

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **REDUCCIÓN DE PERTURBACIONES EN LA RED ELÉCTRICA DE UNA PLANTA SIDERÚRGICA CON HORNO ELÉCTRICO DE ARCO A TRAVÉS DE LA INSTALACIÓN DE UN SVC**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**YVAN YLMAR PONCE TRILLO**

**PROMOCIÓN  
2000 - II**

**LIMA - PERÚ  
2010**

**REDUCCIÓN DE PERTURBACIONES EN LA RED  
ELÉCTRICA DE UNA PLANTA SIDERÚRGICA CON  
HORNO ELÉCTRICO DE ARCO A TRAVÉS DE LA  
INSTALACIÓN DE UN SVC**

# **CERTIFICADO DE APROBACION**

Agradezco a mi madre y a mi abuela,  
quienes me permitieron seguir mi  
camino, y dedico a mi hija, quien le ha  
dado alegría a mi vida.

## SUMARIO

En el presente informe de suficiencia se analizan los niveles del efecto flícker en la red eléctrica de una planta de producción de acero ocasionados por la operación de un horno eléctrico de arco, así como la reducción de dicho efecto producto de la instalación de un sistema de Compensación Estática de Potencia Reactiva, también conocido como SVC (del idioma inglés “Static Var Compensator”).

Para realizar dicho análisis se presentan mediciones de calidad de energía de la planta, y se determinan los niveles de flícker correspondientes (así como también de los otros efectos ocasionados por el horno eléctrico de arco como sobretensiones y distorsión armónica), se hace la comparación con la norma técnica de calidad de servicios eléctricos en Perú para verificar riesgos de penalidad, así como posibles perjuicios en otros equipamientos dentro y fuera de la planta.

Se analiza las distintas alternativas que ofrece el mercado y se llega a la conclusión de que la solución óptima es la instalación de un sistema SVC, ya que además de reducir los niveles de armónicos y flícker, nos permite tener control sobre los perfiles de tensión y con ello obtener otros beneficios como el incremento en la producción del horno eléctrico de arco y por tal de la planta siderúrgica.

Para ello se realizan comparaciones de la operación de la planta considerando el sistema eléctrico sin el SVC instalado con respecto a la operación con el SVC instalado. Con ello se identifican los beneficios de instalar dicha solución en la operación de la planta para hacer la evaluación económica correspondiente.

Finalmente, se hace la comparación de los niveles de flícker de la planta con el sistema SVC instalado con respecto a lo solicitado por la norma técnica de calidad de servicios eléctricos en Perú para llegar a las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>ANTECEDENTES</b>	2
1.1 Objetivo	2
1.2 Justificación	2
1.3 Alcance	2
1.4 Hipótesis	2
1.5 Palabras Clave	3
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	4
2.1. El Horno Eléctrico de Arco	4
2.2. Efectos producidos por el Horno Eléctrico de Arco	7
2.2.1 Sobretensiones	7
2.2.2 Distorsión Armónica	8
2.2.3 Efecto Flícker	10
2.3 Normativas acerca de la Calidad de energía	13
2.4 Técnicas de control de Flícker en Hornos Eléctricos de Arco	16
2.5 Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC)	18
2.5.1 Beneficios de utilizar un SVC	18
2.5.2 Elementos y Principio de Funcionamiento del SVC	19
2.5.3 Control de Tensión y Factor de Potencia con el SVC	22
2.6 Comparación de la operación de una planta de acero con y sin SVC	27
2.7 Incremento de producción en una planta de acero debido al SVC	28
<b>CAPITULO III</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	30
3.1 Descripción de la problemática	30
3.2 Datos de la planta	30

3.3	Mediciones en la red	32
3.4	Análisis de la Situación Inicial de la planta	35
3.5	Requerimientos eléctricos de la planta	36
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA</b>		37
4.1.	Comparación entre alternativas de solución	37
4.2.	Selección de la solución a implementar	37
4.3.	Cálculo del SVC	38
4.4.	Evaluación Económica	41
<b>CAPITULO V</b>		
<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>		42
5.1	Resultados obtenidos	42
5.2	Análisis de los resultados	45
5.3	Comparación entre los niveles de Flicker obtenidos con los indicados en la Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos	47
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		48
<b>ANEXOS</b>		50
<b>ANEXO A</b>		
<b>ESQUEMA UNIFILAR DEL SVC</b>		51
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		53

## INTRODUCCIÓN

Los hornos eléctricos de arco instalados en plantas de producción de acero representan una de las cargas que producen los mayores niveles de perturbaciones con respecto a la calidad de energía en los sistemas eléctricos, debido a su naturaleza no lineal. Principalmente se les identifica como los causantes de fluctuaciones de tensiones elevadas, del incremento en los niveles de armónicos y de la aparición del efecto flícker. En general, la principal causa de las perturbaciones es la generación del arco eléctrico entre los electrodos del horno eléctrico de arco.

