

# UNA EVALUACIÓN DE FLICKER E INTERARMÓNICAS PROVOCADOS POR CARGAS APERIÓDICAS Y ALINEALES

Mario Brugnoni, Alejandro Jurado  
Grupo "Energía y Ambiente"

Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires  
Paseo Colón 850 (C1063ACV), Ciudad Autónoma de Buenos Aires  
Buenos Aires, ARGENTINA  
Tel/Fax (5411) 4343-0891, email: mbrugno@fi.uba.ar

## Resumen.

La norma IEC 61000-2-1 presenta la siguiente definición de interarmónicas:

"Entre las frecuencias de las armónicas de tensión y corriente pueden observarse algunas que no son un múltiplo entero de la fundamental. Estas pueden aparecer en forma discreta o como un espectro de banda continua".

El conocimiento de las perturbaciones asociadas a las interarmónicas está aún en desarrollo y existe una gran cantidad de investigadores interesados en su estudio.

Las interarmónicas pueden ser generadas por rápidos cambios de la corriente en las cargas conectadas en las instalaciones. Estas perturbaciones son, en su gran mayoría, de naturaleza aleatoria y están generadas por cargas que evolucionan como una sucesión de transitorios. Esta perturbación puede estar asociada al fenómeno de flicker.

Alguna de las cargas que generan estos fenómenos son:

- Hornos de arco
- Variadores de velocidad
- Convertidores estáticos.

En esta ponencia se estudia el comportamiento de un horno de arco haciendo uso de simulaciones mediante el uso de MatLab y ATP.

**Palabras llave:** *Calidad de energía, Flicker, Interarmónicas, FACTS, Statcom.*

## 1. Introducción:

Desde sus comienzos, a finales del siglo XIX hasta nuestros días, los Ingenieros Electricistas han hecho frente a los problemas de calidad de

energía, estabilidad, optimización de la transmisión de energía y otros efectos asociados, haciendo uso de la tecnología disponible, en muchos casos insuficiente para dar respuesta a la complejidad creciente de los sistemas. En particular los fenómenos vinculados al flicker, fueron de difícil solución.

Durante los últimos años se ha incrementado la tendencia de introducir equipos electrónicos de control con el objetivo de mejorar la calidad de la energía. En este sentido los FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems), una tecnología cuyos comienzos se remontan a algo más de dos décadas se encuentra consolidada permitiendo incorporar mejoras en este aspecto. Estos equipos brindan una velocidad de respuesta imposible de lograr con las viejas tecnologías.

En sus comienzos, para la construcción de estos equipos, se utilizaron diodos y tiristores. A continuación aparecieron los Gate Turn Off (GTO), totalmente controlables, avance que trajo consigo el desarrollo de nuevos circuitos de accionamiento y de conceptos como modulación del ancho de pulso Pulse Wide Modulation (PWM), y nuevas topologías de convertidores, de conmutación forzada, capaces de trabajar en altas frecuencias. Actualmente los tiristores comparten protagonismo con los transistores bipolares de compuerta aislada o Isolated Gate Bipolar Transistor (IGBT) y los más novedosos Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)

Uno de las perturbaciones más complejas es la producida por los hornos de arco, debida a la componente aleatoria de estas cargas en sus distintas fases de operación. Estos equipos representan una componente importante del consumo eléctrico de muchas plantas siderúrgicas, que en muchos casos se suma a otras cargas no lineales.

En muchos casos se busca mitigar los efectos sobre la red aumentando la potencia de cortocircuito del sistema de alimentación o recurriendo a sistemas de autogeneración que independicen la carga de la red de suministro. Últimamente, la utilización de FACTS se ha convertido en otra vía para la solución del problema.

## 2. Hornos de arco

El horno de arco presenta en el proceso de fundición estados de funcionamiento bien definidos. En el inicio del proceso el arco funde o “perfora” la chatarra (“picado”). En esta etapa el arco presenta características fuertemente irregulares debidas principalmente al movimiento de la chatarra que hacen que la longitud de la descarga sea extremadamente variable, llegando incluso a la extinción cuando existe contacto directo entre el electrodo y el material.

El proceso continua con un periodo intermedio, donde el acero está parcialmente fundido. El arco alcanza una longitud más regular que en el periodo anterior, pero aun presenta ciertas variaciones importantes. La última etapa del proceso es denominada “baño plano”, en este periodo la masa de acero se encuentra totalmente fundida, presentando una superficie regular que da lugar a un arco de longitud prácticamente constante. Y que presenta únicamente las fluctuaciones características de las descargas a través del aire.

