

# Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco eléctrico como cargas en los sistemas de distribución

Pedro E. Issouribehere, Fernando Issouribehere, Gustavo A. Barbera /IITREE-LAT UNLP  
ARGENTINA  
pedroi@iitree-unlp.org.ar

**Congreso Internacional de Distribución Eléctrica - CIDEL 2006**  
**27 al 29 de noviembre de 2006**  
**Buenos Aires, Argentina**

## INDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN Y DEL PAC
3. CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL HORNO DE ARCO
4. MEDICIONES DE CALIDAD DE SERVICIO
5. CONCLUSIONES
6. REFERENCIAS

*Resumen:* El cumplimiento de los reglamentos sobre Calidad de Servicio es un aspecto insoslayable en la conexión de nuevas cargas, tanto para las empresas distribuidoras de energía como para los usuarios, actualmente en la Argentina. Todas las cargas de gran porte presuntamente perturbadoras, debido a su comportamiento alineal y desbalanceado, requieren un seguimiento especial por su eventual alto impacto en la Calidad de Servicio de la red.

En este artículo se describen los aspectos de Calidad de Servicio estudiados en el Punto de Suministro en MT de conexión de un horno de arco eléctrico, instalación de ampliación previsible. Se realizan mediciones del contenido armónico de la tensión y la corriente, de *Flicker*, de potencia activa, reactiva y factor de potencia.

Se evalúa el cumplimiento de los niveles de referencia para la tensión de alimentación y los niveles de emisión del horno de arco como carga eléctrica, respecto de las Normas de Calidad de Servicio Argentinas e Internacionales.

Se presentan diversas soluciones técnicas para el problema de emisión de *Flicker*, se calcula el factor de compensación necesario para cumplir con los niveles de referencia y se determina el porte de un compensador estático adecuado.

## 1. Introducción

Para asegurar la Compatibilidad Electromagnética en las redes de distribución, los niveles de perturbación en los distintos puntos de las mismas deben ser confinados dentro de ciertos límites especificados en la Argentina [1] [2]. Este proceso implica un control periódico de la emisión de perturbaciones de cada carga perturbadora conectada al sistema eléctrico.

Los hornos de arco eléctrico pueden resultar en importantes niveles de perturbación en un sistema

eléctrico de suministro con capacidad convencional.

La fluctuación rápida de la tensión de alimentación, con frecuencias en el rango de 1 –10 Hz y con niveles tan bajos como 0.3 %, puede causar molestias en los seres humanos sometidos a iluminación eléctrica, fenómeno conocido como parpadeo o *Flicker*.

El IITREE ha realizado mediciones de Calidad de Servicio en el Punto de Suministro del sistema de distribución en MT de un horno de arco eléctrico de 2.5 MV.

Se evalúa el cumplimiento de los niveles de referencia para la tensión de alimentación y los niveles de emisión del horno de arco como carga eléctrica.

Se realizaron pruebas para determinar los parámetros eléctricos del horno de arco y de su red de alimentación, a efectos de obtener un modelo equivalente apto para determinar medidas de mitigación.

## 2. Descripción del sistema de distribución y del Pac

El diagrama eléctrico del sistema de distribución y de la acería se muestra en la Figura 1.

La acería se alimenta directamente desde la red de distribución pública en 13.2 kV. Se realizaron mediciones de tensiones y corrientes trifásicas en los puntos numerados como 1 (Punto de Suministro) y 2 (primario del transformador de alimentación del horno de arco).

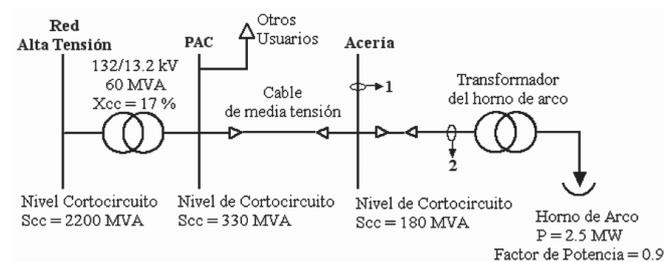


Fig. 1. Configuración del sistema eléctrico

## 3. Características de operación del horno eléctrico

El horno de arco eléctrico consiste en un crisol o cuerpo de placa de acero forrado con material refractario que contiene la chatarra y tres electrodos 2 de grafito sostenidos por un soporte móvil, lo que permite que sean bajados e izados de acuerdo con la salida del sistema de control.

