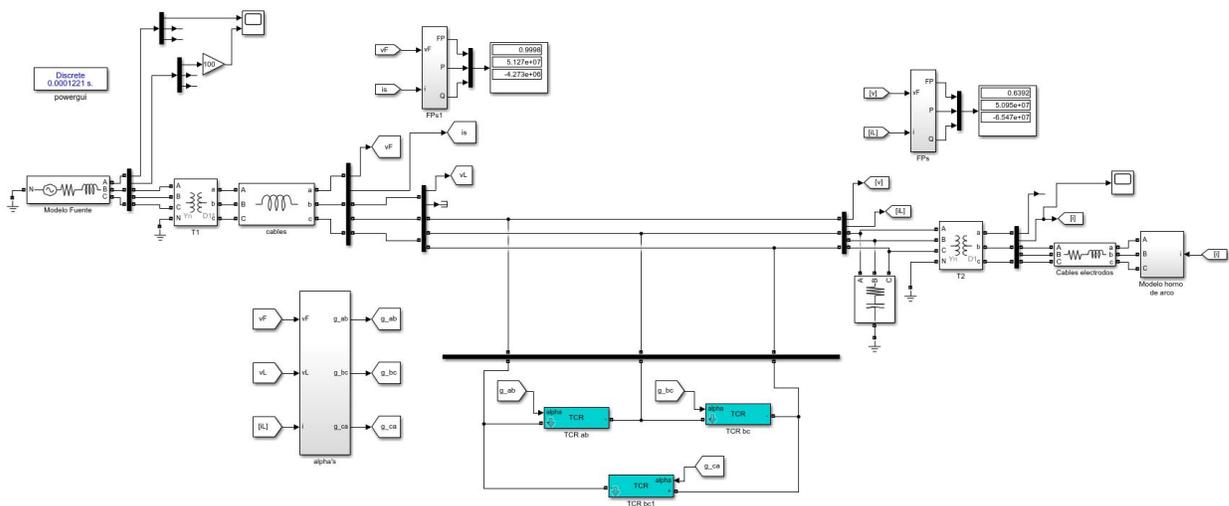


# Compensador estático de potencia reactiva en carga de horno de arco eléctrico



Diego Alejandro Zapata Vélez



# Compensador estático de potencia reactiva en carga de horno de arco eléctrico

Diego Alejandro Zapata Vélez

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Pereira, Noviembre de 2018  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica.



Compensador estático de potencia reactiva en carga de horno de arco eléctrico  
©Diego Alejandro Zapata Vélez

Director: Jesser James Marulanda

Pereira, Noviembre de 2018  
Programa de Ingeniería Eléctrica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
La Julita. Pereira(Colombia)  
TEL: (+57)(6)3137122  
*www.utp.edu.co*

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

# Agradecimientos

Extiendo mis agradecimientos a mentores y especialmente a mi director de tesis quien, desde su experiencia y conocimiento, proporcionó las herramientas necesarias en las materias que tuvo la oportunidad de orientarme y particularmente en mi trabajo de grado, pues facilitó los recursos académicos para poder desarrollar el presente documento y construir las bases para futuras investigaciones. Agradezco también al programa de ingeniería y su plantel de profesores que nutrieron de conocimiento el recorrido a lo largo de mi carrera profesional, familiares, compañeros, y amigos que dentro de mis periodos de estudio representaron apoyo solidario para hacer de este largo proceso una experiencia enriquecedora, y finalmente sin ser menos importante hago un reconocimiento a mi madre que desde el principio orientó mi proyecto de vida y construyó desde su convicción la persona que ahora soy.



# Resumen

La constante expansión del sistema eléctrico de potencia, la fuerte penetración de dispositivos electrónicos en la red y la inmersión de cargas no lineales de gran tamaño[1], son apenas una porción mínima de los factores y problemáticas que se proyectan en el corto plazo para el sistema interconectado de energía, que despierta gran interés para los diferentes campos de estudio, que necesariamente deben ser contempladas, y que para la rama de ingeniería y puntualmente la eléctrica, representan la posibilidad de incursionar en distintas innovaciones y desarrollar alternativas para mitigar las repercusiones que trae consigo la implementación e introducción de las ya mencionadas tecnologías. Con el fin de entregar y optimizar el suministro de energía a lo largo del sistema completo de transmisión atendiendo las exigencias de una demanda más flexibilizada y cumpliendo con los estándares de calidad establecidos por los entes reguladores. Es preciso entonces desarrollar arquitecturas de control, sistemas de compensación de reactivos y eliminación de armónicos, con el fin de favorecer los procesos de transmisión de los vastos paquetes de energía y enriquecer de cualidades al sistema eléctrico de potencia, haciendo del mismo una estructura más confiable y atractiva para la inclusión de las nuevas tecnologías, bien sea que estas estén destinadas para la generación y atiendan a las nuevas concepciones expuestas en la “utility of the future”[1] tales como la generación distribuida y la apertura de un mercado de intercambio entre los consumidores y proveedores de red, o bien, para el caso en que la tecnología incluida sea una carga con condiciones de tensión y corriente variable e impredecible en el tiempo. Ante la problemática, se generan múltiples y muy variadas soluciones que efectivamente atienden las necesidades de calidad y corrigen los factores de potencia, y atenúan las fluctuaciones de la tensión, sin embargo, estas suponen una gran inversión, por lo que la relación costo/beneficio no justifica la implementación de la misma; contrario a esto, una alternativa más atractiva tiene su principio en el uso de compensadores estáticos de potencia reactiva, cuyo dispositivo basa su funcionamiento en un conjunto anti paralelo de tiristores que inyecta reactivos y elimina las corrientes de secuencia que empobrecen los factores de sensibilidad del sistema, tales como factor de potencia o regulación.



# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2	Justificación . . . . .	2
1.3	Objetivos . . . . .	2
1.3.1	General . . . . .	2
1.3.2	Específicos . . . . .	3
1.4	Estructura del trabajo de grado . . . . .	3
1.5	Estado del arte . . . . .	4
1.5.1	Modelo del horno de arco eléctrico . . . . .	4
1.5.2	Método de compensación de horno de arco eléctrico usando componentes simétricos . . . . .	9
1.6	Resultados parciales . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Compensación mediante el uso de componentes simétricas, método discreto</b>	<b>15</b>
2.1	Descripción de las susceptancias a partir del muestreo de voltaje . . . . .	16
2.2	Cálculo del ángulo de disparo para SVC . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Simulación del compensador en carga piloto RC</b>	<b>23</b>
3.1	Parámetros y consideraciones del circuito piloto . . . . .	24
3.2	Corrección del factor de potencia . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Compensación en sistema de potencia con carga de horno eléctrico</b>	<b>27</b>
4.1	Comparación entre el modelo sin compensación y el modelo con la arquitectura de control . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>33</b>
5.1	Futuros trabajos de investigación . . . . .	33



# Capítulo 1

## Introducción

La aceptación por parte de la industria metalúrgica en la inclusión de hornos de arco eléctrico para la fundición de chatarra y posteriormente la fabricación de láminas de alta calidad, han logrado posicionar esta tecnología en el mercado, compitiendo con aquellas de mayor tradición por sus bajos costos de fabricación además de una mejor disposición final de productos y máquinas obsoletas, sin embargo como consecuencia, las instalaciones aledañas a éstas sufren perturbaciones en el suministro, y pérdida de la calidad de energía dado el comportamiento impredecible del horno, fenómenos como el parpadeo y factores de potencia bajos son reincidentes y representan un problema frente al cumplimiento mínimo de la calidad de energía que debe ser proporcionado a un cliente, por tal motivo es que investigadores y profesionales de variadas áreas invierten sus esfuerzos en la búsqueda de compensadores con el ánimo de revertir estos sucesos o que en pequeña medida disminuyan los efectos. Lo que se pretende entonces a lo largo del documento es presentar una alternativa económica y funcional que contrarreste los efectos negativos impuestos en la red por la inmersión de este tipo de cargas al sistema interconectado, retomando investigaciones anteriores se hará uso de componentes de la electrónica de potencia como tiristores para construir una arquitectura de control basada en los compensadores estáticos de potencia reactiva, partiendo de la compensación de un circuito RC con factor de potencia FP igual a 0.5, para que una vez comprobados los resultados estos puedan trasladarse al sistema de interés, en el que la corriente es función del tipo y forma irregular de la chatarra. Para describir el comportamiento del mismo se distinguen dos operaciones fundamentales, que se realizan típicamente, una de ellas es la fusión de la materia prima y posterior la refinación, que en capítulos posteriores se presentarán mayores detalles de su modelo matemático, el estudio que aquí se realiza basa su estructura principalmente en el comportamiento caótico del horno.

## 1.1 Planteamiento del problema

La idealización de las cargas resulta práctica y en gran medida conveniente para la formación académica y la construcción de conceptos, sin embargo, en las actividades que son llevadas a cabo en los procesos industriales reales y los robustos equipos usados para la manufactura, son en su mayoría no lineales y con múltiples variables asociadas, que dificultan claramente el desarrollo y los procesos de control y regulación, pero que deben ser tenidas en cuenta para su correcta manipulación y con los límites de aceptación en concordancia con las exigencias regulatorias. Es así el caso de las instalaciones de horno de arco eléctrico que en los últimos años se ha logrado posicionar en el mercado metalúrgico teniendo una gran aceptación, por la fabricación de láminas y ligas metálicas de alta calidad usando como materia prima la chatarra [2]. Sin embargo, Su comportamiento caótico e impredecible [3], que es función de las superficies irregulares y de los distintos procesos y corrientes que exige la operación, representan una dificultad en el momento de la regulación de tensión y la corrección del factor de potencia, dificultades que pueden ser resueltas usando dispositivos robustos basados en electrónica de potencia, y aunque sus beneficios son evidentes el costo de estos podría ser tal, que para el mercado no resulten ser atractivos. En línea con estos requisitos lo que se pretende es obtener un sistema de control que mejore razonablemente el factor de potencia y disminuya las perturbaciones en la red, diseñando, desarrollando e incluyendo un mecanismo de compensación económico y efectivo al mismo tiempo.

