

---

## MODELO SIMPLIFICADO DE STATCOM PARA SIMULACIONES TEMPORALES DE EXTENSA DURACIÓN. EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO PARA COMPENSAR EL FLICKER GENERADO POR UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

**F. ISSOURIBEHERE**  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

**J. L. AGÜERO\***  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

**Resumen** – Este artículo tiene como base mediciones realizadas en el Punto de Acoplamiento Común (PAC) donde se encuentra conectado un Horno de Arco Eléctrico. El análisis detallado de las mediciones indica que los niveles de Flicker en el Punto de Suministro de la Acería se encuentran por encima de los niveles establecidos en las normativas Argentina e Internacional.

Las rápidas variaciones de las corrientes del horno de arco requieren una velocidad de respuesta extremadamente grande por parte del compensador. Esto, asociado a los niveles de Flicker registrados, determina la necesidad de utilizar un compensador tipo STATCOM.

En este trabajo se presentan los principios de funcionamiento básicos del STATCOM y se detalla la estrategia de control implementada para la mitigación de las fluctuaciones de tensión. Se realiza una descripción pormenorizada de los diversos bloques que conforman el sistema de control.

Se implementan dos modelos completos del STATCOM en el Programa SIMULINK de MATLAB. El primer modelo, apto para simulaciones temporales de corta duración, incluye el detalle de los dispositivos semiconductores de potencia y sus circuitos de protección. El segundo modelo, basado en el principio de la conservación de la energía, es apto para simulaciones temporales de mayor duración.

Sobre la base de las mediciones de corriente realizadas en la acería se compara la eficacia de ambos modelos de STATCOM para la compensación del Flicker.

**Palabras clave:** Hornos de Arco Eléctrico. Flicker. Armónicas. Calidad de Servicio. STATCOM

### 1 INTRODUCCIÓN

Los hornos de arco eléctrico pueden resultar serias cargas perturbadoras en los sistemas eléctricos. La modulación de amplitud de la tensión de alimentación en niveles tan bajos como el 0.3 % pueden provocar problemas de Flicker en las lámparas de filamento. Estas perturbaciones son particularmente molestas para los seres humanos cuando se encuentran en el rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz.

Un horno de arco eléctrico de 2.5 MW de potencia y 8 toneladas de acero por colada es conectado al sistema de Distribución en 13.2 kV. El IITREE realizó mediciones de Calidad de Servicio con el fin de evaluar los niveles de emisión del horno de arco como usuario perturbador. El análisis de las mediciones indica que los niveles de Flicker se encuentran por encima de los niveles establecidos en las normas.

Los elevados niveles de Flicker medidos determinan la necesidad de utilizar un compensador tipo STATCOM. En este trabajo, se describe la estrategia de control implementada para compensar las fluctuaciones de tensión, se implementa dicho sistema de control sobre la base de la Teoría d-q y se realizan dos modelos de compensador. Se evalúa la efectividad de ambos modelos para la compensación del Flicker.

## 2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

La Figura 1 muestra un diagrama unifilar de la red de alimentación del horno de arco eléctrico.

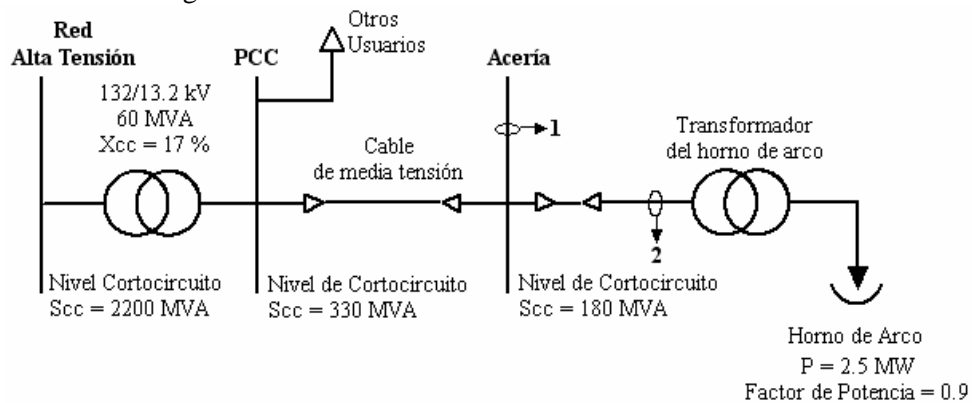


Fig. 1–Diagrama unifilar de la red y puntos de medición.

La acería se encuentra alimentada desde la red pública en 13.2 kV. Los puntos numerados como 1 (alimentación de la acería) y 2 (primario del transformador del horno de arco) en la Figura 1 indican los puntos de medición de corrientes y tensiones trifásicas y Flicker.

## 3 MEDICIONES DE CALIDAD DE SERVICIO EN LA ACERÍA

### 3.1 Mediciones realizadas en la acería

Los hornos de arco eléctrico funcionan con tres electrodos de grafito sostenidos por un soporte móvil, lo que permite que sean bajados e izados para controlar el arco eléctrico. Luego que el horno se encuentra cargado con chatarra, el proceso de fundición comienza bajando los electrodos hasta establecer arcos eléctricos con la chatarra metálica. El calor generado por los tres arcos eléctricos provee la energía necesaria para la fundición del metal.