Los efectos anteriormente indicados tienen repercusiones en el funcionamiento de los equipos al interior de una planta siderúrgica, además de posibles incumplimientos normativos y regulatorios en el punto de conexión de los clientes con las empresas de transmisión o distribución de energía eléctrica según sea el caso.

En ocasiones estas cargas también traen como consecuencia caídas de tensión en los lugares más alejados del sistema (dependiendo del tipo de red), perjudicando cargas de otras empresas, por lo cual en algunos casos los entes reguladores no permiten la operación de dicha planta a su máxima capacidad hasta reducir dichos efectos a través de la instalación de algún sistema de compensación.

De otro lado, los avances tecnológicos permiten que encontremos en el mercado soluciones modernas que no solo reducen notablemente estos efectos en la red, sino también pueden ayudar a incrementar la productividad de la planta, es decir, permiten producir mayor cantidad de material final de la acería y con ello obtener beneficios económicos adicionales. Algunas de estas tecnologías son más costosas que otras (dependiendo de las ventajas que presenten), por lo cual siempre una evaluación económica (de mediano o largo alcance) es conveniente cuando se quiere sustentar la adquisición de alguna tecnología moderna.



# **CAPITULO I**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1. Objetivo**

El objetivo del presente informe es verificar la reducción de los niveles de perturbaciones (armónicos y flicker) en la red eléctrica de una planta de producción de acero con horno eléctrico de arco al instalar un sistema de Compensación Estática de Potencia Reactiva, en adelante “SVC” (del idioma inglés Static Var Compensator).

### **1.2. Justificación**

Para el caso de la planta de producción de acero objeto de nuestro estudio se demuestra mediante el análisis de red efectuado a través de mediciones de calidad de energía, que los niveles de distorsión armónica y flicker no cumplen con las normativas y que además causan perjuicios tanto a los equipos dentro de la planta (generando inconvenientes en la operación del sistema y pérdidas económicas), así como a otros clientes del sistema.

Por lo anterior, es necesario encontrar e implementar una solución óptima técnica y económicamente que nos permita mitigar dichos efectos en la red así como futuras penalidades por parte de las empresas reguladoras.

### **1.3. Alcance**

Análisis de las perturbaciones de la red eléctrica (niveles de armónicos y flicker), de una planta de acero con horno eléctrico de arco (objeto de nuestro estudio), comparación entre posibles soluciones, selección de la solución óptima, comparación de la operación de la planta con y sin la instalación de dicha solución, evaluación de los beneficios técnicos, evaluación económica y análisis respecto a las normativas de calidad de energía en el país.

### **1.4. Hipótesis**

Se demostrará que la mejor alternativa de solución es la instalación de un sistema de Compensación Estática de Potencia Reactiva (SVC), ya que además de mitigar los niveles de distorsiones armónicas y flicker nos permite tener control sobre los perfiles de tensión y con ello la posibilidad de obtener un incremento en la producción de la planta de acero.

En el caso del efecto flícker que de acuerdo a la norma IEC es medido por el índice de severidad de corta duración (Pst), usualmente un sistema SVC convencional logra mitigar alrededor de 50% de su valor, por lo cual es necesaria la evaluación respecto a lo solicitado por la norma técnica de calidad de servicios eléctricos.

### **1.5. Palabras Clave**

- Hornos eléctricos de arco
- Calidad de Energía
- Sobretensiones
- Armónicos
- Flícker

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

#### 2.1. El Horno Eléctrico de Arco

Se utilizan para la fabricación de acero a partir de chatarra como materia prima y/o “hierro esponja”, material de hierro obtenido de un proceso de reducción directa.