Luego que el horno se encuentra cargado con chatarra, el proceso de fundición comienza bajando los electrodos hasta establecer arcos eléctricos entre los electrodos y la chatarra metálica. El calor generado por los tres arcos eléctricos provee la energía necesaria para la fundición del metal.



Fig. 2. Horno eléctrico medido

Las diferentes fases en la operación de los hornos de arco eléctrico tienen distinto impacto en términos de Flicker. Dichas fases se denominan *Arranque*, *Fundición* y *Afino*.

Desde el punto de vista del *Flicker*, los períodos más críticos son el Arranque y la Fundición, que ocurren cada vez que se adiciona una nueva cesta de chatarra. Estos períodos están caracterizados por grandes variaciones aleatorias en la potencia reactiva absorbida por el horno de arco.

En la Figura 3 se muestran las mediciones realizadas de potencia activa y reactiva del horno de arco durante el proceso completo de obtención de acero.

Debido a las variaciones aleatorias de la longitud de los arcos eléctricos, existen variaciones aleatorias en la corriente tomada por el horno, lo que causa variaciones de tensión proporcionales a la impedancia del sistema aguas arriba del horno.

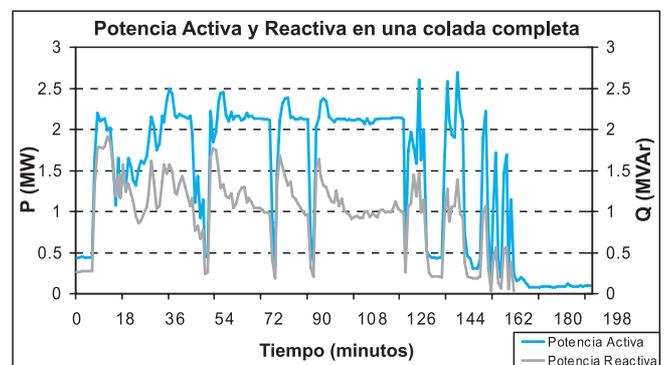


Figura 3. Potencia activa y reactiva durante la colada completa

Mientras que estabilizar la tensión es siempre en beneficio para la acería, en el sistema público de distribución esto es de fundamental importancia ya que las variaciones de tensión deben ser controladas dentro de determinados niveles para reducir su impacto en el resto de los usuarios.

Para apreciar los beneficios de estabilizar la tensión en bornes del horno de arco, es necesario determinar las características de operación del mismo.

El horno puede representarse como una resistencia variable en un circuito monofásico equivalente del horno de arco y su sistema de alimentación, como se muestra en la Figura 4.

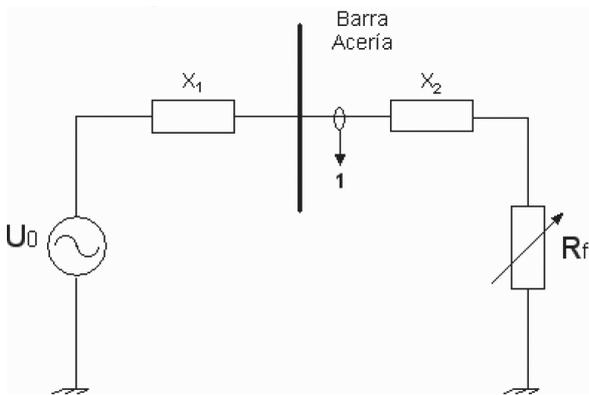


Fig. 4. Circuito monofásico utilizado para estimar las características del horno de arco

El punto numerado como (1) en la Figura 4 es el lugar donde se realizaron las mediciones. La reactancia  $X = X_1 + X_2$  incluye la reactancia de las puntas flexibles, los electrodos, el transformador del horno de arco y de la red de alimentación.

Mediante ensayos de campo es posible estimar convenientemente los valores de las reactancias  $X_1$  y  $X_2$  y la potencia de cortocircuito del horno de arco.

Si los electrodos se sumergen en la chatarra líquida, la carga se presenta como un cortocircuito trifásico, lo cual es equivalente a hacer  $R_f = 0$  en la Figura 4.

En estas condiciones de operación se realizaron mediciones de tensiones y corrientes trifásicas en el punto (1).