## 1.2 Justificación

El mejoramiento en la prestación del servicio de energía, garantizando las condiciones de estabilidad, regulación, factores de potencia, y demás características, que enriquecen de cualidades al sistema eléctrico de potencia, son posibles gracias a las tecnologías de control y compensación, por lo tanto, la búsqueda constante de nuevas arquitecturas y dispositivos más eficientes y económicos, justifica la investigación en nuevos prototipos y abordajes para esta problemática, más prácticos y con iguales o mejores resultados que los sistemas robustos y complejos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

Diseñar un sistema de control, para mitigar las fluctuaciones y mejorar el factor de potencia en un sistema de suministro, que alimenta la carga Horno de Arco eléctrico, usando compensadores de potencia reactiva construidos a partir de la detección y abastecimiento de las corrientes

de secuencia negativa y la componente imaginaria de secuencia positiva demandadas por el horno.

### 1.3.2 Específicos

- Comprender el modelo del Horno de arco eléctrico, determinando las variables más ponderativas y de mayor peso en la operación.
- Desarrollar prototipos de compensación usando inductancias, y fuentes de corrientes que eliminen las componentes de secuencia negativa.
- Trasladar los resultados al tiempo y determinar las inyecciones de corriente en función de la demanda exigida por la carga, con el propósito de compensar en tiempo real el SEP.
- Simular el sistema de transmisión y la carga de horno de arco eléctrico con y sin el sistema de control usando Matlab®
- Analizar las mejoras introducidas una vez el sistema de potencia tenga la arquitectura de control.
- Verificar el funcionamiento del sistema de compensación comparando las respuestas del SEP con y sin la arquitectura de control.

## 1.4 Estructura del trabajo de grado

Este proyecto está estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se presenta la descripción y formulación matemática del sistema de carga de horno de arco eléctrico, su moldeamiento y estructura en Matlab® a partir del cual se obtiene las gráficas de mayor interés, tales como la corriente, la tensión y el factor de potencia, se explican además los fenómenos asociados y las características deterministas y caóticas del horno, se plantean los objetivos y se presenta el estado del arte con respecto a la alternativa de compensación, haciendo uso de las componentes simétricas de secuencia. En el capítulo 2 se determina los valores de las susceptancias y los ángulos de disparo usados para el control de los tiristores implementados en los compensadores de potencia reactiva, En el capítulo 3 se diseñó y simuló un prototipo con una carga lineal que sirvió para la evaluación del método de muestreo para hacer la respectiva compensación. En el capítulo 4 se conectó la arquitectura de control en el sistema de transmisión en el que yace el horno de arco eléctrico, lo que se pretendía allí era obtener una mejora considerable en las fluctuaciones de tensión en terminales de lo que será la carga y mejorar notoriamente el factor de potencia además de presentar una

comparativa entre las respuestas del sistema eléctrico de potencia con y sin la arquitectura de compensación. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan los resultados, las gráficas, y conclusiones obtenidas orientadas al cumplimiento de los objetivos.

## 1.5 Estado del arte

### 1.5.1 Modelo del horno de arco eléctrico

El horno de arco eléctrico presente en la figura 1.1 posee varios comportamientos, sin embargo uno de los que destaca y en el cual se presenta la mayor distorsión armónica es la etapa de fusión de la chatarra, etapa donde la corriente exigida por el sistema sufre las mayores variaciones, que debe ser modelada claramente en el tiempo por su comportamiento impredecible y no lineal, algunos modelos se basan en el comportamiento estocástico del sistema, sin embargo como base para este trabajo la metodología a usar para el modelado de horno de arco eléctrico comprende el estudio de la naturaleza caótica del arco producido en su interior.

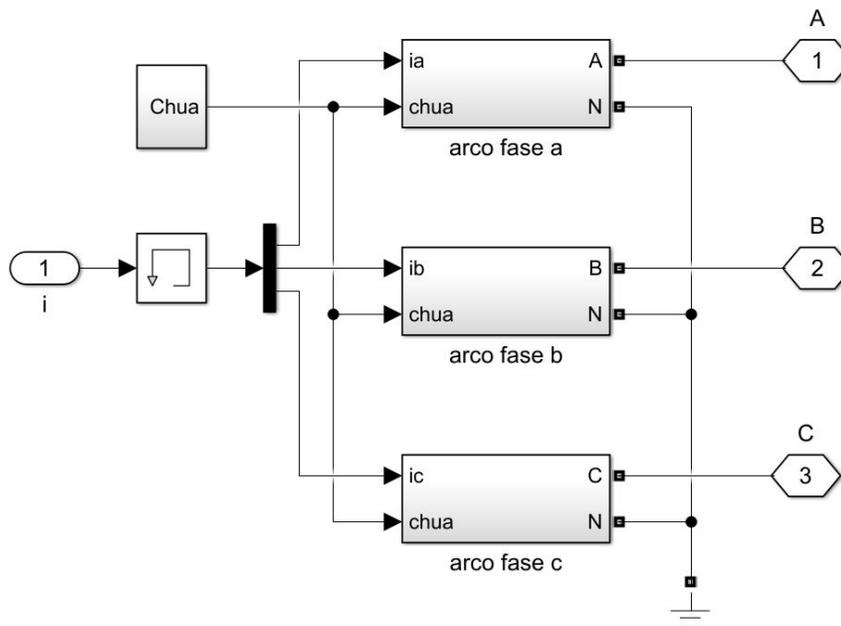


Figure 1.1: Modelo dinámico del horno de arco eléctrico

El modelo de arco eléctrico implementa el oscilador de Chua para así conseguir la característica caótica del arco, que posteriormente éste es implementado para recrear la tensión del arco mediante la modulación, haciendo uso de las expresiones deterministas del horno, que en su

mayoría corresponden a ecuaciones diferenciales, las cuales representan las fluctuaciones de voltaje causadas por el parpadeo [2].

Como se mencionó previamente una de las etapas más relevante para la operación, además de la más problemáticas en el sentido de introducir al sistema la mayor cantidad de perturbaciones es la fusión de la chatarra, debido a la forma irregular de las piezas las variaciones de corriente son considerables y es en esta etapa donde el horno demanda la mayor cantidad de energía activa, por otro lado en la etapa de refinamiento el arco presenta una característica más constante y a pesar de que existen fluctuaciones son en menor medida, a continuación se presentan las dos características fundamentales que describen a groso modo la forma como opera el horno.

- Característica determinista del horno de arco eléctrico

Las ecuaciones para la característica dinámica del sistema pueden obtenerse a partir de la ley de conservación de la energía [4], donde el equilibrio de potencia del arco eléctrico y el voltaje del mismo pueden ser descritos mediante las ecuaciones 1.1 y 1.2 respectivamente [5].

$$K_1 r^n + K_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (1.1)$$

$$V = \frac{i}{g} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (1.2)$$

Las variaciones de  $m$  y  $n$  logran describir los diferentes comportamientos del horno de arco eléctrico sin embargo por motivos de practicidad en el presente trabajo se asumen los valores de  $m$  y  $n$  iguales a cero y dos respectivamente [5], el modelo determinista es implementado mediante el uso de diagrama de bloques funcionales en Simulink® y se presenta adjunto en la figura 1.2, la utilización de bloques integradores, ganancias, multiplicadores y demás, constituyen las ecuaciones (1.1) y (1.2), adicionalmente los parámetros de las ecuaciones, elegidos para este modelo se presentan a continuación;  $m = 0, n = 2, K_1 = 2500, K_2 = 1$  y finalmente  $K_3 = 4$ .

- Característica caótica del horno de arco eléctrico

Como se mencionó anteriormente para lograr el comportamiento caótico del arco se usó el oscilador chua, construido a partir del diodo Chua y un circuito resonante, en la figura 1.3 puede verse la estructura implementada para este trabajo y para el análisis del sistema.

Finalmente el modelo de horno de arco con los electrodos y los ajustes en sus variables, e introducido en un sistema eléctrico de potencia se ve como en la figura 1.4. El sistema completo se constituye con los siguientes parámetros de red, un generador conectado a tierra con un nivel de tensión línea a línea igual a 115 kV con una relación X/R de 9.896, y potencia

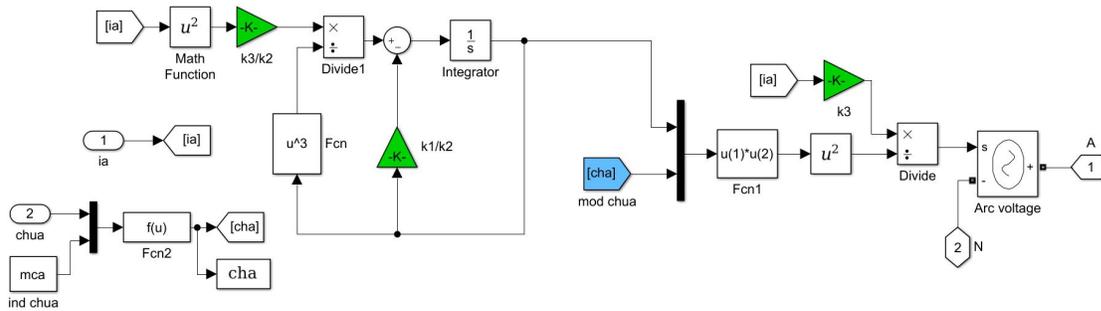


Figure 1.2: Característica determinista del horno de arco eléctrico

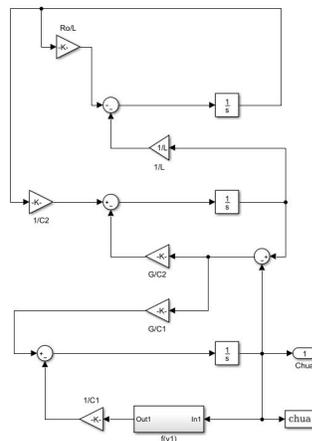


Figure 1.3: Característica caótica del horno de arco eléctrico

aparente de valor  $S=1962.16$  MVA, conectado a través de conductores con impedancia ideal a un transformador trifásico reductor en configuración YnD11 con una potencia nominal de 80 MVA y una relación de tensión igual a 110/20 kV, impedancias de magnetización iguales a 500 para  $R_m$  y  $L_m$  en  $pu$ , en bornes de baja una impedancia es conectada con valor igual a 0.2599 mH que simula los cables de transferencia de los paquetes de potencia hasta el siguiente transformador reductor, con una conexión YnD1, potencia nominal igual a 83 MVA y una relación de tensión igual 20/0.7 kV, impedancia de magnetización igual 500 para  $R_m$  y  $L_m$  en  $pu$ , posteriormente una impedancia RL con una resistencia de valor aproximado de 0.38  $m\Omega$  y una inductancia con valor de 8.58  $\mu\text{H}$  que en conjunto simulan los cables de los electrodos del horno del arco eléctrico y finalmente la carga de conflicto, el horno que en su interior posee las característica caótica previamente mencionada, simulada a partir del circuito de

Chua y la condición determinista alcanzada mediante el uso de diagramas funcionales.