Existen diferentes fases en la operación de los hornos de arco eléctrico. En términos de Flicker, cada fase presenta un impacto diferente sobre el sistema de potencia. Las fases son: Arranque, Fundición y Afino.

Desde el punto de vista del Flicker, los períodos más críticos son el Arranque y luego 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 requerida por el horno de arco.

Dada la naturaleza errática del arco eléctrico, es esencial la presencia de un compensador estático tipo STATCOM, capaz de mantener el factor de potencia relativamente constante, y por lo tanto estabilizar la tensión de la red durante la obtención del producto completo.

Los resultados obtenidos de las mediciones de Flicker se presentan en la Figura 2 y la Figura 3.

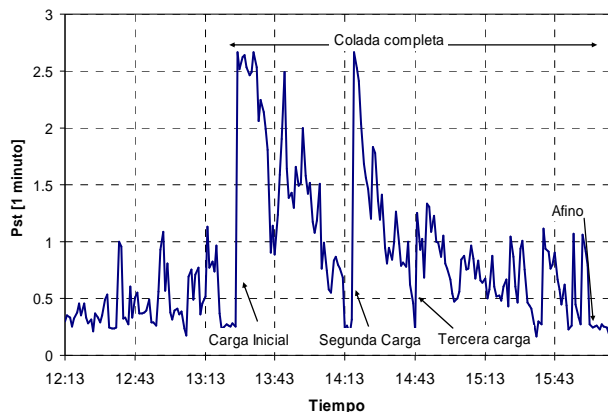


Fig. 2–Medición de Flicker durante la colada.

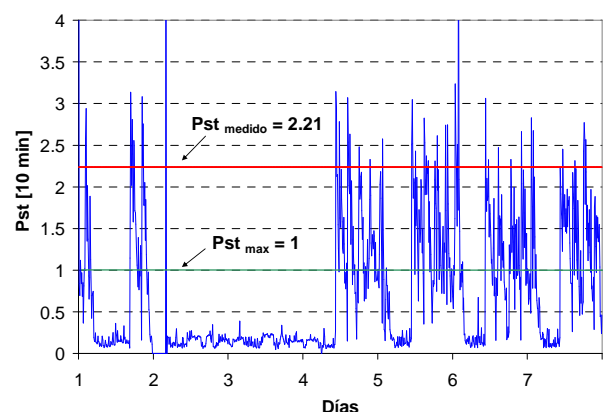


Fig. 3–Medición Normalizada de Flicker.

La medición no-normalizada de Flicker (intervalo de actualización de 1 minuto) tuvo por objeto caracterizar la severidad del Flicker en las diferentes fases de funcionamiento del horno de arco.

De los resultados obtenidos en la medición normalizada [1], se observa que el valor  $P_{ST95\%} = 2.21$  se encuentra por encima del límite impuesto por las Normas Nacionales e Internacionales.

### 3.2 Cálculo del Factor de Compensación de Flicker (FI) y determinación del porte del STATCOM

A partir de la relación entre la potencia aparente del horno y la potencia de cortocircuito en barras de la subestación de la acería, es posible obtener a partir de la Res. 99/97 [2] del ENRE el máximo Flicker que puede ser emitido por la acería.

$$S_L = \frac{2.5 \times 10^6}{0.85} = 2.95 \text{ MVA} \quad K_2 = \frac{S_L}{S_{sc}} = \frac{2.95 \times 10^6}{180 \times 10^6} = 0.016 \Rightarrow P_{ST\acute{m}ite} \leq 0.58$$

De acuerdo con este valor es posible estimar el **Factor de Compensación de Flicker (FI)**:

$$FI = \frac{P_{streal}}{P_{st\acute{m}ite}} = \frac{2.2}{0.58} = 3.8$$

El porte del compensador de Flicker se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{STATCOM} = 0.54 \sqrt{FI} S_h = 0.54 (\sqrt{3.8}) 3.4 \approx 4 \text{ Mvar}$$

Donde:

$1 < FI < 6$  Es el factor de compensación de Flicker de un STATCOM.

$S_{hcc} = 5.6 \text{ MVA}$  es la potencia de cortocircuito del horno de arco bajo estudio.

$S_h = 0.6 \cdot S_{cch} = 3.4 \text{ MVA}$  es un factor derivado de la potencia de cortocircuito del horno de arco.

El elevado factor de compensación de Flicker ( $1 < FI < 6$ ) junto con la elevada velocidad de respuesta justifican la selección del STATCOM como dispositivo ideal para la compensación del Flicker producido por los hornos de arco eléctrico.

## 4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL STATCOM

El STATCOM es un dispositivo shunt de compensación de potencia reactiva, que es capaz de generar o absorber potencia reactiva, y en el cual la salida puede ser variada para controlar los parámetros específicos de un sistema eléctrico de potencia. El comportamiento de un STATCOM es equivalente al de una fuente de tensión (VSC) con una reactancia en sus bornes, y cuya magnitud puede ser controlada muy rápidamente.