Estas variaciones en el comportamiento del arco hacen que las corrientes presenten diferentes fluctuaciones para cada etapa del proceso de fundición.

Para el presente estudio se ha desarrollado un modelo para cada etapa de funcionamiento del horno.

La técnica de modelado se basa en la característica v-i del horno, la cual junto con los demás parámetros necesarios fue extraída, para este estudio, del diagrama circular de un horno de 74 MVA. En la Figura 1 se observa la característica v-i de un horno y la Fig. 2 nos muestra la forma de onda de la corriente típica de un horno de arco, adquirida en tiempo real en una instalación siderúrgica.

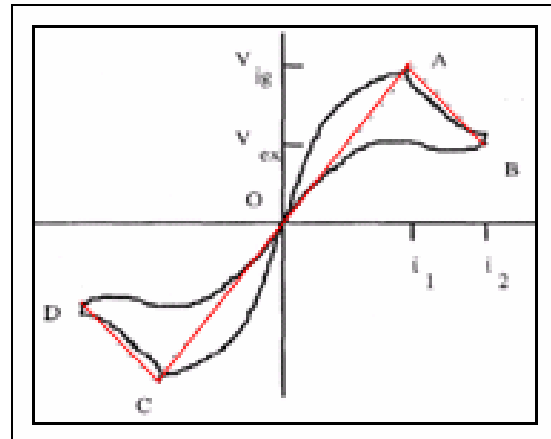


Fig.1: Característica v-i del horno de arco.

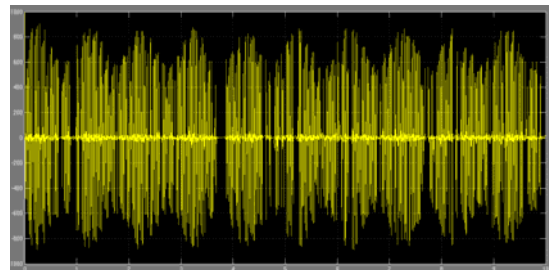


Fig. 2 Forma de onda de la corriente del horno de arco en estudio durante la fase de picado

Existen dos formas de modelar al horno de arco [1], como una fuente de tensión que inyecte en el punto de conexión común una tensión igual a la caída que se produce en el arco [2], [3], [4] ó como una carga pasiva variable con la corriente [5]. En este trabajo, mediante el programa ATP/EMTP, se simula el horno de arco mediante una resistencia variable controlada por TACS. La resistencia se define en tres tramos a través de aproximaciones lineales [6].

Los archivos de datos con los resultados de las simulaciones obtenidas con ATP/EMTP cuyos gráficos se muestran en las Figuras 3 a 5 fueron transferidos a MatLab para su análisis.

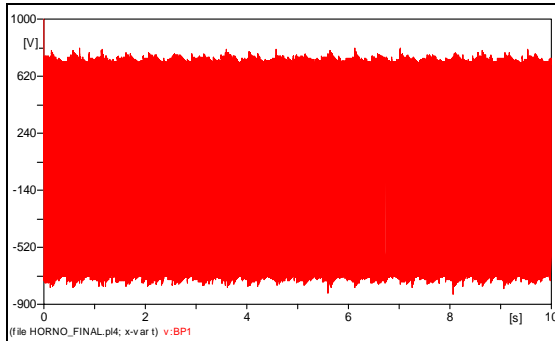


Fig.3 Baño plano, tensión de la fase R en bornes del horno.

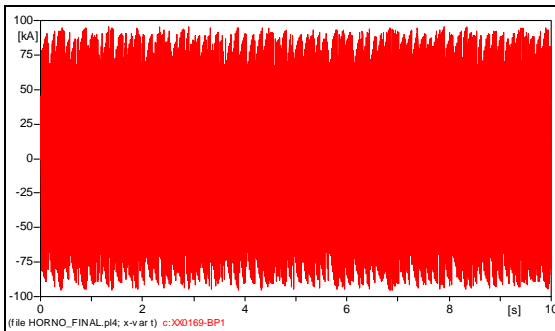


Fig.4 Baño plano, intensidad de la corriente del horno

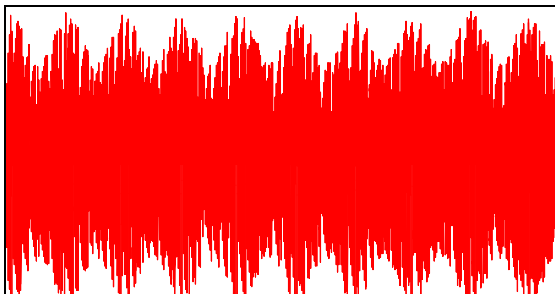


Fig. 5: Picado, Intensidad de corriente del horno para la fase R.