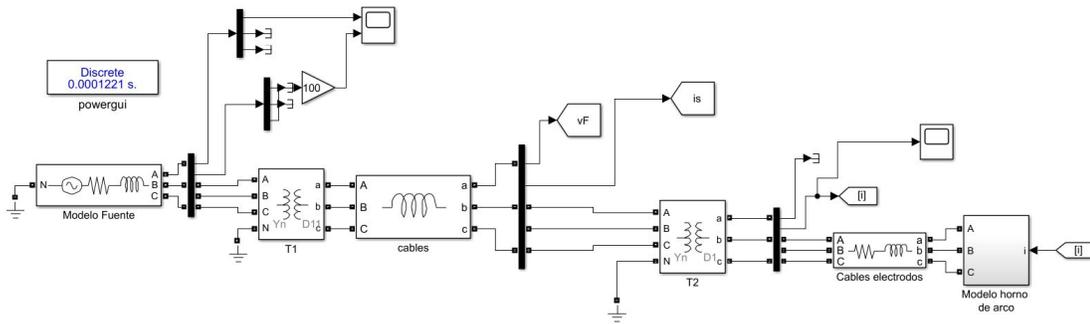


Figure 1.4: Topología del sistema de potencia con carga de horno de arco eléctrico

Del modelo pueden estudiarse los comportamientos de la tensión y corriente, vista desde bornes del transformado T1, las formas de onda se corresponden con los obtenidos en práctica y el modelo es una muy buena representación del horno, si nos basamos en las investigaciones previas [6], las gráficas para las variables previamente mencionadas se presentan adjuntas en las figuras 1.5, para este trabajo en particular se asume la carga como la combinación entre el horno de arco eléctrico, los cables electrodos y el transformador reductor T2.

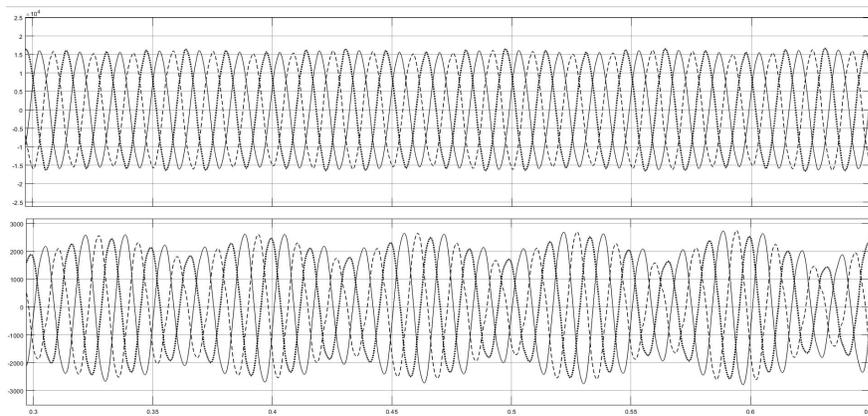


Figure 1.5: Formas de onda de la corriente y la tensión sin compensación vista desde T1

Las gráficas para una de las fases que nos relaciona el factor de potencia se presenta adjunta en la figura 1.6 en la que es posible apreciar una factor de potencia diferente de uno y adicional que este tiene una naturaleza predominantemente inductiva situación que resulta inconveniente temporalmente, pero que en el capítulo tres tendrá un manejo adecuado con

la inclusión de filtros capacitivos. La principal limitante y la razón por la que resulta problemático que la carga presente una naturaleza inductiva radica en la coincidencia con la compensación, puesto que ésta también posee una naturaleza similar, en los capítulos posteriores se explicará con mayor detalle.

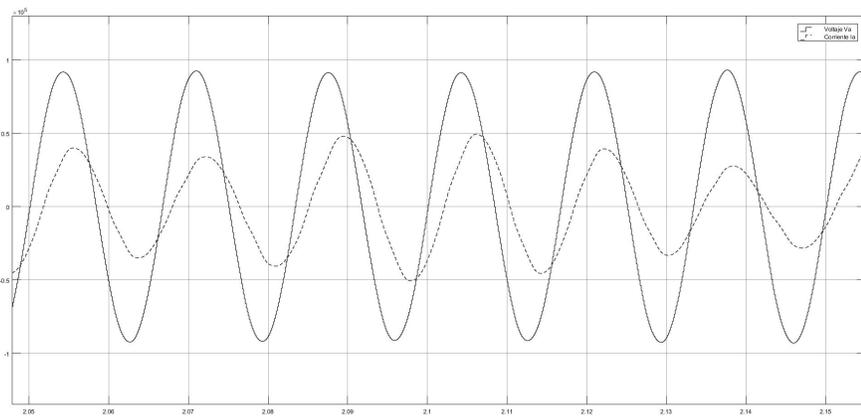


Figure 1.6: Factor de potencia en terminales del transformador T1

Del modelo se puede extraer información relacionada con el nivel de fluctuación de la tensión, se puede apreciar en la figura 1.7 que los picos de tensión para la fase *a* tienen ligeras variaciones, objeto de la demanda irregular de la carga, que repercute posteriormente en la regulación en terminales del transformador reductor T1, con el diseño del compensador también se pretende mejorar esta situación y reducir las variaciones en la tensión.

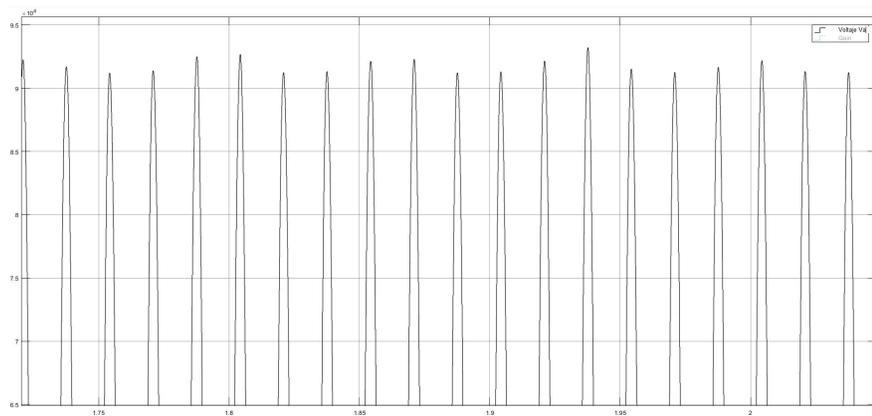


Figure 1.7: Fluctuaciones de la tensión

### 1.5.2 Método de compensación de horno de arco eléctrico usando componentes simétricos

La metodología implementada para la construcción del compensador justifica su principio haciendo uso de las componentes simétricas de corriente, para ello fue necesario establecer el valor de las corrientes de secuencia y posteriormente desarrollar el algoritmo de compensación, temporalmente y para presentar los pasos para la obtención de los parámetros del sistema de control, Partimos de los valores de las tensiones de fase que pueden ser descritas de la siguiente manera:

$$V_a = V; V_b = h^2V; V_c = hV \quad (1.3)$$

Donde  $h$  representa el desfase angular entre los vectores de tensión, cuyo valor puede ser descrito en forma polar o exponencial y en coordenadas rectangulares:

$$h = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.4)$$

Los voltajes de línea pueden ser construidos a partir de la diferencia entre los voltajes de fase, por lo tanto:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = (1 - h^2)V \\ V_{bc} &= V_b - V_c = (h^2 - h)V \\ V_{ca} &= V_c - V_a = (h - 1)V \end{aligned} \quad (1.5)$$

Si se supone una carga en conexión delta como se ilustra en la figura 1.8.

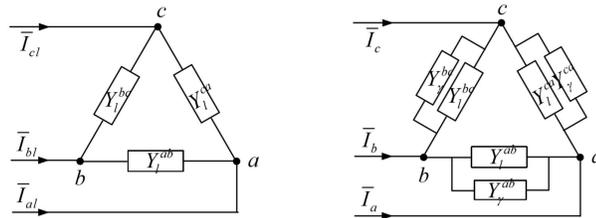


Figure 1.8: Carga conectada en Delta con sus admitancias

Las corrientes que experimenta el sistema en función de los voltajes y los parámetros de admittancia serán:

$$\begin{aligned} I_{ab} &= Y_l^{ab}V_{ab} = Y_l^{ab}(1 - h^2)V; \\ I_{bc} &= Y_l^{bc}V_{bc} = Y_l^{bc}(h^2 - h)V; \\ I_{ca} &= Y_l^{ca}V_{ca} = Y_l^{ca}(h - 1)V \end{aligned} \quad (1.6)$$

Así como las tensiones, las corrientes de línea pueden ser construidas a partir de la diferencia entre las corrientes de fase, finalmente éstas en términos de las magnitudes de la tensión y la admitancia se escriben de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca} = [Y_l^{ab}(1 - h^2) - Y_l^{ca}(h - 1)]V \\ I_b &= I_{bc} - I_{ab} = [Y_l^{bc}(h^2 - h) - Y_l^{ab}(1 - h^2)]V \\ I_c &= I_{ca} - I_{bc} = [Y_l^{ca}(h - 1) - Y_l^{bc}(h^2 - h)]V \end{aligned} \quad (1.7)$$

Dado que las corrientes de carga son desbalanceadas por la condición misma del horno presente en el circuito, estas presentan componentes de secuencia tanto negativas como positivas, sin embargo, no sucede lo mismo con la componente de secuencia cero puesto que se supone un sistema trifásico tetrafilar y por consiguiente la corriente es nula:

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{(I_a + I_b + I_c)}{\sqrt{3}} \\ I_1 &= \frac{(I_a + hI_b + h^2I_c)}{\sqrt{3}} \\ I_2 &= \frac{(I_a + h^2I_b + hI_c)}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Donde los fasores, representan las corrientes de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente, una vez reemplazadas las corrientes de fase en las de secuencia los valores para éstas son.