Básicamente un horno eléctrico de arco está constituido por un recipiente circular cubierto de ladrillos refractarios, con una tapa móvil denominada bóveda y que tiene un sistema bascular que permite el vaciado del acero líquido y de la escoria (el desecho obtenido durante el proceso de fusión). El horno se carga por la parte superior con chatarra o con hierro esponja. La fusión de la chatarra se logra mediante el arco eléctrico producido por los tres electrodos construidos con material de grafito colocados en forma de triángulo en el centro del horno. El tiempo de la fusión depende de la potencia del transformador que alimenta a los electrodos; la tendencia hoy en día es hacer cada vez más alta esta potencia.

Como el consumo de energía eléctrica para fundir la chatarra es alto, el costo de esta energía tiene gran importancia en el costo del acero.



Fig. 2.1: Horno Eléctrico de Arco de 140tn [1]:

A principios del Siglo XX, los hornos eléctricos de arco fueron considerados como un procedimiento caro y con perspectivas de desarrollo sólo para aceros considerados. La gran capacidad de generación eléctrica desarrollada a nivel mundial posteriormente, logró revertir esta situación y originó el fenómeno de las miniplantas o miniacerasías que operan con chatarra o hierro esponja con gran eficiencia. El primero que tuvo la visión de la miniaceraía fue el alemán Willy Korf entre los años 1966 y 1970, y empieza a difundirse el concepto de hornos de alta potencia, y ultra potencia dotados de transformadores de mayor tamaño; así como hornos con corriente continua.

Simultáneamente se hicieron grandes avances en la calidad de los electrodos y del material refractario para el horno y la bóveda o tapa del horno. Luego surge la idea de dividir el proceso de aceración en sus dos etapas, la fusión del metal (derretirlo) y el afino del acero. Nace así el “horno de cuchara”, que utilizando un transformador de mucha menor potencia realiza esta operación, denominada metalurgia secundaria. Usualmente la colada del acero en el horno eléctrico se efectúa basculando el horno para que el acero salga por la piquera y sea depositado en una cuchara o recipiente cubierto de ladrillos refractarios. En la colada del acero se tiene cuidado en no arrastrar la escoria que flota encima.

### Parámetros Eléctricos de Operación del horno de Arco

El arco eléctrico es resistivo, en consecuencia la corriente está en fase con la tensión de arco. El circuito equivalente del horno de arco es simple, y se muestra a continuación en la figura 2.2:

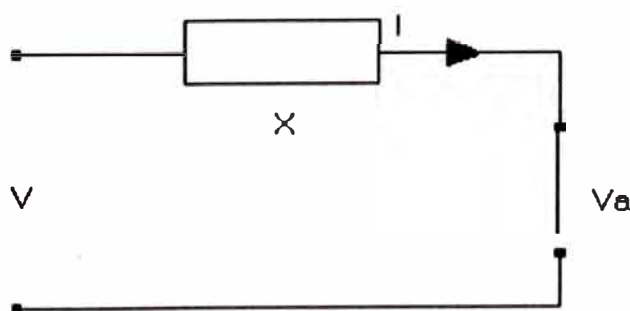


Fig. 2.2: Circuito equivalente de un Horno Eléctrico de Arco [13]:

Donde:

X: reactancia del circuito

V: tensión en vacío

Va: tensión de arco

I: Corriente

## **Productividad y consumo de energía del horno de arco**

Para producir una tonelada de acero es necesaria una cantidad de energía que depende del tipo de carga metálica, del tipo de producto, de la temperatura final, del tipo y cantidad de escoria y de otros factores. Si el horno es mal operado, con elevados tiempos de paradas, con frecuentes aperturas de la bóveda o con tiempos de afine muy dilatados, los consumos de energía por tonelada aumentan drásticamente. Sin embargo, de un modo general, para producción de acero, en condiciones normales, se espera que el horno consuma aproximadamente 550 kWh por tonelada de acero. Una parte de esa energía es normalmente producida por medios químicos, generalmente inyectando oxígeno, pero la principal parte es suministrada por el arco eléctrico producido dentro del horno.