Un diagrama simple de un compensador shunt tipo STATCOM para intercambiar potencia reactiva con el sistema de potencia se muestra en la Figura 4, junto con un diagrama fasorial de operación.

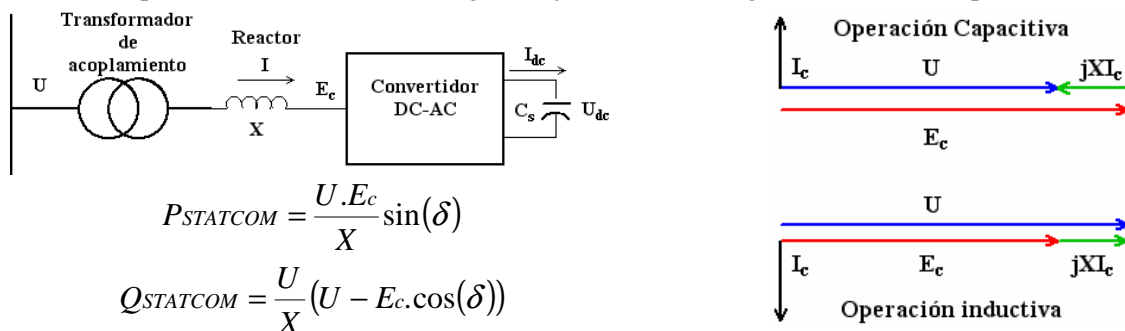


Fig. 4–Diagrama esquemático del STATCOM y diagramas fasoriales de operación.

Si la amplitud  $E_c$  del fasor de tensión de salida se aumenta por encima de la amplitud  $U$  del fasor de tensión del sistema, entonces el fasor de corriente adelanta al fasor de tensión y la corriente fluye desde el convertidor hacia el sistema de alterna, y el convertidor entrega potencia reactiva (capacitiva) al sistema.

Si la amplitud  $E_c$  del fasor de tensión de salida se disminuye por debajo de la amplitud  $U$  del fasor de tensión del sistema, entonces la corriente reactiva fluye desde el sistema de alterna hacia el convertidor, y el convertidor absorbe potencia reactiva (inductiva) desde el sistema.

## 5 MODELO DEL STATCOM EN SIMULINK

El modelo completo del STATCOM  $\pm 4$  Mvar, junto con el sistema de potencia y la carga se muestra en la Figura 5. En la Figura 6 se presenta el modelo de horno de arco utilizado, que consiste en tres generadores de corriente que inyectan en el modelo las corrientes medidas en la acería.

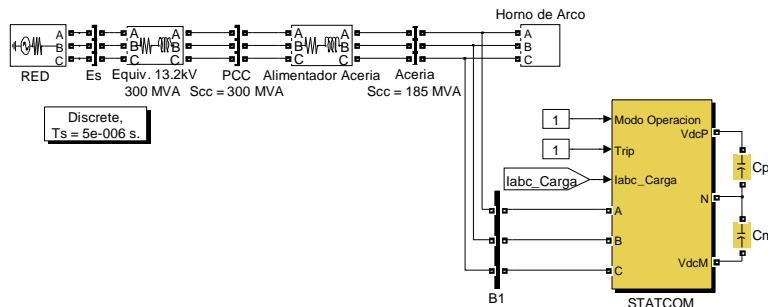


Fig. 5– Modelo SIMULINK del sistema eléctrico completo.

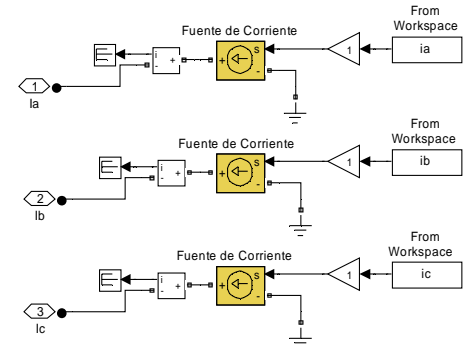


Fig. 6– Modelo del horno de arco.

El STATCOM está compuesto por un inversor de tres niveles con IGBT como semiconductores de potencia, dos capacitores de 5000  $\mu\text{F}$  cada uno y el sistema de control. El STATCOM se acopla con la red a través de un transformador elevador de 1/13.2 kV y configuración  $\Delta$ -Y como se muestra en la Figura 7. Para controlar el inversor trifásico de tres niveles se utiliza la técnica de modulación de ancho de pulsos (PWM) con una frecuencia de portadora de 1.65 kHz. El esquema de modulación es del tipo sinusoidal. El diagrama en bloques del controlador se muestra en la Figura 8.

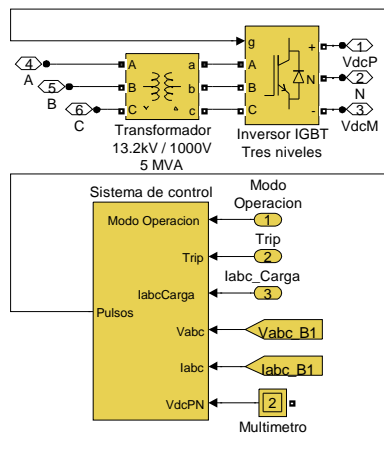


Fig. 7– Modelo del STATCOM.