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{(I_a + I_b + I_c)}{\sqrt{3}} \\ I_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}}([Y_l^{ab}(1 - h^2) - Y_l^{ca}(h - 1)]V + \\ & [Y_l^{bc}(h^2 - h) - Y_l^{ab}(1 - h^2)]V + [Y_l^{ca}(h - 1) - Y_l^{bc}(h^2 - h)]V) \\ I_0 &= 0 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Ahora para la corriente de secuencia positiva la expresión es, una vez simplificado los términos:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{(I_a + hI_b + h^2I_c)}{\sqrt{3}} \\ I_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}}([Y_l^{ab}(1 - h^2) - Y_l^{ca}(h - 1)]V + h[Y_l^{bc}(h^2 - h) - \\ & Y_l^{ab}(1 - h^2)]V + h^2[Y_l^{ca}(h - 1) - Y_l^{bc}(h^2 - h)]V) \\ I_1 &= (Y_l^{ab} + Y_l^{bc} + Y_l^{ca})V\sqrt{3} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Del mismo modo para corriente de secuencia negativa se tiene tras la simplificación:

$$I_2 = \frac{(I_a + h^2 I_b + h I_c)}{\sqrt{3}}$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}([Y_l^{ab}(1 - h^2) - Y_l^{ca}(h - 1)]V + h^2[Y_l^{bc}(h^2 - h) - Y_l^{ab}(1 - h^2)]V + h[Y_l^{ca}(h - 1) - Y_l^{bc}(h^2 - h)]V)$$

$$I_2 = -(h^2 Y_l^{ab} + Y_l^{bc} + h Y_l^{ca})\sqrt{3}V$$
(1.11)

De lo anterior se puede concluir que las corrientes de secuencia en términos de las corrientes de fase de la carga son:

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = (Y_l^{ab} + Y_l^{bc} + Y_l^{ca})V\sqrt{3}$$

$$I_2 = -(h^2 Y_l^{ab} + Y_l^{bc} + h Y_l^{ca})\sqrt{3}V$$
(1.12)

Cuando se hace uso del compensador se añaden tres ramas en delta en paralelo a la carga, es así entonces que el sistema de compensación puede ser descrito de igual forma que las corrientes de secuencia, en términos de las nuevas admitancias de compensación.

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = (Y_y^{ab} + Y_y^{bc} + Y_y^{ca})V\sqrt{3}$$

$$I_2 = -(h^2 Y_y^{ab} + Y_y^{bc} + h Y_y^{ca})\sqrt{3}V$$
(1.13)

Sin embargo las corrientes compensatorias son puramente reactivas por lo tanto los valores de admitancia satisfacen la siguiente expresión.

$$Y_y^{ab} = G_y^{ab} + jB_y^{ab} = jB_y^{ab}$$

$$Y_y^{bc} = G_y^{bc} + jB_y^{bc} = jB_y^{bc}$$

$$Y_y^{ca} = G_y^{ca} + jB_y^{ca} = jB_y^{ca}$$
(1.14)

Reemplazando las admitancias en los valores de corriente se tiene que:

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = j(B_y^{ab} + B_y^{bc} + B_y^{ca})V\sqrt{3}$$

$$I_2 = -j(h^2 B_y^{ab} + B_y^{bc} + h B_y^{ca})\sqrt{3}V$$
(1.15)

Para calcular los valores de las susceptancias de compensación se establecen los objetivos tras la nueva inclusión del compensador, y esos deben ser:

- La corriente de secuencia negativa debe ser suministrada por completo a través del compensador, es decir, tanto la parte real como la componente imaginaria de la misma:

$$I_{2l} = -I_{2y} \quad (1.16)$$

Lo anterior implica que:

$$Re(I_{2l}) + Im(I_{2l}) = -Re(I_{2y}) - jIm(I_{2y}) \quad (1.17)$$

- En segunda medida el otro objetivo que atiende el compensador establece que la componente imaginaria de la secuencia positiva de la carga debe ser suministrada por completo a través del sistema de compensación, esto quiere decir:

$$Im(I_{1l}) = -Im(I_{1y}) \quad (1.18)$$

Establecidos los objetivos que debe satisfacer el sistema de compensación queda por obtener mediante la simplificación, las variables de interés, las cuales recaen a la búsqueda de las susceptancias que deben ser conectadas para obtener la compensación del sistema eléctrico de potencia para ello, sustituimos en (1.16) y en (1.18) las expresiones de (1.15)

$$-j(h^2 B_y^{ab} + B_y^{bc} + h B_y^{ca})\sqrt{3}V = -Re(I_{2l}) - jIm(I_{2l}) \quad (1.19)$$

$$Im(j(B_y^{ab} + B_y^{bc} + B_y^{ca})\sqrt{3}V) = -Im(I_{1l}) \quad (1.20)$$

Para la expresión (1.20) es fácil evidenciar que la componente imaginaria de  $I$  corresponde a toda la expresión que yace en su interior puesto que las susceptancias son escalares y las mismas están multiplicadas por el factor  $j$ , sin embargo lo mismo no sucede con la expresión (1.19) que en cuyo caso por el valor de  $h$  complejo es posible distinguir parte real e imaginaria de la ecuación, así entonces obtenemos separando la parte real e imaginaria de (1.19) tres expresiones con las susceptancias del compensador como variables, permitiendo así la construcción de un sistema de ecuaciones con tres variables.

$$\begin{aligned} Im(j(B_y^{ab} + B_y^{bc} + B_y^{ca})\sqrt{3}V) &= -Im(I_{1l}) \\ ((\frac{1}{2})B_y^{ab} - B_y^{bc} + \frac{1}{2}B_y^{ca})\sqrt{3}V &= -Im(I_{2l}) \\ (-\frac{\sqrt{3}}{2}B_y^{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_y^{ca})\sqrt{3}V &= Re(I_{2l}) \end{aligned} \quad (1.21)$$

Del sistema de ecuaciones es fácil obtener las tres variables, mediante la resolución matricial los valores de las susceptancias en términos de las corrientes de secuencia, para ello no hace

falta más que realizar la transformada inversa de los términos de la izquierda y realizar el producto entre este primer resultado y el vector columna de la derecha que contiene las corriente imaginarias y reales de secuencia de la carga, así entonces los valores de susceptancias en términos de las corrientes de secuencia son:

$$\begin{aligned}
 B_y^{ab} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [Im(I_{1l}) + Im(I_{2l}) - \sqrt{3}Re(I_{2l})] \\
 B_y^{bc} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [Im(I_{1l}) - 2Im(I_{2l})] \\
 B_y^{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [Im(I_{1l}) + 2Im(I_{2l}) + \sqrt{3}Re(I_{2l})]
 \end{aligned} \tag{1.22}$$

Sin embargo nuestro interés no se reduce al cálculo de las susceptancias en términos de las componentes de secuencia, es necesario entonces retornar a las variables de ABC, recordemos que las corrientes  $I_{0l}$ ,  $I_{1l}$  y  $I_{2l}$  pueden ser expresadas en términos de las corrientes  $I_{al}$ ,  $I_{bl}$  y  $I_{cl}$  de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \frac{(I_a + I_b + I_c)}{\sqrt{3}} \\
 I_1 &= \frac{(I_a + hI_b + h^2I_c)}{\sqrt{3}} \\
 I_2 &= \frac{(I_a + h^2I_b + hI_c)}{\sqrt{3}}
 \end{aligned} \tag{1.23}$$

Basta con sustituir y realizar una reducción algebraica para simplificar los términos y así lograr expresar las susceptancias de las correspondientes fases en términos de las corrientes ABC [7], que son finalmente, a las que tenemos acceso físicamente y que podemos tomar en todos los instantes de tiempo, se puede demostrar con facilidad que los valores resultantes tras la simplificación son:

$$\begin{aligned}
 B_y^{ab} &= -\frac{1}{3V} [Im(I_{al}) + Im(I_{bl}) - Im(I_{cl})] \\
 B_y^{bc} &= -\frac{1}{3V} [-Im(I_{al}) + Im(I_{bl}) + Im(I_{cl})] \\
 B_y^{ca} &= -\frac{1}{3V} [Im(I_{al}) - Im(I_{bl}) + Im(I_{cl})]
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

## 1.6 Resultados parciales

Los principales resultados de este capítulo están relacionados con la determinación de los valores de susceptancia calculados en 1.22 los cuales están directamente relacionados con

los valores de corriente experimentados por la carga en términos de las componentes de secuencia negativa y positiva, que servirán de base para calcular las inyecciones de corriente, necesarias para mitigar las fluctuaciones y mejorar el factor de potencia del horno de arco eléctrico, sin embargo puede de las mismas detallarse la complejidad para captar los valores, es preciso entonces trasladar estos resultados al tiempo y de alguna manera valerse para obtener regularmente la actualización de los valores de susceptancias que el compensador debe aportar para lograr la mitigación de los conflictivos factores de potencia bajos.

## Capítulo 2

# Compensación mediante el uso de componentes simétricas, método discreto

Del capítulo previo son extraídas las ecuaciones de las susceptancias que deben ser conectadas para hacer la respectiva compensación, sin embargo estas ecuaciones son claramente funciones continuas que por su estructura dependen del valor propio de la corriente en cada instante de tiempo, situación que complica la obtención de los parámetros, por lo tanto una manera práctica y funcional de obtener los valores de las susceptancias es a partir del muestreo de las señales obtenidas, de manera tal que estas se actualicen una vez se cumpla o se repita, en un periodo un mismo comportamiento, es decir, la corriente fasorial de la carga en la fase  $a$  puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I_{al} &= Re(I_{al}) + jIm(I_{al}) \\ I_{al} &= I_{al,R} + jI_{al,x} \end{aligned} \quad (2.1)$$

La corriente de fase en función del tiempo puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I_{al}(t) &= \sqrt{2}Im(I_{al}e^{jwt}) \\ I_{al}(t) &= \sqrt{2}Im((I_{al,R} + jI_{al,x})e^{jwt}) \\ I_{al}(t) &= \sqrt{2}Im((I_{al,R} + jI_{al,x})\cos(wt) + jsin(wt)) \\ I_{al}(t) &= (I_{al,R}\sin(wt) + I_{al,x}\cos(wt)) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Cuando  $wt = 0$  la corriente en el tiempo toma el siguiente valor una vez evaluados en el seno y el coseno respectivamente.

$$I_{al}(t) = \sqrt{2}I_{al,x} \sin(wt) = 0 \text{ y } \cos(wt) = 1 \quad (2.3)$$

Ahora bien los voltajes de fase en el tiempo también pueden reescribirse en términos de la frecuencia y los ángulos de fase de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} V_a &= \sqrt{2}V \sin(\omega t) \\ V_b &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120) \\ V_c &= \sqrt{2}V \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (2.4)$$

De la expresión anterior puede demostrarse que cuando la corriente asume el valor de la ecuación 2.3 el voltaje en la fase correspondiente, es igual a cero.