En la Figura 5 se muestra las formas de onda de la tensión y la corriente en una fase, registradas durante el ensayo de cortocircuito.



Figura 5. Tensión y corriente medida durante el ensayo de cortocircuito

El ensayo de cortocircuito es de fundamental importancia para estimar la característica de operación del horno de arco eléctrico. Los parámetros obtenidos con este ensayo son:

- La reactancia de red:

$$X_1 = \frac{|U_0 - U_{cc}|}{I_{cc}} = 0.95 \Omega \quad (1)$$

- La reactancia de las puntas flexibles, los electrodos y el transformador del horno de arco:

$$X_2 = \frac{U_{cc}}{I_{cc}} = 30.5 \Omega \quad (2)$$

- La potencia de cortocircuito en la subestación de la acería:

$$S_{cc} = \frac{U_L^2}{X_1} = 185 MVA \quad (3)$$

- La potencia de cortocircuito del horno de arco:

$$S_{cch} = S_{sc} \frac{|U_0 - U_{cc}|}{U_0} = 5.6 MVA \quad (4)$$

Con estos parámetros es posible estimar las variaciones de carga del horno de arco utilizando el circuito monofásico equivalente de la Figura 4.

En la Figura 6 se muestra la característica P-S calculada a partir del equivalente monofásico

(celeste) y los puntos P-S medidos en la etapa de fundición del horno de arco eléctrico (negro).

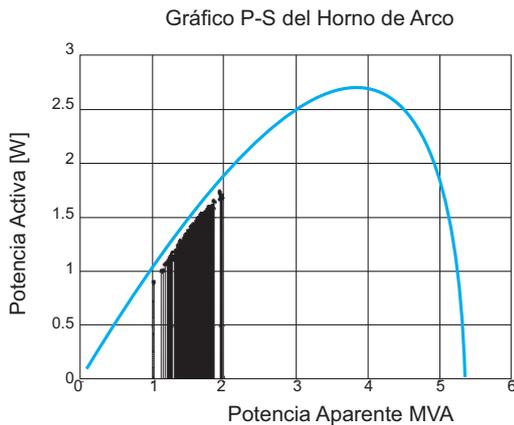


Figura 6. Característica de operación del horno de arco

## 4. Mediciones de calidad de servicio

### 4.1. Mediciones de Armónicas

Se realizaron mediciones de armónicas en cada una de las fases de funcionamiento del horno de arco eléctrico con el fin de caracterizar su comportamiento. En la Tabla I se presentan los resultados obtenidos de las mediciones promedio de 10s y el contenido armónico típico de la corriente de un horno de arco según la Norma IEEE 519 [3]. Las corrientes del horno de arco son desbalanceadas, distorsionadas y varían enormemente aún entre semiciclos consecutivos. Como se observa en la Tabla I, la distorsión tiende a ser más severa durante los primeros minutos del proceso de fundición.

Tabla I: Contenido armónico de la corriente del horno

Condición del horno	Esperables vs. medidos	Corriente armónica en [%] de la fundamental				
		$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_7$
Arranque	Teórico	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
	Medición	6.7	6.4	1.8	4.2	1.6
Afino	Teórico	-	2.0	-	2.1	-
	Medición	1.0	1.4	0.9	3.8	1.6

Posteriormente se midieron armónicas en la tensión y la corriente en las tres fases con un intervalo de actualización de 1 minuto y durante un período de 6 horas.

En la Figura 7 se muestra el perfil del THD (Total Harmonic Distortion, parámetro que pondera globalmente el contenido armónico presente) ex-

presado en [%] en las tres fases de la tensión.

En la Figura 8 se muestra el THD más las armónicas individuales hasta la 20ª, representadas a través de su valor P95 (valor superado por el 5 % de los períodos de 1'), en las tres fases de la tensión.