El consumo específico de energía depende fuertemente del tipo de carga. Los hornos que utilizan carga de hierro esponja, además de calentar la carga hasta una temperatura entre 1620 a 1735 °C precisan proveer la energía necesaria para reducir porcentajes de óxido de hierro que pueden variar entre 5 y 10 %. La energía necesaria para reducir una tonelada de óxido de hierro es muy elevada y, por ese motivo, el consumo específico de energía operando con carga de hierro esponja puede ser 50 a 100 kWh/t superior al de una carga de chatarra. No obstante, los hornos que operan con alto porcentaje de hierro esponja consiguen actualmente niveles muy elevados de productividad debido a la excelente escoria espumosa, que permite la utilización de elevados niveles de potencia por tonelada, y a los bajos tiempos muertos. Otro punto muy importante para lograr la alta productividad es la adecuada selección de la chatarra a utilizar en el proceso

### **Aumento de la productividad de los hornos de arco a través del aumento de la tensión secundaria en los transformadores**

La ventaja de la operación con tensiones más elevadas ya era defendida en el inicio de los años 80. Desafortunadamente, hasta el final de esa década, pocos hornos eléctricos de arco habían sido modificados. Las tensiones más elevadas permiten la operación con potencias más altas sin necesidad de modificar el circuito secundario del horno (barras, cables flexibles, buses, garras porta-electrodos y electrodos).

La inversión que se requiere se recupera en pocos meses con la reducción de los consumos de electrodos. Para estabilizar el arco en la fusión es necesario aumentar la reactancia del circuito, instalando por ejemplo reactores en serie.

En el pasado, la operación con tensiones y potencias específicas elevadas no era posible por causa del elevado desgaste de refractarios que provocaba. Al final de los años

70, las paredes y bóvedas refrigeradas con agua permitieron incrementar un poco las potencias y las tensiones. El principal impulso para operar con altas tensiones y potencias fue dado por el desarrollo de las escorias espumosas que blindan el arco, protegiendo las paredes, lo cual ocurrió al final de los años 80. Actualmente son utilizadas tensiones de 900 V y potencias de 45 MW en hornos de apenas 40 toneladas. En los hornos de gran capacidad, que actualmente operan con tensiones de 900 a 1300 V, todavía hay margen para aumentar las tensiones hasta 2000 V o más (en hornos de 150 a 250 toneladas que operan con carga continua de hierro esponja), disminuir los consumos de electrodos para menos de 1 kg/t y aumentar la productividad hasta 250 t/h.

## **2.2. Efectos producidos por el Horno Eléctrico de Arco**

Los hornos eléctricos de representan una de las cargas que producen los mayores niveles de perturbaciones en los sistemas eléctricos debido a su naturaleza no lineal. La principal causa de las perturbaciones es la generación del arco eléctrico entre los electrodos del horno eléctrico de arco.

Los efectos anteriormente indicados tienen repercusiones en el funcionamiento de los equipos al interior de una planta siderúrgica, además de posibles incumplimientos normativos y regulatorios en el punto de conexión de los clientes con las empresas de transmisión o distribución de energía eléctrica según sea el caso.

### **2.2.1 Sobretensiones**

El circuito de alimentación de los hornos de arco es similar a cualquier otro circuito de alimentación industrial. Una particularidad de este circuito es el elevado número de maniobras del transformador del horno (generalmente conectado en 13,8; 23 o 33 kV), que puede llegar a 100 por día normalmente. Otra característica es la existencia de bancos de condensadores de alta potencia. Para maniobrar el horno eléctrico de arco, son utilizados actualmente interruptores de vacío.

Las principales protecciones contra las sobretensiones son los supresores de impulsos de maniobra, más conocidos como pararrayos ya que son los mismos dispositivos utilizados para proteger contra descargas atmosféricas. Estos supresores, a partir de 1980 aproximadamente, pasaron a ser fabricados con óxidos metálicos, como el óxido de zinc.

En el caso de un transformador instalado por ejemplo en 23 kV, el nivel de aislamiento del mismo debe ser adecuado para soportar tensiones de impulso de hasta 150 kV y los pararrayos, para ese nivel de tensión, normalmente actúan con aproximadamente 60 kV. Para los transformadores de horno eléctricos de arco se recomienda instalar los

pararrayos no sólo entre fase y tierra sino también entre fases. En el caso de los interruptores de vacío, existe un fenómeno conocido como múltiples re-igniciones que eventualmente podrían provocar sobretensiones de alta frecuencia y averiar al transformador, especialmente cuando hay condensadores en el primario del transformador y condensadores de corrección del factor de potencia en la subestación principal.