$$V_a = \sqrt{2}V \sin(0) = 0 \quad (2.5)$$

Además también es posible concluir que la derivada en este mismo punto para cualquier voltaje de fase asociado a su respectiva corriente se comporta de la misma manera, creciente positiva para los valores de  $\omega t = 0$

$$\frac{dV_a}{dt} = \sqrt{2}\omega V \cos(0) = \sqrt{2}\omega V \quad (2.6)$$

## 2.1 Descripción de las susceptancias a partir del muestreo de voltaje

Por consiguiente, los valores de las susceptancias pueden reescribirse en términos de la corriente obtenida en ese punto para cuando la tensión en cada una de las fases sea igual a cero y su derivada sea positiva creciente [8], finalmente las ecuaciones reescritas en función de estas nuevas condiciones serán:

$$\begin{aligned} B_y^{ab} &= -\frac{1}{3\sqrt{2}V} [(i_a)_{V_a=0, \frac{dV_a}{dt}>0} + (i_b)_{V_b=0, \frac{dV_b}{dt}>0} - (i_c)_{V_c=0, \frac{dV_c}{dt}>0}] \\ B_y^{bc} &= -\frac{1}{3\sqrt{2}V} [-(i_a)_{V_a=0, \frac{dV_a}{dt}>0} + (i_b)_{V_b=0, \frac{dV_b}{dt}>0} + (i_c)_{V_c=0, \frac{dV_c}{dt}>0}] \\ B_y^{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{2}V} [(i_a)_{V_a=0, \frac{dV_a}{dt}>0} - (i_b)_{V_b=0, \frac{dV_b}{dt}>0} + (i_c)_{V_c=0, \frac{dV_c}{dt}>0}] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Con la anterior ecuación se construyó la topología de control que nos permitió captar los valores de la corriente que satisfacen las condiciones de las respectivas tensiones y sus derivadas, para ello se hizo uso de diagramas de bloque funcionales que registraban y verificaban constantemente los valores de tensión, la figura 2.1 muestra la arquitectura usada. De la figura 2.1 también puede apreciarse que uno de los bloques implementados corresponde a la función

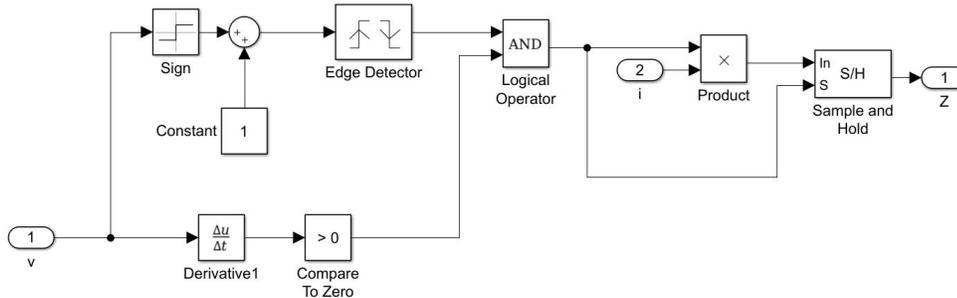


Figure 2.1: Diagrama de bloques funcionales para el muestreo de la corriente

sample and hold esto, para garantizar la continuidad de la forma de onda adoptadas por el valor instantáneo de la corriente, es decir, una vez que se detecta el paso por cero del voltaje y la derivada se verifica positiva la corriente se deja pasar en magnitud y este valor es guardado hasta que un nuevo valor sea adquirido, de no ser por este bloque, las susceptancias estarían presentes un tiempo mínimo y la compensación no sería realizada y las formas de onda se verían tal y como se presentan en la figura 2.2:

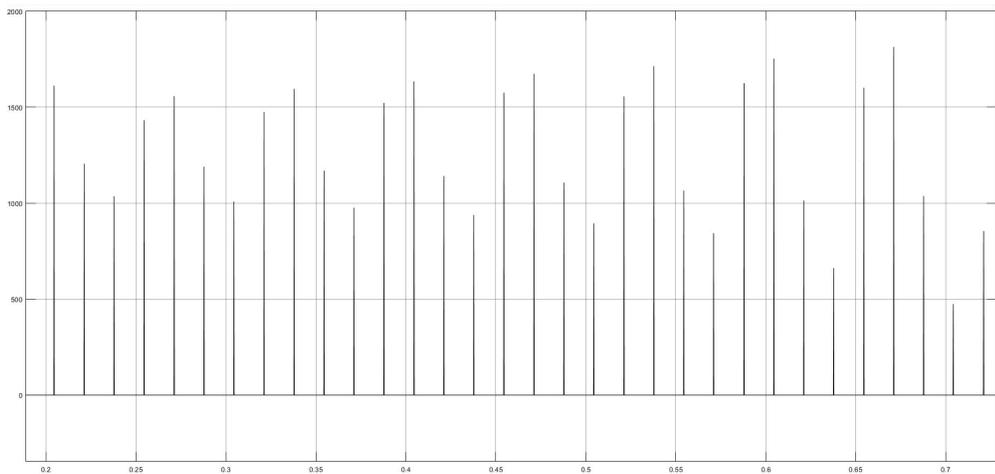


Figure 2.2: Susceptancias sin el bloque sample and hold

Cabe resaltar que este mismo procedimiento se realizó para todos los valores de tensión y de corriente y que posteriormente para conseguir el valor de la susceptancia se sumaron los resultados, valor que posteriormente fue procesado y recalculado para determinar el ángulo de disparo que sincronizaba adecuadamente los tiristores y por consiguiente la inyección de

corriente del compensador. El valor de la corriente que alimenta el sistema de control es extraído de terminales del transformador reductor mediante el uso de transformadas  $0dq$ , de allí solo es requerido el valor instantáneo de la magnitud de la componente fundamental de cada una de las corrientes de línea, el esquema usado para la obtención de estas corrientes se presenta en la figura 2.3, en la imagen puede apreciarse bloques como transformadas  $dq0$ , filtros de segundo orden, que entregan en terminales las corrientes fundamentales libres de armónicos para posteriormente extraer de las mismas los valores de la magnitud.

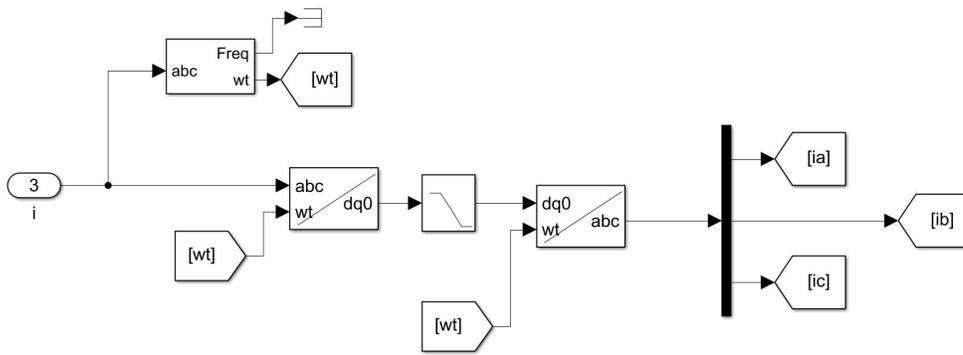


Figure 2.3: Extracción de las corrientes fundamentales, para el calculo de la magnitud

Finalmente la multiplicación y suma entre las corrientes tal y como se ejemplifica en la ecuación (2.7) da como resultado, gracias al bloque sample and hold una función continua no periódica y con valores muy diversos uno con respecto a otro, puesto que su función depende de la demanda de corriente del horno, la curva descrita por los diferentes valores de susceptancias es como se presenta adjunta en la figura 2.4

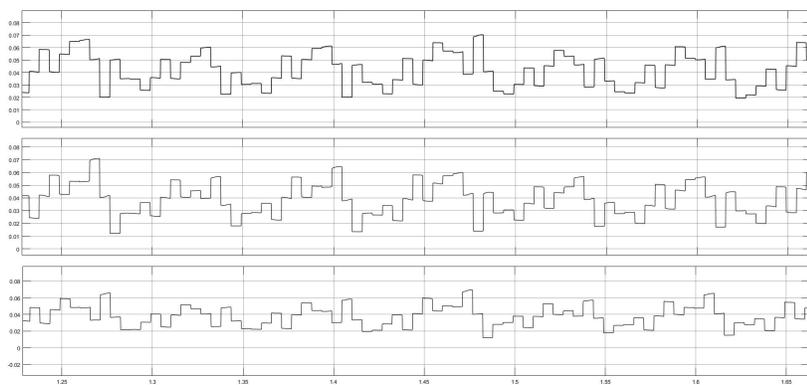


Figure 2.4: Descripción gráfica de los valores de susceptancia

## 2.2 Cálculo del ángulo de disparo para SVC

Calculados los valores de susceptancias es posible a partir de estos obtener el valor del ángulo de disparo  $\varphi$  que controla los tiristores que conforman el control svc, para esto se implementó la ecuación 2.8 propuesta en [2] la cual establece una relación entre el ángulo de disparo y el valor previamente calculado de las secestancias.

$$B(\varphi)_{pu} = \frac{\sin(2\varphi) + 2(\pi - \varphi)}{\pi} \quad (2.8)$$

Para la solución de la ecuación que relaciona la suceptancia con el ángulo de disparo de los tiristores, se realizó una aproximación lineal mediante el método de Newton-Raphson con el fin de simplificar el cálculo, la figura 2.5 constituye el algoritmo diseñado y usado para este propósito, en cual pueden detallarse los siguientes componentes, la alimentación para este algoritmo como bien se sabe, son los valores de las suceptancias que se consiguen con la suma de los diferentes  $Z_s$ , posteriormente estos son afectados por un factor de uno sobre  $V$  que corresponde al valor de la magnitud del voltaje de fase, seguidamente se multiplican por un factor y se introducen a un bloque que contiene el método de Newton-Raphson, y la solución para la expresión es la salida de la del lado derecho del bloque, que entrega precisamente el valor del angulo de interés, asociado a ese valor concreto de susceptancia en un tiempo específico  $t_k$ .