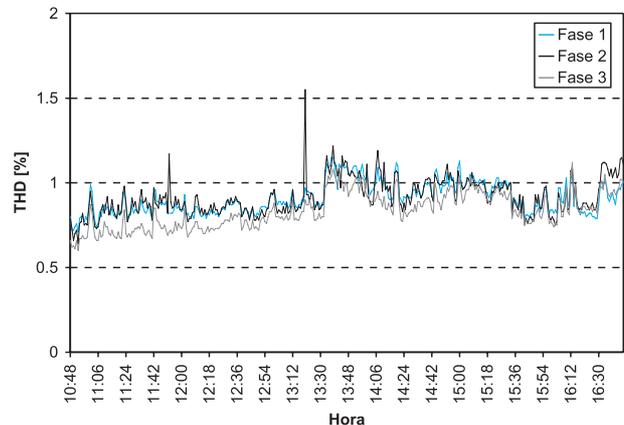


Figura 7. Perfil del THD en las tres fases de la tensión

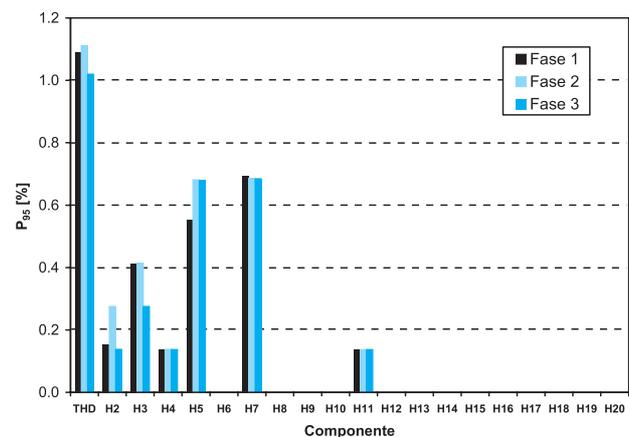


Figura 8. Armónicas individuales en la tensión

En la Figura 9 se muestra el perfil del THD, expresado en [A], en las tres fases de la corriente.

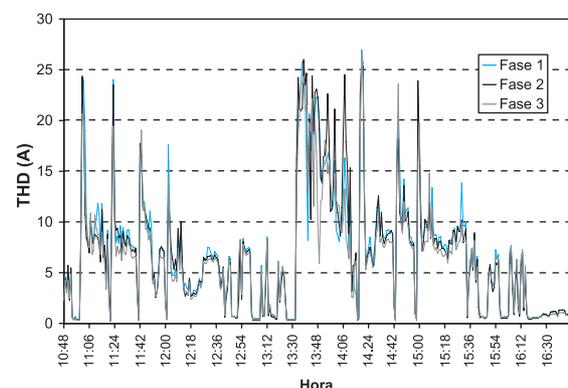


Figura 9. Perfil de THD de corriente en las tres fases

La Figura 10 muestra dichas armónicas en formato de barras empleando el parámetro  $P_{95}$ .

Se observa que se presentan tanto armónicas impares como pares - estas últimas poco frecuentes en cargas convencionales - con niveles similares.

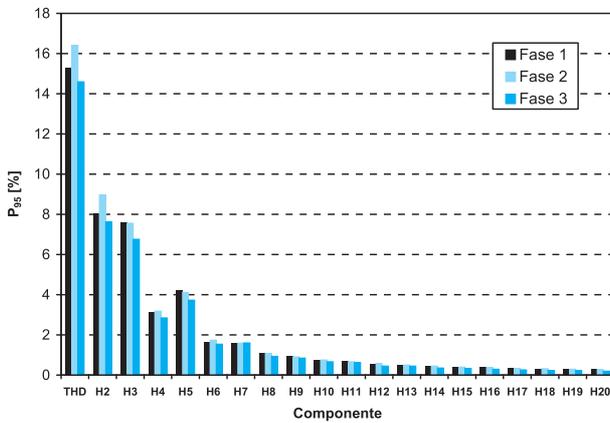


Figura 10. Armónicas individuales en la corriente

En los gráficos anteriores se observan valores importantes en las armónicas pares (4ª, 6ª, 8ª). Estas armónicas tienen valores tolerables más bajos que las impares próximas.

Con el propósito de evaluar el cumplimiento de los niveles impuestos por el ENRE se realizó una medición normalizada de armónicas.

Los resultados obtenidos para la tensión se muestran en la Figura 11 y en la Tabla II.

Según la Res. ENRE 99/97 (Control de la Emisión de Perturbaciones) [1] para evaluar el grado de emisión de corrientes armónicas, cada una de ellas debe referirse a la corriente demandada por el usuario que se obtiene a partir de la potencia contratada y considerando un factor de potencia de 0.85. En el caso en cuestión la potencia contratada es de 2.5 MW, con lo cual la corriente demandada por el usuario resulta  $I_L = 128$  A.

Los resultados obtenidos para la corriente se muestran en la Figura 12 y en la Tabla III.