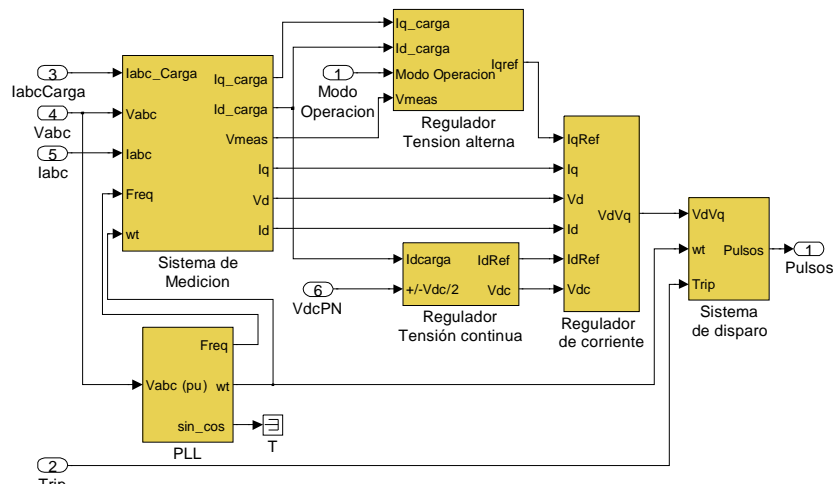


Fig. 8– Modelo del sistema de control del STATCOM.

El sistema de control está compuesto por distintos subsistemas:

- Un lazo de enganche de fase (PLL) sincronizado a la frecuencia de la tensión del primario del transformador de acoplamiento, para proveer la referencia sincrónica que requiere la transformación abc-dq0.
- Un bloque de medición que calcula las componentes d-q de las corrientes y tensiones.
- Un regulador de tensión continua tipo PI que es el encargado de mantener el capacitor cargado a la tensión de referencia.
- Un regulador de tensión alterna. Este bloque es el encargado de elaborar la componente reactiva de la corriente de referencia.
- Un bloque regulador de corriente. Este bloque está compuesto por dos controladores PI que controlan la parte activa y la parte reactiva de la corriente. Las salidas de los controladores son las tensiones  $E_{cd}$  y  $E_{cq}$  que debe generar el inversor. Luego estas tensiones se convierten en tensiones trifásicas aplicando la transformación dq0-abc.

En la Figura 9 se presenta el detalle del sistema de control del STATCOM.

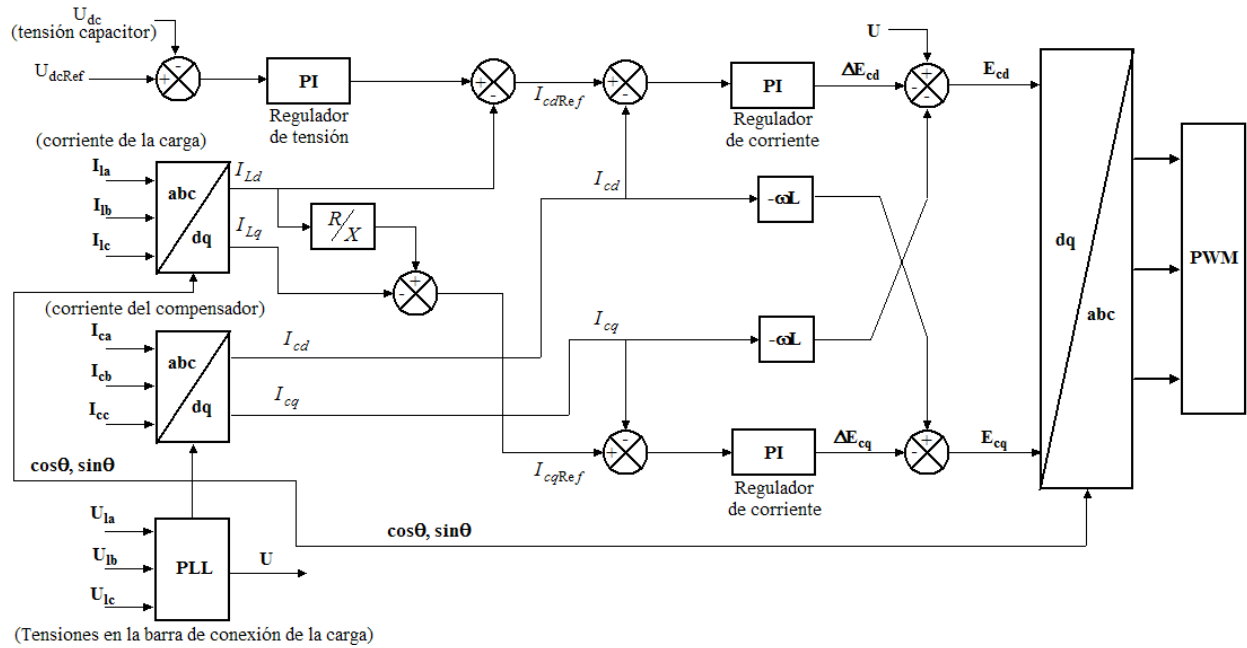


Fig. 9–Diagrama en bloques del sistema de control completo del STATCOM.