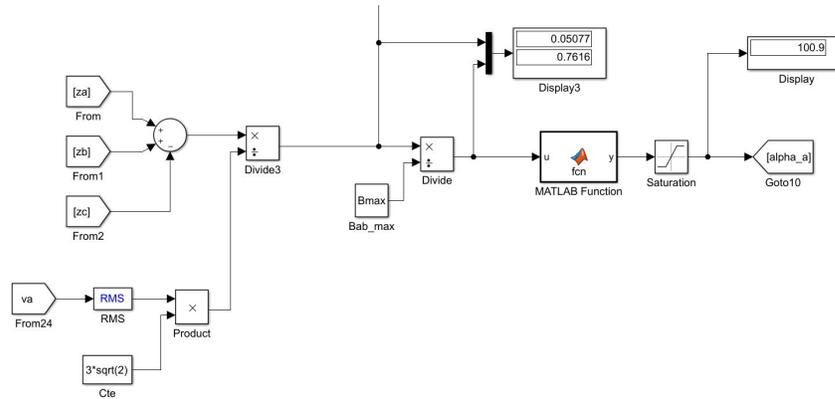


Figure 2.5: Obtención del ángulo de disparo

Los valores de  $Z_a$ ,  $Z_b$  y  $Z_c$  son los resultados de la suma entre las distintas corrientes captadas, afectadas por un factor de escala, presente en la ecuación 2.7, y el modelo matemático presente en el interior del bloque "MATLAB Function" se puede ver en la figura2.6. Calculado los valores del ángulo de disparo, resta entonces por construir el sistema de control basado en el principio de SVC, un conjunto anti paralelo de tiristores conectados a la red a través

```

Editor - Block: compensacion_HAE/alpha's/MATLAB Function1
alpha's/MATLAB Function1 x +
1 function y = fcn(u)
2   cte=pi*(2-u);
3   x=zeros(7,1);
4   x(1)=0.7*pi;
5   for k=1:6
6     x(k+1)=x(k) - (sin(2*x(k))-2*x(k)+cte)/(2*cos(2*x(k))-2);
7   end
8   y=x(5)*(180/pi);
9   end
10

```

Figure 2.6: Modelo matemático para determinar el valor del ángulo de disparo

de inductancias con el valor previamente calculado, explícitamente encontrado con el valor de las susceptancias. Si observamos el factor de potencia, calculado en capítulos anteriores, es evidente que la corriente atrasa el voltaje, por lo que es requerido, dada la naturaleza inductiva del compensador, adelantar este factor de potencia mediante el uso de capacitancias que en este modelo son usadas como filtros, el valor sugerido en [2], está lejos de ser el adecuado para nuestro modelo, por el contrario a manera de tanteo hemos desplazado lo suficientemente el factor de potencia, en adelante para que el compensador pueda realizar su tarea, el valor del banco trifásico de capacitancias escogido fue de  $Q= 100\text{MVAR}$ , es importante resaltar, además que esta situación es evidente en el modelo, es que el banco de capacitores es también una combinación serie entre su valor propio y una resistencia para evitar un corto pleno prevenido por Matlab. El filtro es conectado en alta del transformador T2, la figura figura 2.7 presenta la topología con la inclusión de este nuevo arteificio. La

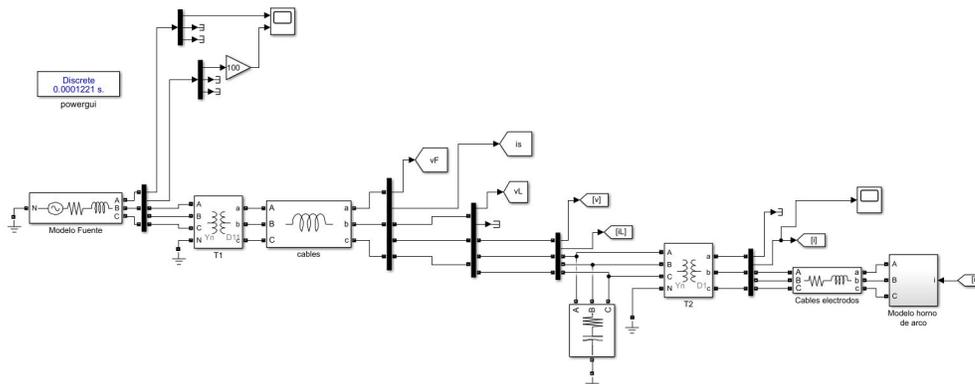


Figure 2.7: Sistema de potencia con la inclusión del banco de capacitores

gráfica relevante de este procedimiento se relaciona con el el factor de potencia obtenido

una vez la naturaleza de la carga se modifica de inductiva a capacitiva tras la inclusión del filtro, esta gráfica puede apreciarse en la figura 2.8 Con las condiciones y los valores en la

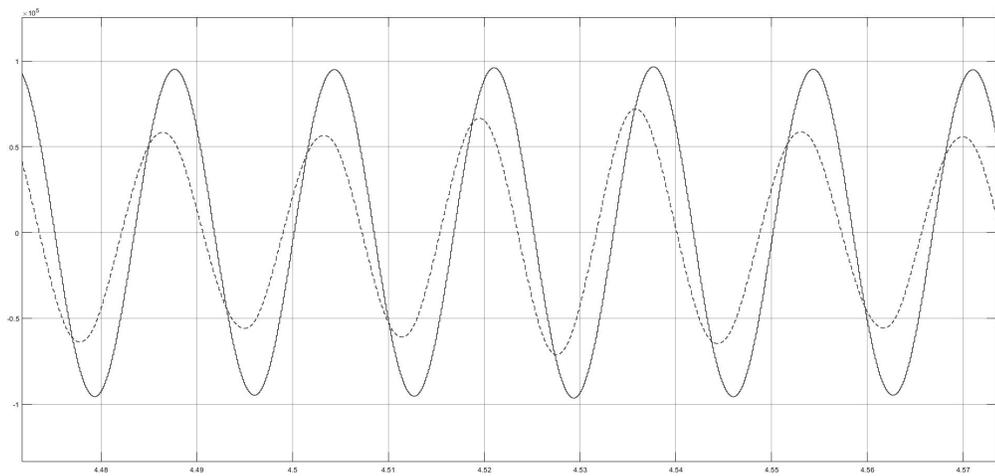


Figure 2.8: Factor de potencia, incluido el banco de capacitancias

ubicación deseada es posible implementar el compensador pero para ello se precisa de un modelo sencillo con carga capacitiva RC, que se estudiara en el capítulo posterior, para dar por finalizado este capítulo se adiciona en sistema SVC y se alimenta con los ángulos de disparo, así entonces el resultado final gráficamente para esta configuración se presenta a continuación:

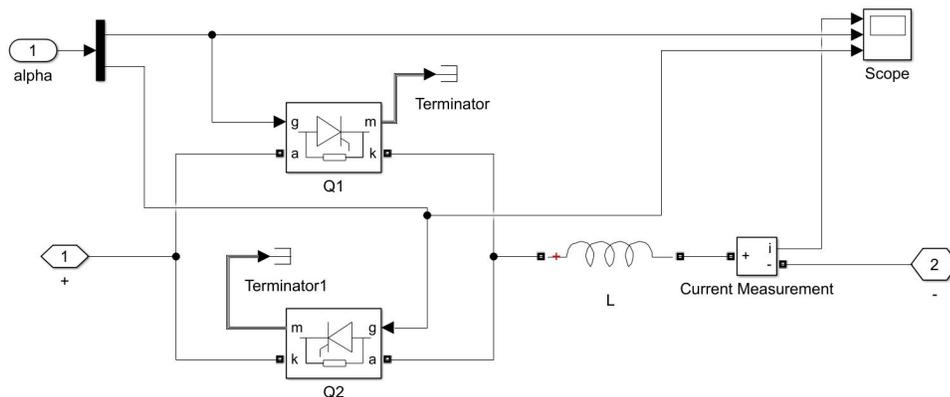


Figure 2.9: Configuración del SVC

Las gráficas que entrega el control del tensión del SVC y los pulsos proporcionado en los

tiristores que corresponden a los ángulos previamente calculados también son de importancia, dado que nos proporcionan información sobre el buen funcionamiento del disparador, y una buena sincronización entre el circuito de pulsos y la señal de tensión, además de que claramente hay una intervención por la forma de onda adoptada por el voltaje.

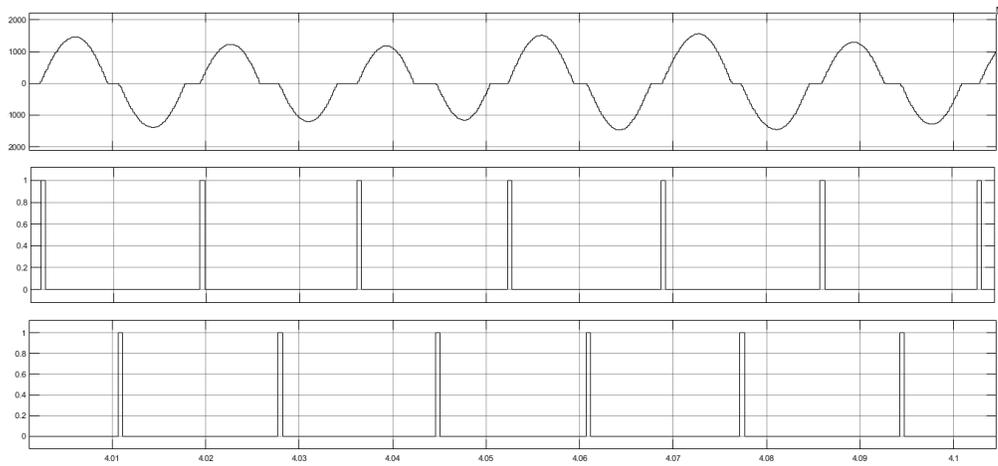


Figure 2.10: Control ejercido por los tiristores

## Capítulo 3

# Simulación del compensador en carga piloto RC

Arquitectura de control implementada, para la compensación de carga piloto lineal, Previo al desarrollo y ensamble del sistema de compensación en el modelo de horno de arco eléctrico, se realizó el montaje de un circuito radial compuesto de una fuente ideal de tensión y una carga RC que fue denominado circuito piloto, es de vital importancia que la carga presente una naturaleza capacitiva, puesto que para el sistema de compensación resulta más conveniente conectar compensación inductiva, condición que no se cumplía en el horno de arco eléctrico pero que como vimos, ya fue resulta mediante la incorporación de un filtro capacitivo, el circuito piloto usado se puede apreciar en la figura 3.1.