De acuerdo con [3] los límites de distorsión de corriente para un sistema de distribución, se basan en el porte de la carga respecto al porte del sistema eléctrico al cual se conecta la misma. Se debe determinar la relación entre la corriente de cortocircuito en el Punto de Suministro y la máxima corriente de carga ( $I_{sc}/I_L$ ). En el presente caso, la relación es  $I_{sc}/I_L = 61$ . Con esta relación se eligen los límites de distorsión armónica correspondientes.

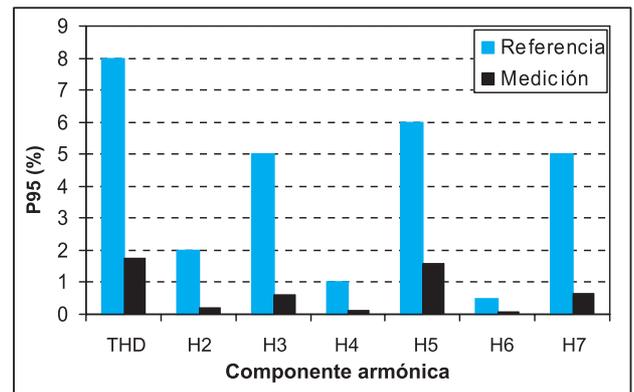


Figura 11. Contenido armónico de la tensión

Tabla II: Tensiones medidas y de referencia

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7
<b>ENRE</b>	8	2	5	1	6	0.5	5
<b>Medio</b>	1.01	0.11	0.47	0.05	0.80	0.03	0.59
<b>P95</b>	1.74	0.19	0.61	0.11	1.61	0.07	0.69
<b>Máximo</b>	2.14	0.36	0.78	0.19	1.97	0.13	0.83

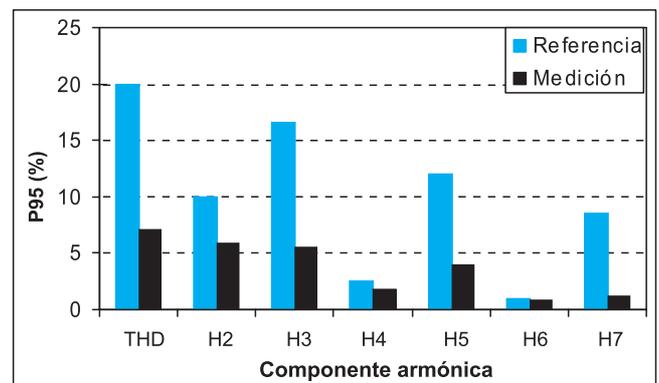


Figura 12. Contenido armónico de la corriente

Tabla III: Corrientes medidas y de referencia

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7
<b>ENRE</b>	20.0	10.0	16.6	2.5	12.0	1.0	8.5
<b>IEEE</b>	12	2.5	10	2.5	10	2.5	10
<b>Medio</b>	3.10	1.73	1.87	0.53	1.45	0.25	0.45
<b>P95</b>	9.14	5.85	5.47	1.76	3.92	0.82	1.26
<b>Máximo</b>	16.1	12	9.11	3.23	5.79	1.62	2.10

### 4.2 Mediciones de Flicker

Las Normas IEC [4] [5] [6] son normas generales que definen respectivamente los distintos tipos de perturbaciones en los sistemas de potencia y los niveles de compatibilidad para las redes públicas de baja tensión. Los niveles de compatibilidad del *Flicker* en redes de baja tensión (BT) y media tensión (MT) en términos del  $P_{st}$  y el  $P_{lt}$  se describen en la Tabla IV.

Tabla IV: Niveles de Compatibilidad de Flicker

Niveles de Compatibilidad		
BT/MT	$P_{st}$	$P_{lt}$
	1.0	0.8

El nivel a cumplir en la Argentina es  $P_{st} = 1,0$ . Guías de diseño de redes [7] indican valores algo menores.

El período mínimo de observación debe ser una semana, y los valores de  $P_{st99\%}$  y  $P_{lt99\%}$  resultantes de las mediciones deben ser comparados con los valores permitidos. Si se tiene en cuenta los valores 95% en lugar del 99%, se sugieren, sobre la base de múltiples mediciones las siguientes relaciones.

$$P_{st99\%} = 1.25 P_{st95\%} \text{ y } P_{lt95\%} = 0.8 P_{st95\%} \quad (5)$$

En la Figura 13 se muestra las mediciones normalizadas en intervalos de 10 minutos y de una semana de duración del  $P_{st}$ .

