demostrado la absoluta necesidad de abordar el problema sobre una base de comprensión de las posibilidades económicas del cliente por parte de la empresa eléctrica que lo sirve, y de un claro entendimiento del problema eléctrico del suministro a terceros clientes por parte de la industria que solicita ser servida, lo cual sólo puede lograrse a través de un franco intercambio de antecedentes entre ambos y el fabricante del equipo que se pretende instalar. Las concentraciones industriales en la Zona servida por el Sistema Abanico de la ENDESA inducen a pensar que se seguirán presentando problemas análogos en los años venideros.