La implementación del sistema de control del inversor está basada en la Teoría d-q. Las ecuaciones de tensión del convertidor transformadas del sistema de referencia estacionario a-b-c al sistema de referencia sincrónico d-q son:

$$\begin{aligned} E_{cd} &= \omega L I_{cq} + U - \Delta E_{cd} & \text{con:} & \quad \Delta E_{cd} = k_p (I_{cdref} - I_{cd}) + k_i \int (I_{cdref} - I_{cd}) dt \\ E_{cq} &= -\omega L I_{cd} - \Delta E_{cq} & \text{con:} & \quad \Delta E_{cq} = k_p (I_{cqref} - I_{cq}) + k_i \int (I_{cqref} - I_{cq}) dt \end{aligned}$$

Las referencias de corriente están dadas por:

$$I_{cqref} = -I_{Lq} + (R_s / X_s) I_{Ld} \quad I_{cdref} = k_p (U_{dcref} - U_{dc}) + k_i \int (U_{dcref} - U_{dc}) dt - I_{Ld}$$

- La referencia de corriente  $I_{cqRef}$  se basa principalmente en la compensación de la corriente reactiva del horno de arco. La estrategia de compensación utilizada se presenta en detalle en [3].
- La referencia de corriente  $I_{cdRef}$  se obtiene comparando la referencia de tensión para el capacitor  $U_{dcRef}$  con el valor actual de la tensión en el capacitor a través de un controlador PI.

Si el sistema de referencia d-q se mantiene en fase con las tensiones de la barra de conexión del compensador a través de un Lazo de Enganche de fase (PLL), se obtiene  $U_d = U$  y  $U_q = 0$ , y las potencias activas y reactivas inyectadas al sistema por el inversor pueden ser expresadas como:

$$p = \frac{3}{2} (U_d I_{cd} + U_q I_{cq}) = \frac{3}{2} U_d I_{cd} \quad q = \frac{3}{2} (U_q I_{cd} - U_d I_{cq}) = -\frac{3}{2} U_d I_{cq}$$

Las corrientes  $I_{cd}$  e  $I_{cq}$  determinan los valores instantáneos de la potencia activa y reactiva producida por el compensador.

Este modelo utiliza un modelo detallado del inversor que tiene en cuenta la conmutación de los IGBT. Por lo tanto, requiere de un paso de cálculo muy pequeño ( $T_s = 5 \mu s$ ) para representar adecuadamente la forma de onda de la señal PWM. Esto trae como desventaja que no es posible realizar simulaciones temporales de más de 5 segundos de duración, debido a la gran cantidad de datos que se generan.

## 6 MODELO SIMPLIFICADO DEL INVERSOR Y DEL ENLACE DE CONTINUA

Si no existe un interés particular en la representación del chopeo de la señal PWM, es posible utilizar generadores de tensión controlados en lugar de llaves de potencia, y que mantengan el mismo valor

promedio computado a lo largo de un período de muestreo ( $T_c = 1/1650$ ). Este modelo se denomina “modelo promediado” permite realizar simulaciones con un paso de tiempo mayor, lo que resulta en una reducción del tiempo total de simulación o, puesto de otro modo, se pueden realizar simulaciones temporales de mayor duración ya que se generan menos datos en la misma cantidad de tiempo.

El “modelo promediado” se basa en el principio de conservación de la energía, es decir, que la potencia instantánea debe ser igual en los lados de continua y de alterna del convertidor (asumiendo que las pérdidas en el convertidor son nulas).

$$U_{DC} I_{DC} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad I_{DC} = \frac{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c}{U_{DC}}$$

Por lo tanto, la corriente en el capacitor del enlace de continua puede calcularse a partir de la medición de la potencia instantánea del lado de alterna y la tensión del enlace de continua.

La Figura 10 muestra la implementación en SIMULINK del modelo promediado del inversor. Del lado de alterna el inversor es modelado como tres fuentes de tensión controlables que se determinan a partir de las tres tensiones  $U_{abc}$  de salida del sistema de control. La figura 11 presenta el modelo del enlace de continua. En este modelo, el capacitor (representado por un integrador) se carga por una fuente de continua cuyo valor se calcula a partir de la ecuación previamente descrita. La llave (Switch) se utiliza para evitar la división por cero en los arranques, cuando el capacitor no tiene carga inicial.

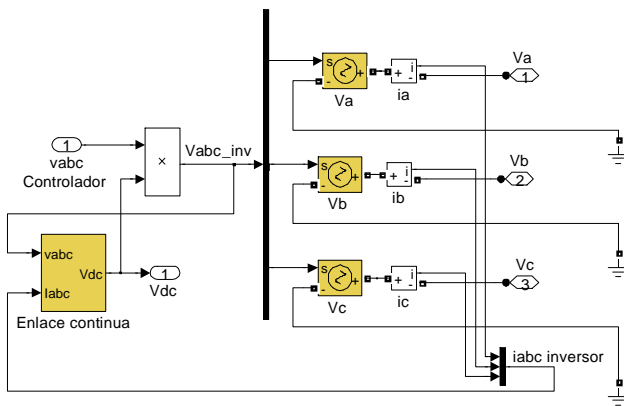


Fig. 10- Modelo SIMULINK del inversor.