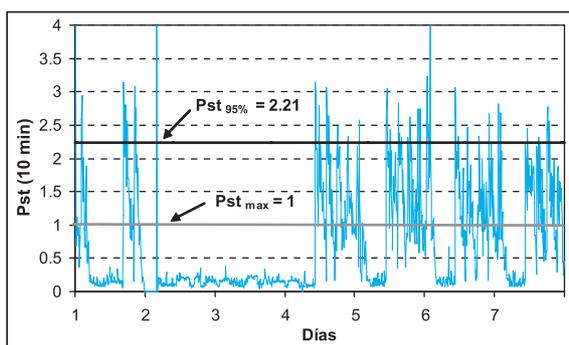


Figura 13. Medición normalizada del  $P_{st}$

Tabla V: Resultados de la medición de Flicker

N° de observaciones de 10 minutos	1008
$P_{st95\%}$	2.21
Observaciones con $P_{st} > 1$	288
Porcentaje de mediciones con $P_{st} > 1$	28.6 %

Los resultados estadísticos obtenidos de la medición de  $P_{st}$  normalizada se presentan en la Tabla V.

El valor de  $P_{st95\%} = 2.21$  se encuentra por encima de lo establecido en las Normas Nacionales e Internacionales.

#### A) Verificación del valor $P_{st95\%}$ medido.

De acuerdo con la Norma Europea CENELEC EN 50160 [7], el *Flicker* producido por un horno de arco puede ser estimado como:

$$P_{st99\%} = 48 \dots 85 \frac{S_{cch}}{S_{cc}} \quad (6)$$

Dada la relación entre percentiles de la ecuación (5) se obtiene:

$$P_{st95\%} = 0.8 (48 \dots 85) \frac{S_{cch}}{S_{cc}} \quad (7)$$

Para el horno de arco analizado:

$$\left[ P_{st95\%} \approx 40 \dots 70 \cdot \frac{5.6}{180} = 1.3 \dots 2.2 \right] \quad (8)$$

El valor más alto coincide razonablemente bien con lo medido.

#### B) Emisión de Flicker de la acería respecto de las Normas de Calidad de servicio.

Según [1], el nivel de emisión de *Flicker* es dependiente de la relación entre la potencia contratada por el usuario y la potencia de cortocircuito del sistema en el Punto de Suministro, como se resume en la Tabla VI.

Tabla VI: Límites de Emisión según la Res. 99/97

Usuarios en AT y MT ( $1kV < U \leq 220$ kV) $K_2 = S_L / S_{sc}$	Límites de emisión individual ( $P_{st}$ )
$K_2 \leq 0,005$	0,37
$0,005 < K_2 \leq 0,01$	0,46
$0,01 < K_2 \leq 0,02$	0,58
$0,02 < K_2 \leq 0,03$	0,67
$0,03 < K_2 \leq 0,04$	0,74
$0,04 < K_2$	0,79

C) Propagación del Flicker en la red.

La relación entre el Flicker en dos nodos de la red (caso de emisor único) y la correspondiente potencia de cortocircuito de los mismos puede ser estimada como:

$$P_{st2} = P_{st1} \frac{S_{cc1}}{S_{cc2}} \quad (9)$$

Los resultados obtenidos de la aplicación de esta fórmula en la red de alimentación de la acería, arroja los resultados que se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII: Propagación del Flicker en la red

	Barras de la Acería (13.2 kV)	PAC (13.2 kV)	Red alta tensión (132 kV)
$S_{cc}$ (MVA)	180	330	2000
$P_{st95\%}$	2.2	1.2	0.2

D) Cálculo de la potencia de cortocircuito mínima para evitar la compensación.

Con el objetivo de cumplir con [1] y de acuerdo con la primera línea de la Tabla VI:

$$\frac{S_L}{S_{cc}} = K_2 \leq 0.005 \quad y \quad P_{stLimite} = 0.37 \quad (10)$$

Para el caso actual:

$$P_{st1} = 2.2 \quad y \quad S_{cc1} = 180MVA \quad (11)$$

Resulta entonces:

$$S_{cc2} > 1100MVA \quad (12)$$

Si la potencia de cortocircuito en las barras de la subestación de la acería es 1100 MVA o mayor, no hay necesidad de compensar el Flicker.