Las simulaciones obtenidas con el programa ATP corresponden a un modelo de horno monofásico, requiriéndose para el análisis con Mat-Lab su generalización a un modelo trifásico. Para ello fueron creadas tres fuentes de corriente que tienen en cuenta el desfase entre ellas aplicando las mismas a un circuito típico de conexión del horno. Es en esta etapa del estudio donde se muestra, además, cómo es posible mitigar las perturbaciones mediante el uso de un Static Synchronous Compensator (STATCOM).

### 3. Descripción del Statcom

El STATCOM - ‘Static Synchronous Compensator’, controla tensión y desfase, y es capaz por tanto de generar o absorber energía reactiva (ver Fig. 6). Este dispositivo permite, entre otras virtudes, mejorar el factor de potencia y el equilibrado de cargas y la forma de onda de las corrientes haciéndolo apto para el fin buscado.

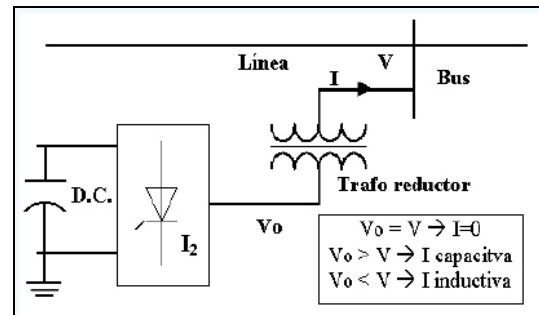


Fig. 6 Esquema de un dispositivo STATCOM

Para la verificación de sus cualidades se ha utilizado el modelo que propone el MAT-LAB

### 4. Modelizaciones

La modelización se ha llevado a cabo utilizando el circuito que se muestra en la Fig. 7 donde se observa la utilización del modelo de Statcom que propone el MatLab. El mismo se ha conectado a través de un interruptor programable que abre el circuito al tiempo de 1 segundo, cuyo objetivo consiste en mostrar el antes y el después de la conexión del Statcom. En la figura también se observa que el horno de arco ha sido modelizado y “encerrado” en un subsistema identificado con la etiqueta “horno”. El circuito se completa con los elementos clásico de una alimentación trifásica y todos los dispositivos de medición que permitieron estudiar en detalle el comportamiento de los distintos elementos.

En Fig. 8 se muestra la pantalla del osciloscopio, situado sobre la barra de medición B3. Se observa, como disminuyen en forma notable las

fluctuaciones que provoca la actuación del horno de arco cuando el Statcom se encuentra conectado.

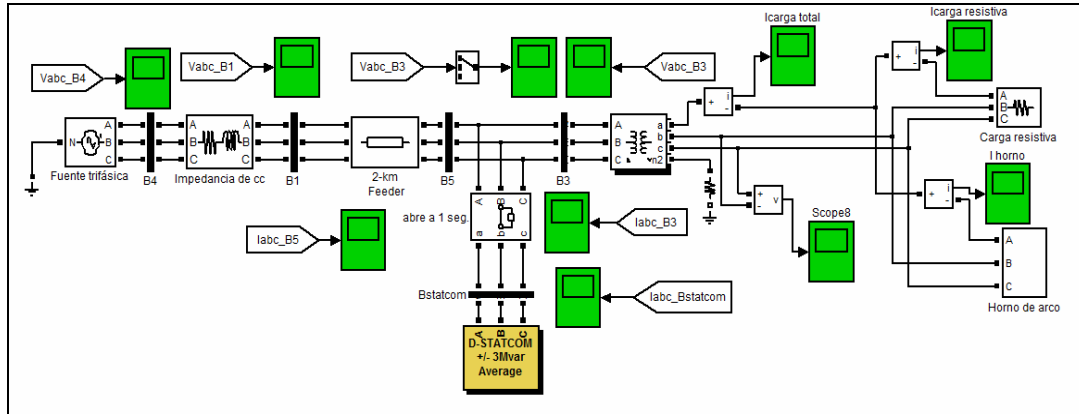


Fig. 7 Circuito utilizado para el estudio.