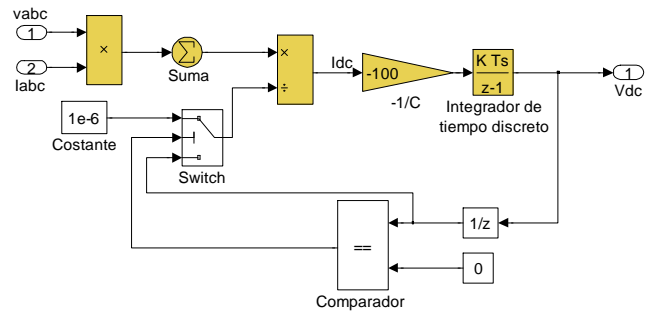


Fig. 11- Modelo del enlace de continua

## 7 OPERACIÓN DEL STATCOM CON UNA CARGA DINÁMICA

Para evaluar el comportamiento dinámico del STATCOM se utiliza un modelo de carga de la librería de MATLAB llamado carga dinámica. Dicha carga tiene la particularidad de ser una carga trifásica, cuya potencia activa y reactiva puede ser controlada por el usuario. Se aplica una variación de potencia reactiva de 1.2 Mvar en forma de escalón positivo en  $t = 0.4$  s. La carga original de  $S = 2.5 \text{ MW} + j1.6 \text{ Mvar}$  toma un valor  $S_1 = 2.5 \text{ MW} + j2.8 \text{ Mvar}$ . En  $t = 0.7$  s se aplica un escalón negativo de potencia reactiva de -3.4 Mvar y la carga toma un valor de  $S_2 = 2.5 \text{ MW} - j0.6 \text{ Mvar}$ . En  $t = 1$  s la carga retoma su valor original. Los resultados obtenidos de las simulaciones, para la variación de la potencia reactiva y para la tensión en la barra de la acería se muestran en la Figura 12 y en Figura 13 respectivamente.

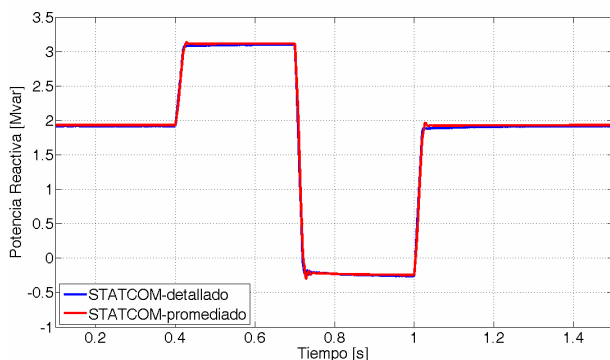


Fig. 12- Escalones de potencia reactiva.

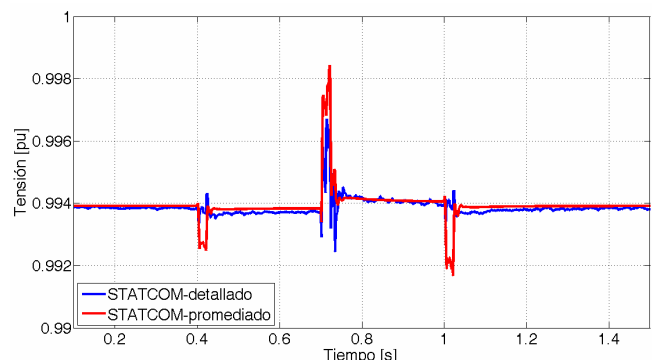


Fig. 13- Variación de tensión en la barra de la acería.

## 8 OPERACIÓN DEL STATCOM CON EL HORNO DE ARCO

Se realizan dos simulaciones, en distintos ciclos de operación del horno de arco eléctrico. La tensión de la barra de la acería sin el STATCOM y con los modelos detallado y promediado se muestra en las figuras 14 y 18. La potencia reactiva entregada por ambos modelos se presenta en las figuras 15 y 19. La tensión en el capacitor se presenta en las figuras 16 y 20. La corriente en la barra de la acería, la corriente del horno y la corriente absorbida por el STATCOM se presenta en las figuras 17 y 21.

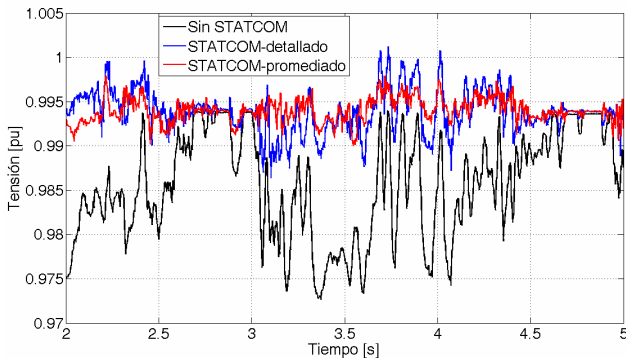


Fig. 14– Variación de tensión en la barra de la acería.