Para proteger el sistema contra este tipo de sobretensión, los fabricantes de interruptores de vacío recomiendan el uso de circuitos de protección RC, conectados entre fase y tierra. Otro tipo de sobretensión bastante común es el que ocurre durante la desconexión de los bancos de condensadores, sobretodo cuando los interruptores no son adecuados o tienen defectos. Estas sobretensiones son de alta energía y normalmente provocan fallas en los pararrayos.

### **2.2.2 Distorsión Armónica**

La principal perturbación provocada por el horno de arco son las fluctuaciones de tensión de frecuencia inferior a la industrial (flicker). Sin embargo, el horno eléctrico de arco genera también corrientes armónicas (frecuencias múltiplos de la fundamental) que a su vez causan distorsiones de la onda de tensión de la red. El horno eléctrico de arco genera una gama bastante ancha de frecuencias armónicas, siendo las de mayor amplitud la 3era, 2da, 5ta y 4ta, (en ese orden). Los valores promedio de las amplitudes de las corrientes armónicas de los hornos eléctricos de arco son relativamente bajos, en comparación por ejemplo con los generados por convertidores de frecuencia (variadores de velocidad) que usan tiristores. En la práctica, algunos pocos semiciclos de la corriente muestran porcentajes elevados de distorsión, pero, en promedio, éstos no pasan de 5 % para las principales armónicas.

Por lo explicado anteriormente, la necesidad de filtros de armónicas depende básicamente de la obligatoriedad de cumplir las normativas más o menos exigentes sobre distorsión de tensión. Desde un punto de vista práctico, en gran parte de los casos solo es necesario instalar bancos de condensadores sin filtros, siempre y cuando se tome la precaución de desplazar la frecuencia de resonancia paralelo de las principales frecuencias armónicas.

Por otro lado, la necesidad de instalar filtros de armónicas es inevitable cuando se instalan sistemas de compensación estática de potencia reactiva (SVC), ya que estos al poseer dispositivos de estado sólido controlados por la variación del ángulo de disparo provocan elevados niveles de armónicas.

De cualquier forma, en muchos proyectos se decide instalar filtros de armónicas en la subestación para garantizar que no ocurran amplificaciones muy elevadas de las tensiones y de las corrientes de los bancos de condensadores. Una buena solución puede ser la instalación de filtros de 3era armónica (sintonizados en aproximadamente 2,9 veces la fundamental). El proyecto de instalación de filtros debe tomar en consideración las sobretensiones de régimen permanente provocadas por los inductores sobre los condensadores, además de las sobretensiones provocadas por las armónicas, las sobretensiones de energización de los condensadores y los impulsos de tensión provocados por las corrientes de arranque de los transformadores del horno eléctrico de arco. En el caso de los filtros de 2da armónica, este último tipo de sobretensión es crítica y obliga a sobredimensionar los bancos de condensadores (y por tal los filtros), encareciendo el proyecto.

En cuanto a los efectos de las armónicas en los equipos instalados en la planta, básicamente se pueden apreciar en equipos electrónicos (PLC's, tarjetas electrónicas en general, variadores de velocidad, etc.) así como resonancia en bancos de condensadores, calentamiento de transformadores, etc.

Con respecto a los motores eléctricos, la circulación de corrientes armónicas, a diferentes frecuencias por sus devanados provoca calentamiento en los mismos, lo que puede poner en peligro el aislamiento térmico del arrollamiento. En ciertos casos se puede llegar a provocar cortocircuitos y llegar a destruir el motor. Por otra parte, los armónicos pueden provocar que el motor tienda a ir más rápido o más lento de lo que debiera (debido a campos magnéticos del mismo sentido que la componente fundamental o de sentido contrario producido por los armónicos), esto provoca una pérdida de rendimiento de los equipos, se fuerza al motor respecto a su operación normal y, a la larga, se reduce la vida efectiva del mismo.

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso. Por esta razón las corrientes armónicas siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas varían según la frecuencia de la red. Donde se tiene que la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia y la resistencia se incrementa en menor medida, mientras que la reactancia capacitiva disminuye con respecto a la frecuencia.