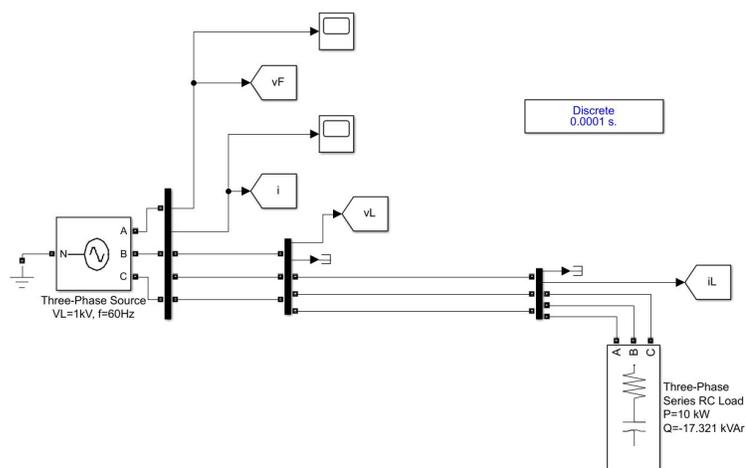


Figure 3.1: Carga piloto

### 3.1 Parámetros y consideraciones del circuito piloto

Para construir el circuito piloto se usó una resistencia igual a  $R=50.000$  ohm y una capacitancia de valor igual a  $C=250$  pF para así conseguir ubicar el factor de potencia en 0.5, claramente en adelanto. Las gráficas de tensión y de corriente presentes en la topología tienen el comportamiento que se presenta en la figura 3.2.

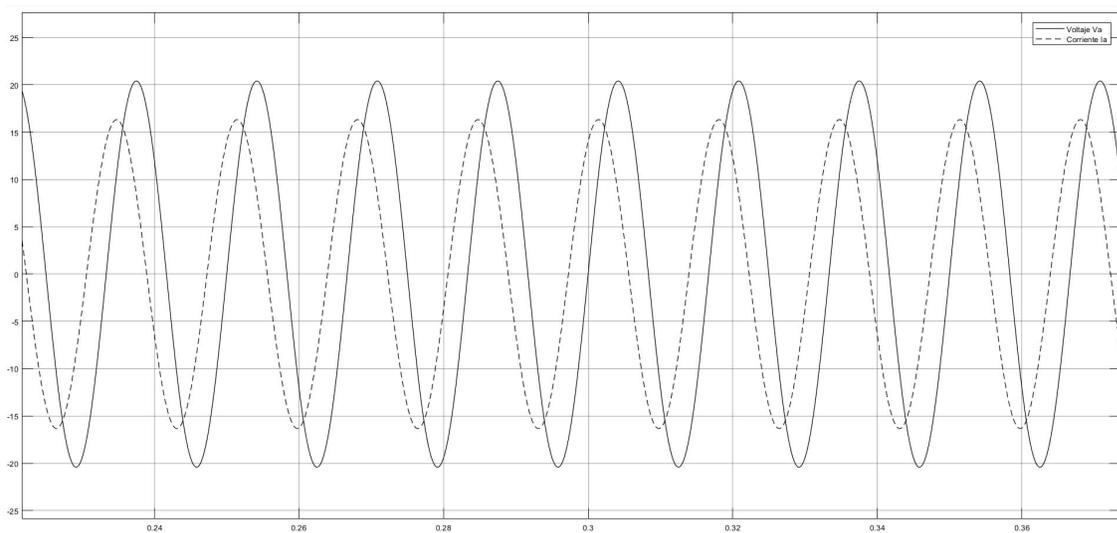


Figure 3.2: Factor de potencia en carga piloto RC

### 3.2 Corrección del factor de potencia

Una vez conectado el compensador y establecidos los máximos límites de potencia reactiva consumida, se reanuda la simulación y se consigue presenciar un factor de potencia muy próximo al deseado, en la figura 3.3 adjuntamos la estructura del sistema de potencia con la carga RC, y el sistema de compensación.

Y a continuación la gráfica del nuevo factor de potencia, en los cuales se refleja la correcta corrección y nos permite inferir que el compensador posee las características y los ajustes pertinentes para poder ser conectado en la carga de mayor interés y por supuesto conflicto, el horno de arco eléctrico.

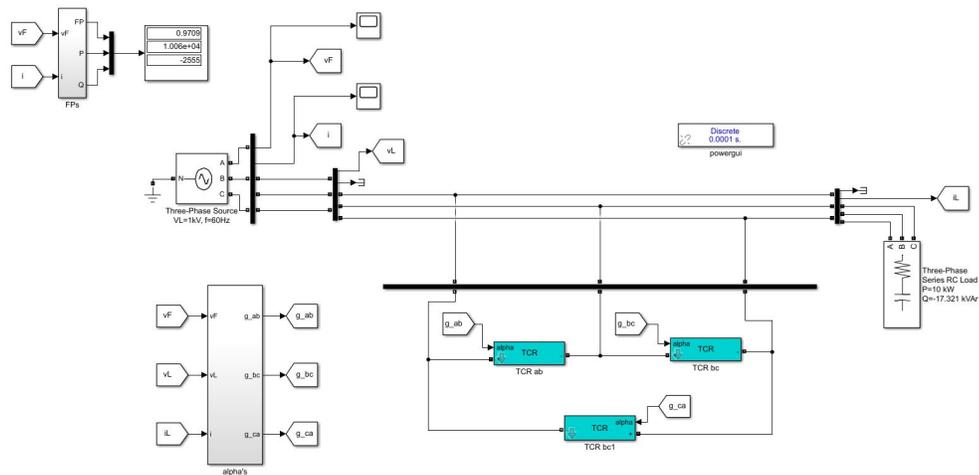


Figure 3.3: SEP con carga RC y compensador SVC

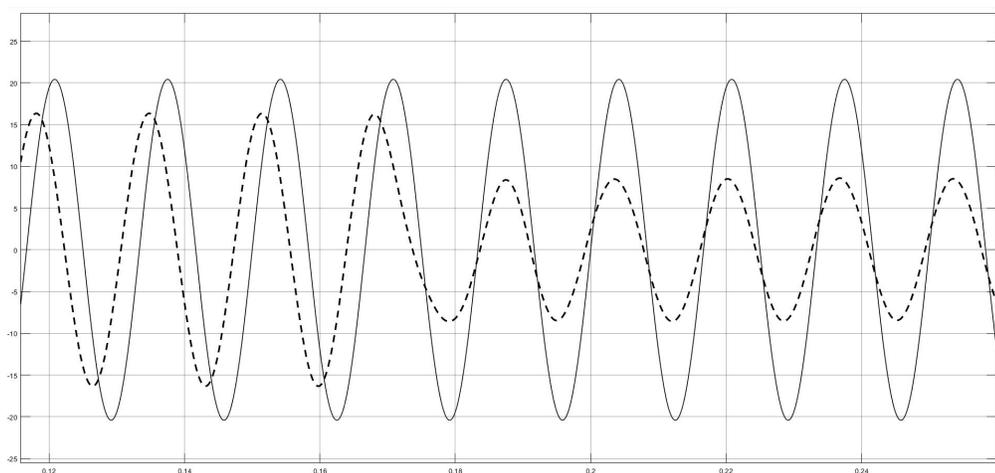


Figure 3.4: Factor de potencia máximo alcanzado





De la gráfica de corriente podemos ver, con relación a las obtenidas en el capítulo 1 una considerable reducción en la magnitud una vez aparece la compensación, además de que estas también han cambiado considerablemente su forma de onda, siendo esta más regular y constante en los picos alcanzados, la figura 4.2 muestra este resultado.

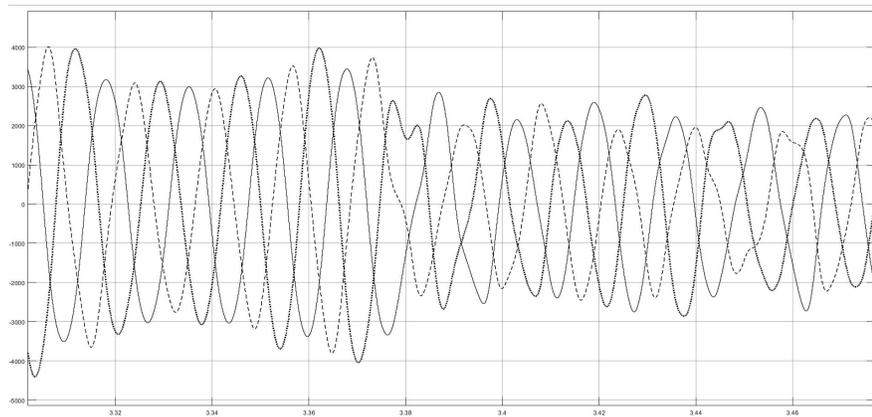


Figure 4.2: Corrientes Durante la fase de simulación, con compensador SVC

En cuanto a los voltajes los resultados son similares, aunque poco perceptibles puesto que en un principio las fluctuaciones son ligeras, es posible ver que mejoran con respecto a las primeras aproximaciones.

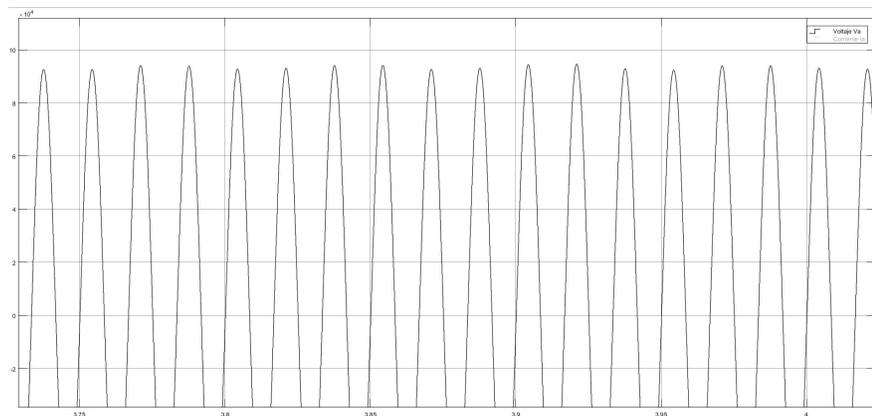


Figure 4.3: Fluctuaciones para la tensión con compensación

La potencia activa y reactiva entregada por el generador durante toda la simulación puede apreciarse gráficamente en la figura 4.4, es posible apreciar el comportamiento antes de la conmutación del compensador, justo en el momento en que éste entra a la red, y tiempo

después de su operación, y claramente se evidencia una disminución en la entrega de potencia activa y reactiva que está directamente relacionada con la subsanada por el compensador.