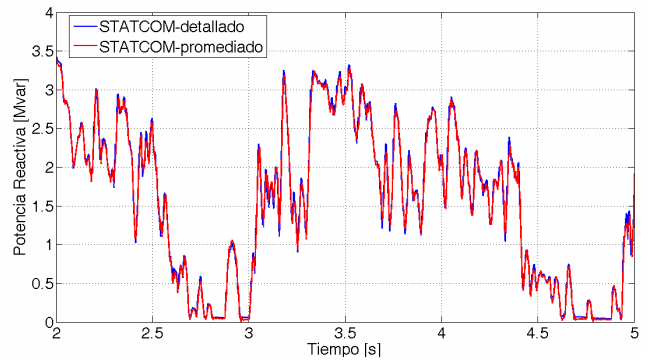


Fig. 15– Potencia reactiva de ambos modelos.

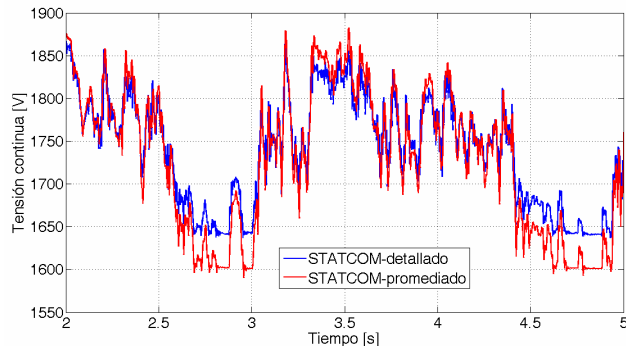


Fig. 16– Tensión continua en el capacitor.

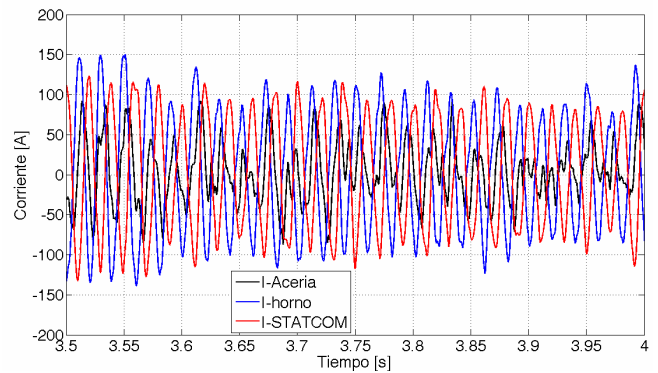


Fig. 17– Corrientes en: Acería, horno y STATCOM.

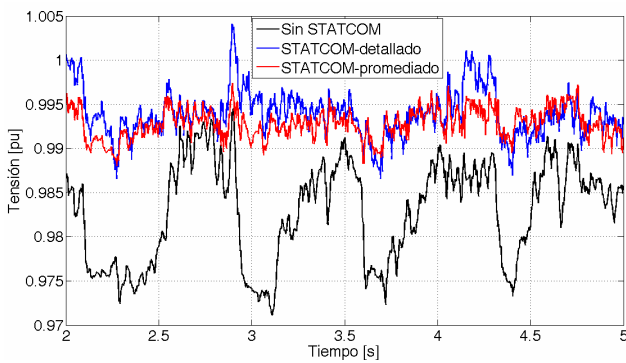


Fig. 18– Variación de tensión en la barra de la acería.

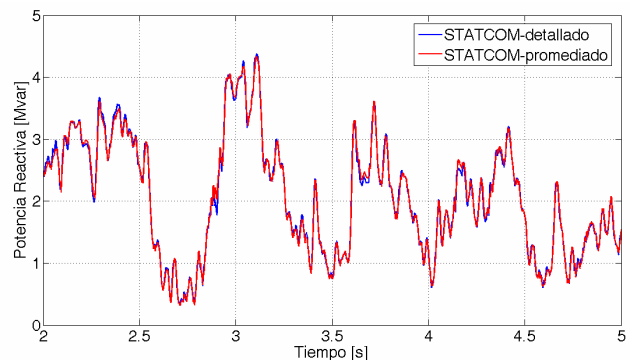


Fig. 19– Potencia reactiva de ambos modelos.

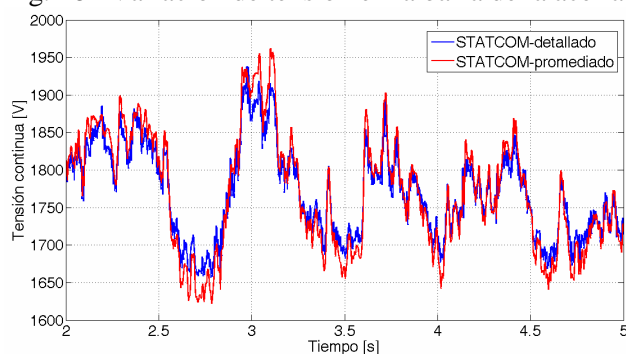


Fig. 20– tensión continua en el capacitor.