Así las armónicas fluyen hacia donde se le presenta menos resistencia a su paso, esto se muestra en la siguiente figura:



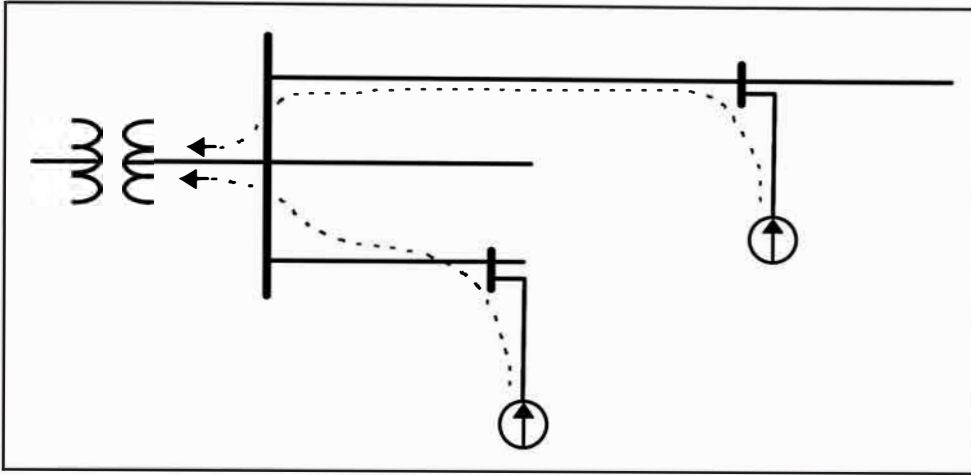


Fig. 2.3: Trayectoria de las armónicas en un sistema inductivo [4]:

En cambio si al sistema de la figura siguiente se le incluye un banco de condensadores con el cual se da lugar a unas trayectorias distintas para las armónicas, con lo cual se mitiga el problema.

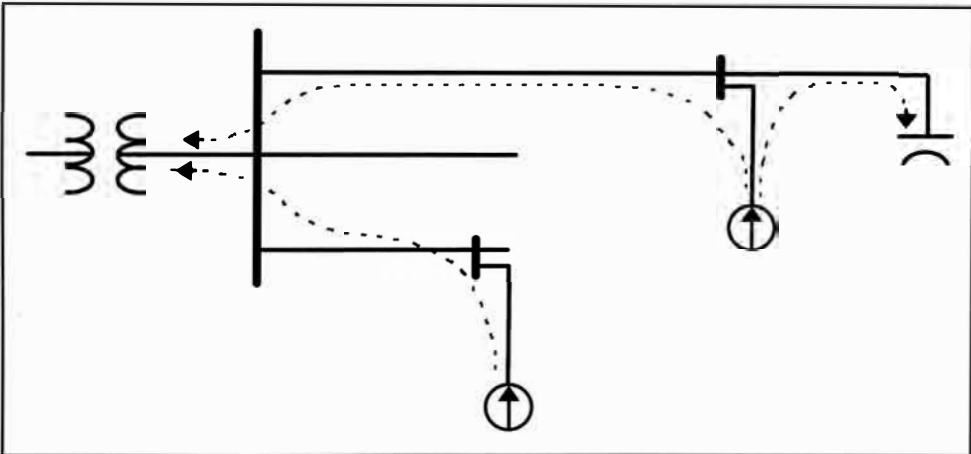


Fig. 2.4: Efecto de los condensadores en las trayectorias de las armónicas [4]

### 2.2.3 Efecto Flícker

El flícker es una impresión subjetiva de la fluctuación de iluminación o variación notoria instantánea de los niveles de iluminación, ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red de alimentación eléctrica. Origina en las personas que la perciben una sensación desagradable a la visión.

El flícker depende fundamentalmente de la frecuencia, de la amplitud y de la duración de las fluctuaciones de tensión que lo causan y se expresa como el cambio de tensión rms dividido por la tensión promedio rms.

Ocurre en un rango de frecuencias que van desde 0,5 Hz a 30 Hz de frecuencia, demostrándose a través de pruebas que el ojo humano es muy sensible a frecuencias moduladoras en el rango de 8 a 10 Hz con variaciones de tensión en el rango de 0,3 a 0,4% de magnitud a esas frecuencias.