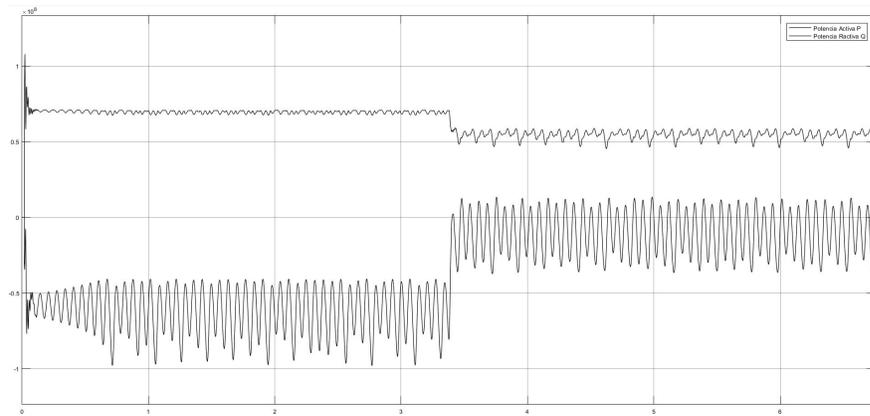


Figure 4.4: Gráficas de P y Q durante todo el tiempo de simulación

Para finalizar y como mayor punto de interés se verifica la mejora en el factor de potencia, permitiéndonos concluir que la aparición del compensador en el tiempo 3.3750s actúa correctamente, entregando a la carga la demanda de corrientes que empobrecen el factor de potencia, visto desde el generador, las cuales están relacionadas con las componentes de secuencia negativa y la parte imaginaria de la componente positiva, permitiendo que en terminales del generador parezca que hay conectado una carga puramente resistiva, es evidente también que aunque puede apreciarse ligeros desfases estos pueden asociarse a la velocidad de respuesta del sistema que como sus tarea principal radica en la medición constante de los parámetros, puede tardar un poco mas de lo esperado y entregar con un pequeño desfase de tiempo el valor de la corriente que la carga demanda.

## 4.1 Comparación entre el modelo sin compensación y el modelo con la arquitectura de control

En esta sección se revisan las principales características y diferencias que presenta en sistema eléctrico de potencia frente a la carga cuando esta es compensada por el sistema de control y cuando esta no tiene ningún tipo de compensación, para ello construimos una tabla comparativa donde se ejemplifica mediante imágenes los resultados obtenidos en los dos procesos de Simulación.

Claramente las mejoras introducidas por el sistema de compensación ratifican al compensador

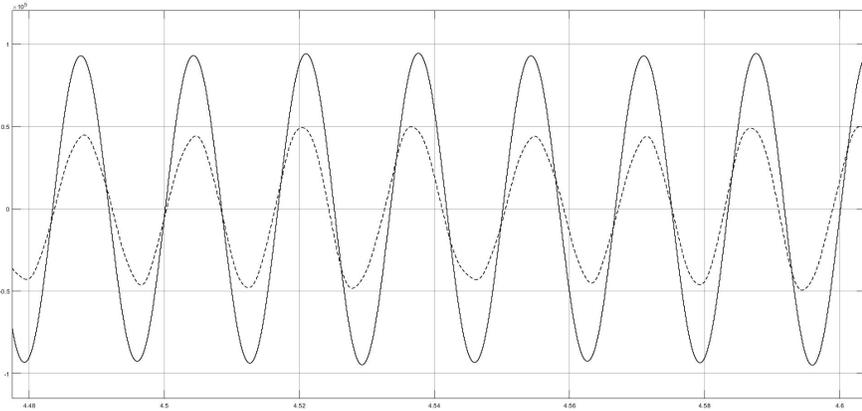


Figure 4.5: Corrección del factor de potencia

SVC como una buena alternativa frente a la problemática de los bajos factores de potencia, las fluctuaciones de la tensión y finalmente la reducción de la potencia demanda al generador, sin embargo también es adecuado realizar una comparativa entre los valores, para establecer una relación cuantitativa más precisa y poder visualizar las mejoras introducidas. En cuanto al factor de potencia se tiene que; antes de incluir el compensador y el banco de capacitores tiene un valor aproximado de 0.8168 en atraso, posteriormente incluido el banco de capacitores el factor de potencia cambia a 0.7625 en adelanto, y finalmente con el compensador SVC consigue llevar al sistema a un factor de potencia bastante optimo cercano a 0.9998. En cuanto a la potencia activa y reactiva esta cambio de ser 38.62 MW y 24.64 MVAR respectivamente a 51.27 MW y -4.27 MVAR.

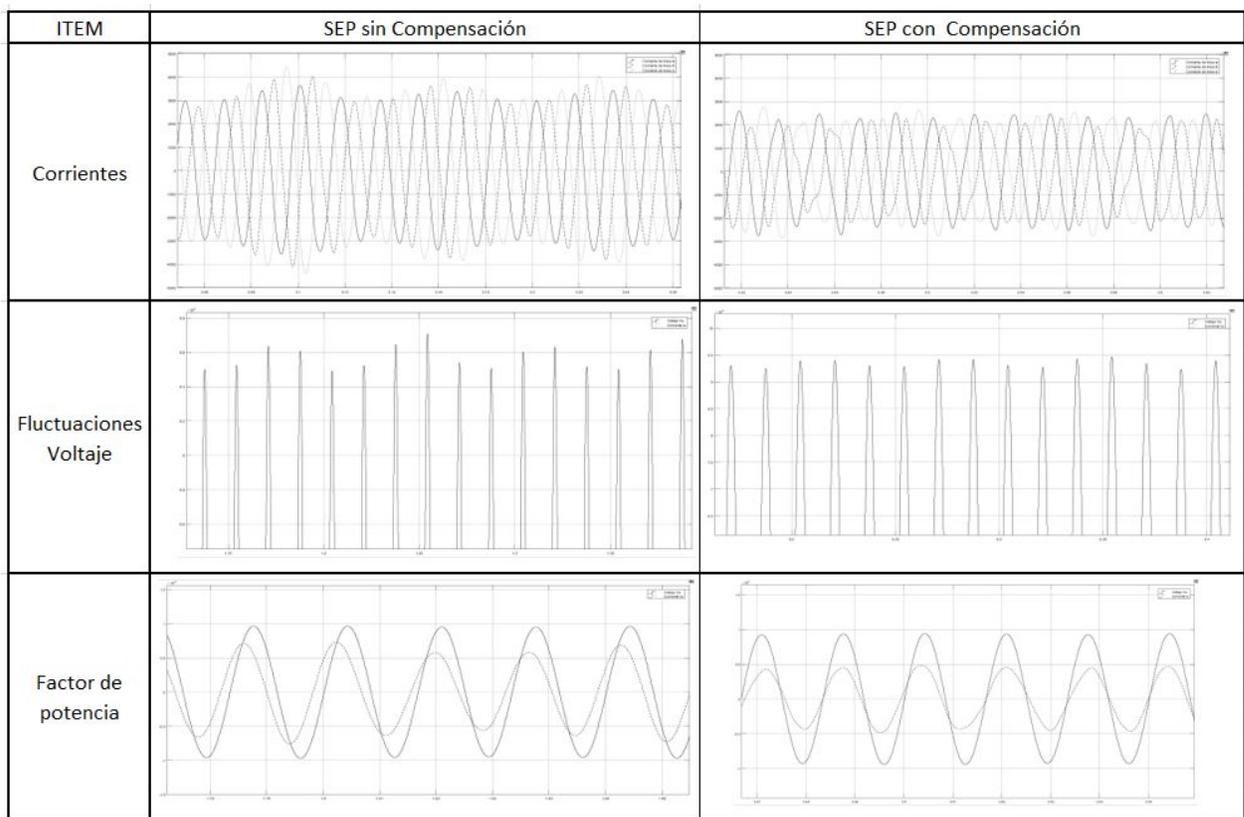


Figure 4.6: Comparacion entre los resultados con y sin compensación para el horno eléctrico



# Capítulo 5

## Conclusiones

- Los diseños del prototipo de control funcionaron efectivamente en los dos modelos implementados, con una mejora considerable del factor de potencia y evidente reducción de las fluctuaciones en las tensiones vistas en bornes del alimentador
- El modelo de compensación usado mediante la aproximación de muestreo presenta bases consistentes y facilita el diseño y la obtención de los resultados deseados
- A pesar de las características caóticas de la carga el sistema de compensación presenta una respuesta acertada y oportuna, con resultados finales aceptables, aunque parámetros límites resultan tener gran sensibilidad al cambio, por lo que conocer con certeza al valor máximo posible de potencia reactiva inyectado es un imperativo para el uso de estos dispositivos
- Son evidentes las mejoras introducidas en el sistema eléctrico de potencia una vez se conecta el compensador, y los resultados se manifiestan en la potencia, las fluctuaciones, y por supuesto un mejor factor de potencia.

### 5.1 Futuros trabajos de investigación

Con el estado del arte actual se pretende enfocar los esfuerzos en la comparativa y la posible inclusión de un sistema de control basado en redes neuronales, a fin de complementar y verificar cual, entre los dos presenta una mejor respuesta y si estos con los acoples adecuados pueden fusionarse para mejorar en gran medida el resultado final de la compensación, adicionalmente el enfoque del trabajo actual podría construir las bases para diseñar un procedimiento para conectar filtros pasivos y su relación con la potencia reactiva que inyectan al sistema.



# Bibliografía

[1] I. Pérez, C.Knittel, Utility of the future, An MIT Energy initiative response to an industry in transition (2016).

[2] M.F. Alves, Z.M. Assis, C. Peixoto, D. Goncalves, An integrated model for the study of flicker compensation in electrical networks, EL SEVIER, 1299-1305 (2010).

[3] P.E. King, T.L. Ochs, A.D. Hartman, Chaotic responses in electric arc furnaces, Journal Applied Physics 76 (4) (1994) 2059–2065.

[4] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajaković, A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs, IEEE Transactions on Power Delivery 5 (3) (1990).

[5] O. Ozgun, A. Abur, Flicker study using a novel arc furnace model, IEEE Transactions on Power Delivery 17 (4) (2002).

[6] UIE Part 5 Flicker and Voltage Fluctuation. Prepared by de travail GT Qualité de l'alimentation "Power Quality" Working Group WG 2, 1999.

[7] T.J.E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley, 1982.

[8] Fundamental theory of load compensation href='https://docplayer.net/42971254-Fundamental-theory-of-load-compensation-lectures-19-28.html FUNDAMENTAL THEORY OF LOAD COMPENSATION (Lectures 19-28)