Esto sólo podría ser obtenido alimentando en AT (132 kV).

E) Factor de compensación de Flicker (FI).

La potencia aparente del horno de arco puede ser determinada de acuerdo al factor de potencia límite descrito en la Res. 99/97.

$$S_L = \frac{2.5 \times 10^6}{0.85} = 2.95MVA \quad (13)$$

Se puede estimar la relación entre la potencia aparente del horno y la potencia de cortocircuito en barras de la acería.

$$K_2 = \frac{S_L}{S_{cc}} = \frac{2.95 \times 10^6}{180 \times 10^6} = 0.016 \quad (14)$$

Con este factor  $K_2$  es posible obtener de la Tabla VI el máximo Flicker que puede ser emitido por la acería.

$$P_{stLimite} = 0.58 \quad (15)$$

De acuerdo con este valor es posible estimar el Factor de Compensación de Flicker (FI), con la alimentación en MT actual:

$$F_1 = \frac{P_{streal}}{P_{stlimite}} = \frac{2.2}{0.58} = 3.8 \quad (16)$$

F) Determinación del porte de un compensador de Flicker.

La habilidad de un compensador para reducir el Flicker depende del porte del mismo y de su velocidad de respuesta. La rápida respuesta del STATCOM [8] lo convierte en una solución ideal para mejorar la Calidad de Servicio en los sistemas de Distribución.

Sobre la base de mediciones realizadas en instalaciones industriales, se ha sugerido una fórmula para calcular el porte de un STATCOM de aplicación en hornos de arco eléctrico.

$$Q_{STATCOM} = 0.54 \sqrt{FI} S_h \quad (17)$$

Donde:

$FI = 3.8$  Es el factor de compensación de Flicker.  $S_h = 0.6 * S_{cch} = 3.4$  MVA Es un factor obtenido de la potencia de cortocircuito del horno de arco.

Por lo tanto:

$$Q_{STATCOM} = 0.54(\sqrt{3.8})3.4 \approx MVA \quad (18)$$

5. Conclusiones

Se verifica por mediciones que la distorsión de tensión en el Punto de Suministro se encuentra por debajo de los límites impuestos por las Normas de Calidad.

La emisión de corrientes armónicas medidas durante los períodos de arranque y fundición de

chatarra es elevada, sin embargo, en la medición normalizada semanal los valores se encuentran por debajo de los límites permitidos. El no requerimiento de compensación para este tipo de horno de alto factor de potencia hace innecesario un mayor desarrollo de los problemas de armónicas, lo que sería totalmente imprescindible en el caso de introducir bancos de capacitores.

Se ha determinado mediante mediciones que el nivel de *Flicker* en la tensión de suministro de la acería excede los niveles de referencia en el Punto de Suministro. Esto tiene origen en la propia carga.

En los cálculos de la emisión efectiva de *Flicker*, se demuestra la importancia de la medición directa in situ de la potencia de cortocircuito de la red. Tal prueba permite también determinar los parámetros del horno de arco eléctrico, validando así la modelación en computadora.

Se presentan dos soluciones técnicas para mitigar el fenómeno.

La primera de ellas se basa en elevar la potencia de cortocircuito en el Punto de Suministro a más de 1100 MVA. Esto sólo es factible si se alimenta desde el nivel de tensión inmediato superior (en este caso 132 kV).

La segunda de ellas se basa en instalar uncompensador en MT.

La determinación efectuada del factor de compensación de *Flicker* necesario lleva a la caracterización de un compensador que, por su tipo y porte, resulta en el límite tecnológico actual.

La selección de alguna de las soluciones se basa en la economía del proyecto y en su factibilidad técnica.

## 6. Referencias

- [1] Anexo a la Resolución ENRE 99/97. Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones. Etapa 2.
- [2] Anexo a la Resolución ENRE 184/00. Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2.
- [3] IEEE Std. 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [4] IEC 61000-3-3. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3. Section 3: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current < 16 A.
- [5] IEC 61000-3-5. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3. Section 5: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current > 16 A.
- [6] IEC 61000-3-7. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3. Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems.
- [7] CENELEC EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems". November 1999.
- [8] CIGRÉ Publication WG B4. 19. Static Synchronous Compensator (STATCOM) for Arc Furnace and Flicker Compensation. December 2003.