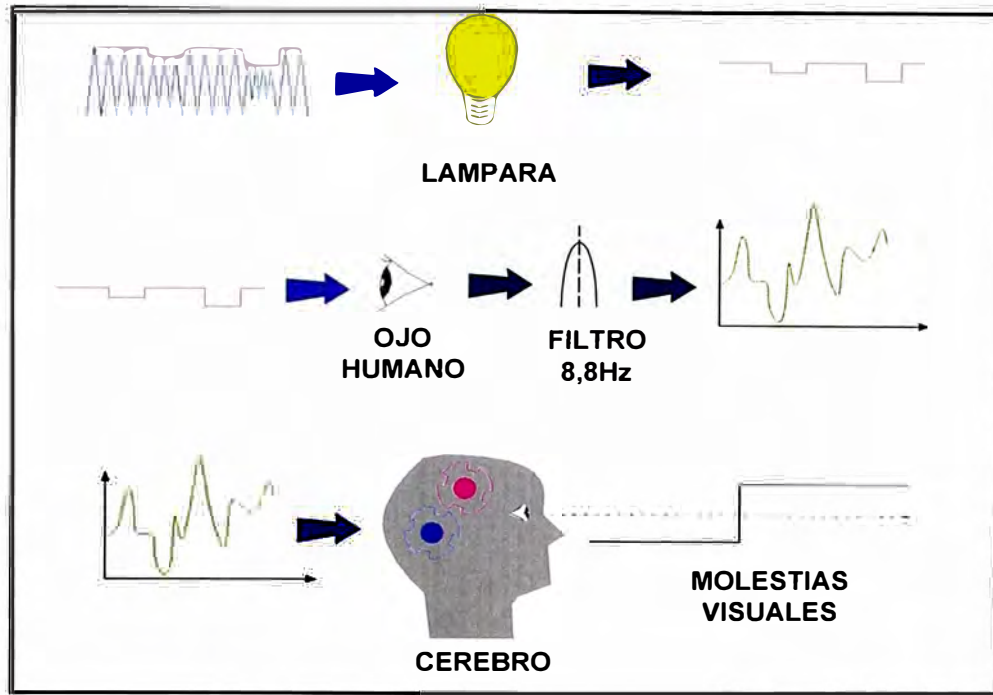


Fig. 2.5: Flícker, un parámetro que afecta al ser humano [4]

Actualmente, el nivel de flicker es medido por instrumentos calibrados de acuerdo con los estudios de la UIE (Unión Internacional de Electrotecnia) realizados a partir de 1980 y posteriormente adoptados por la norma IEC 868.

La unidad de medición es el Pst (Índice de Severidad de fluctuaciones rápidas de tensión de corta duración) y de acuerdo con las recomendaciones iniciales, un valor de Pst igual o superior a la unidad (1pu) provocaría niveles de perturbación considerados inadmisibles.

El valor Pst indica cuando una persona normal percibirá un cambio de luminosidad en la iluminación para focos de 60 W, 120 V ó 230 V.

En el caso de los hornos eléctricos son los más importantes generadores de flicker, ya que las variaciones de la longitud del arco provocan fluctuaciones de tensión que se propagan por el circuito de alimentación hasta llegar a los usuarios de baja tensión. Desafortunadamente, la frecuencia de esas fluctuaciones coincide con la frecuencia de fluctuación de la iluminación que es detectada por el ojo humano (1 a 15 Hz, aproximadamente), provocando un cierta incomodidad a los consumidores residenciales.

El punto común de acoplamiento (PCC) es el punto común que existe entre el usuario o carga perturbadora y los posibles afectados. Este es el punto de la red de distribución, más próximo (eléctricamente) de un usuario, al que están o pueden ser conectados otros usuarios. El PCC se puede encontrar en el primario o secundario del transformador según donde se encuentre la carga perturbadora.