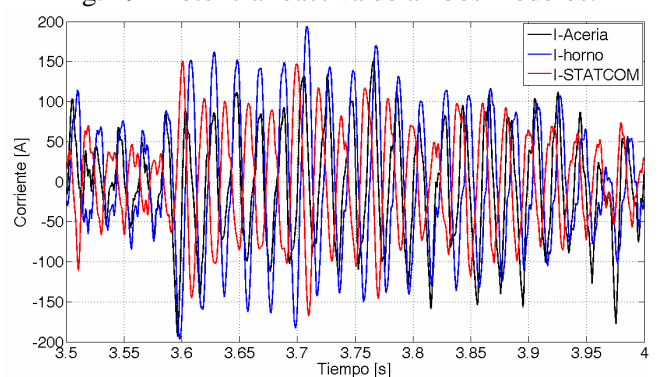


Fig. 21– Corriente en Acería, horno y STATCOM.

En la figura 22 se presenta el valor de  $P_{st95\%}$  en la tensión de la barra de la acería con y sin STATCOM durante una colada, es decir un proceso de obtención de acero completo. El valor de la severidad del Flicker se ha calculado a partir de un modelo de Flickerímetro IEC 61000-8-15 desarrollado en MATLAB. Los valores de  $P_{st}$  obtenidos con el modelo promediado coinciden con los del modelo detallado, teniendo el modelo promediado la ventaja adicional de poderse realizar simulaciones de hasta 60 segundos de duración.

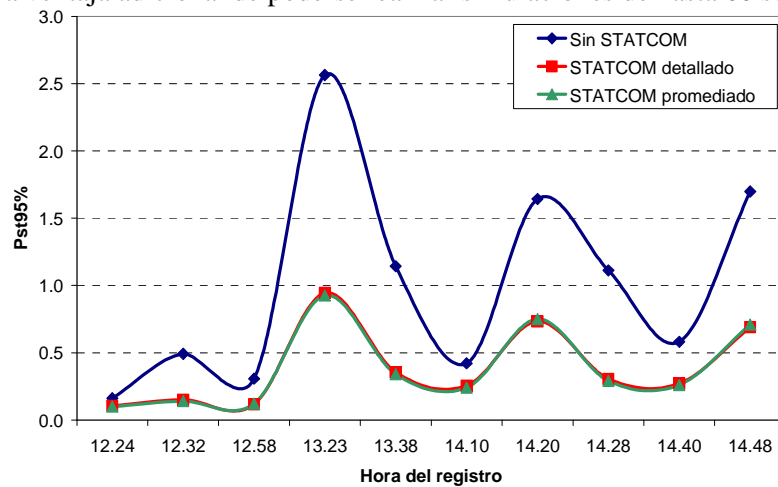


Fig. 22–Medición de Flicker sin y con STATCOM.

Se observa una gran similitud en los resultados obtenidos con los dos modelos de STATCOM. Esto es debido fundamentalmente a que la eficacia en la compensación del Flicker se debe principalmente a la velocidad de respuesta del lazo de control y en ambos modelos dicho lazo de control tiene los mismos ajustes. Las muy pequeñas diferencias son debidas al filtrado ineficiente de las componentes de alta frecuencia que se generan en las conmutaciones de los dispositivos de potencia del modelo detallado. Adicionalmente, se observa que ambos compensadores reducen el valor del  $P_{ST95\%}$  por debajo de 1.

## 9 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan dos modelos de compensador estático STATCOM. El primero de ellos, denominado modelo detallado, ha sido descrito en detalle en [3], trabajo realizado por los mismos autores de esta publicación. Este modelo tiene como gran ventaja ser un modelo físico que incorpora la electrónica de potencia de un compensador real, pero tiene como desventaja que para modelar adecuadamente la conmutación de las llaves de potencia es necesario utilizar un paso de cálculo muy pequeño ( $T_s = 5 \mu s$ ) y por lo tanto sólo pueden realizarse simulaciones de hasta 5 segundos de duración.

El segundo modelo, denominado modelo promediado, ha sido utilizado con el afán de lograr simulaciones temporales de larga duración (hasta 60 segundos) y para ello se ha tomado como base el principio de conservación de la carga, es decir que la potencia del lado de alterna del convertidor es igual a la potencia del lado de continua (se desprecian las pérdidas), lo que permite realizar un modelo simplificado del capacitor. Adicionalmente, el convertidor de potencia se reemplaza por generadores de tensión gobernados.

En ambos casos la implementación del control se basa en la teoría d-q y se han utilizados los mismos controladores y con los mismos parámetros de ajuste.

Los resultados de las simulaciones han demostrado que ambos modelos son perfectamente válidos para estudiar el efecto de mitigación de Flicker de este tipo de compensadores, siendo sin embargo más realistas los resultados obtenidos con el modelo detallado. El modelo promediado es particularmente útil en simulaciones de larga duración y cuando se desea realizar el ajuste de los controladores.

## 10 REFERENCIAS

- [1] “Resolución ENRE 184/00: “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2”.
- [2] Resolución ENRE 99/97: “Base Metodológica Para el Control de la Emisión de Perturbaciones”.
- [3] “Diseño de un STATCOM para la mitigación del Flicker producido por Hornos de Arco Eléctrico. J. Agüero, F. Issouribehere y P. Battaiotto. XIII ERIAC, Foz de Iguazú, Brasil. 20 al 24 de Mayo de 2007.