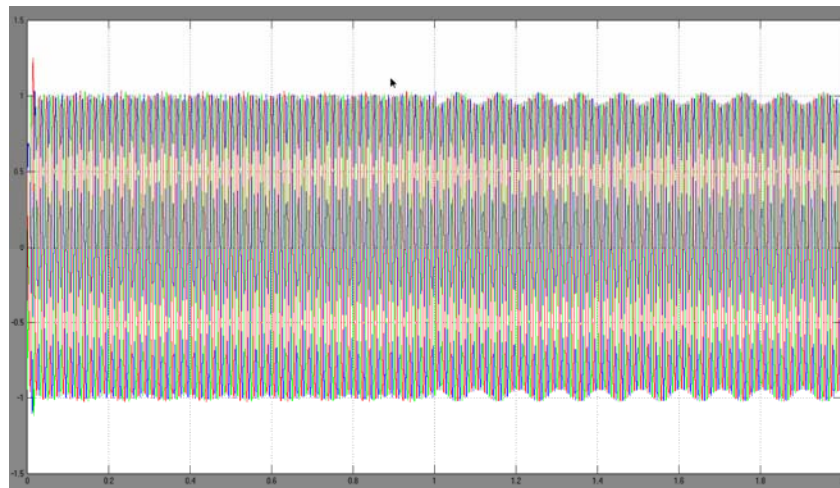


Fig. 8 Forma de onda de la corriente con el Statcom conectado y luego sin él

### Conclusiones:

Son notables los avances técnicos que se han logrado en las dos últimas décadas en dispositivos de electrónica de potencia que permiten mejorar la prestación del equipamiento y las instalaciones eléctricas. Se agrega a ello el aumento de la confiabilidad de estos equipos y su reducción en el costo debido a la fabricación a mayor escala. El equipo que se ha utilizado en la presente ponencia ya cuenta con numerosas aplicaciones en el campo de la electrotecnia. En la descripción del estudio fue posible observar que mediante su aplicación se

reducen en forma sensible la distorsión de la tensión ocasionada por una de las cargas eléctricas más perturbadoras, el horno de arco, en particular en su fase de picado.

**Agradecimientos:** Se agradece al Sr Fernando Rapisardi y al Ing. Sebastian Saénz pertenecientes al GEA por el aporte de datos e ideas para la presente ponencia

## Bibliografía:

\* *“Estudio de la propagación de armónicos en una red de suministro eléctrico utilizando Mat-Lab”*. M Brugnoni; N Lemozy; Jon Bordas. XI ERIAC Encuentro Regional Iberoamericano de la CIGRÉ. Mayo 2005

\**“Simulación de cargas trifásicas deformantes utilizando MAT-LAB”*

M Brugnoni, N Lemozy. VICLAGTEE – Congreso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica. Setiembre 2005

\**“Mitigación de armónicos en ambientes sensibles”*. M Brugnoni, N Lemozy

Congreso internacional de distribución eléctrica, CIDEL 2006

\* *“Efecto de las cargas distorsivas en las redes de distribución eléctrica”* Mario S F Brugnoni. XII ERIAC - Mayo 2007

\* *“Estudio de la Compensación de armónicos utilizando ATP/EMTP Y ETAP”*. A. Jurado, S.

Sáenz, M. Brugnoni. CLADE 2008. Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica. Septiembre.

## Referencias

[1], S. Varadan, E. Makram, A. Girgis. “A New Time Domain Voltage Source Model For An Arc Furnace Using EMTP”. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, N° 3, July 1996.

[2], M. Anxo Prieto Alonso, M. Perez Donsion. “An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis” IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 19, N° 1, January 2004.

[3], A. E. Emanuel, J. A. Orr. “An Improved Method of Simulation of the Arc Voltage-Current Characteristic”. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000.

[4], E. A. Cano Plata, H. E. Tacca. “Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP”. International Conference on Power Systems Transients, Montreal, June 19/23, 2005.

[5], J. Sousa, M.T. Correia de Barros, M.Covas, A. Simoes. “Harmonics and Flicker Analysis in Arc Furnace Power Systems”. IPST, Budapest, June 20/24, 1999.

[6], S. Sáenz, A. Jurado. “Estudio de la Calidad de Energía en Instalaciones con Horno de Arco”. VII congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica. Octubre del 2007, Valparaíso Chile.