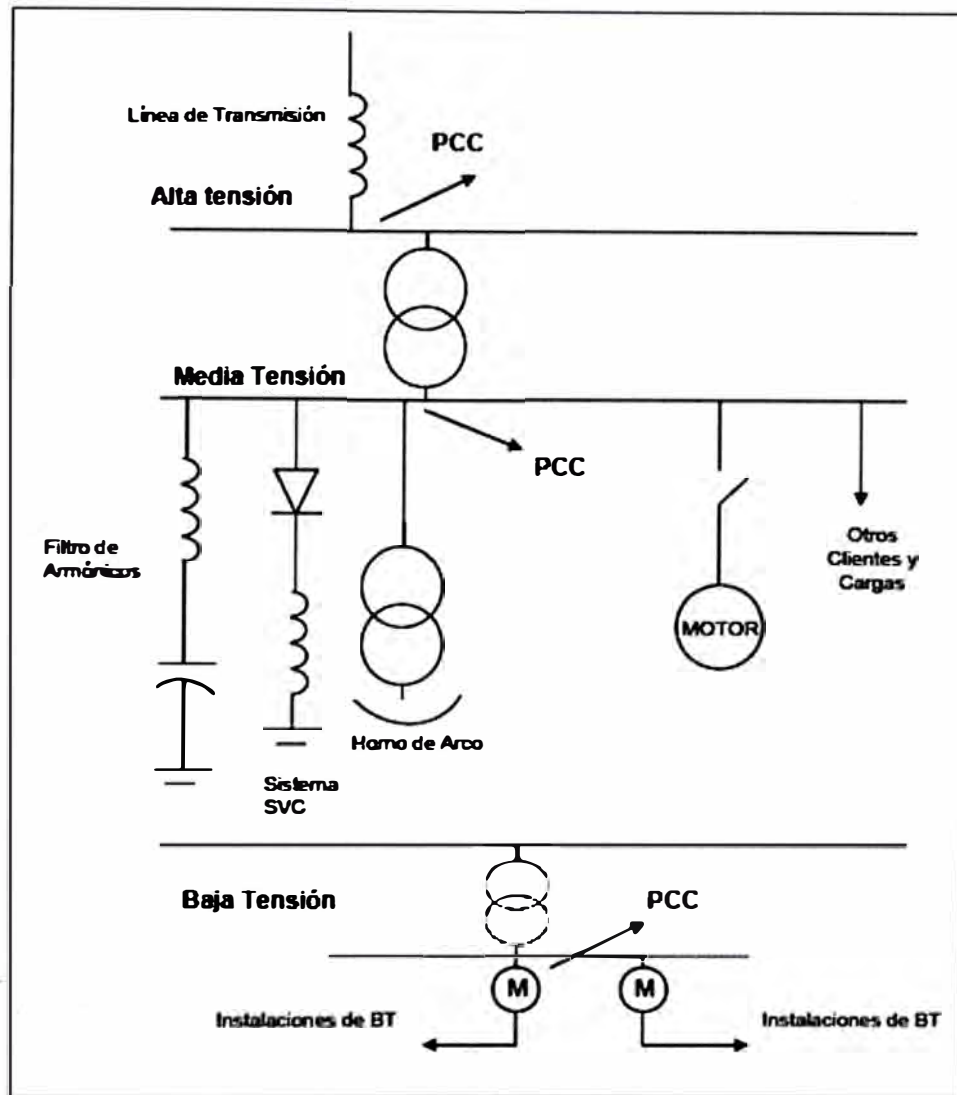


Fig. 2.6: Sistema eléctrico típico de una planta de acería [4]

Inicialmente se consideraba el valor de Pst de referencia al que se obtenía de las mediciones en la parte de alta tensión, en el llamado punto común de acoplamiento (PCC) con los otros consumidores.

Sin embargo, mediciones de campo realizadas posteriormente mostraron que entre la alta tensión y la baja tensión ocurre una atenuación natural del flúcker, que, en ciertos casos, puede llegar a 50 %, concluyéndose que para que el usuario residencial, conectado en la baja tensión, observe un efecto similar a 1 pu, el valor de Pst provocado por un horno eléctrico sobre la alta tensión debería alcanzar valores muy superiores a 1 pu (2 pu, en el caso de la atenuación de 50 %).

### Índice de Severidad de fluctuaciones rápidas de tensión de corta duración (Pst)

El Pst es calculado a través del método de medición "Flickermeter", según la norma IEC 61000-4-15 (versión anterior a la IEC 868) en intervalos de 10 minutos, y se puede reflejar de la siguiente forma:

$$P_{st} = \sqrt{k_{0,1} P_{0,1} + k_1 P_{1s} + k_3 P_{3s} + k_{10} P_{10s} + k_{50} P_{50s}}$$

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_{1s} + 0,0657 P_{3s} + 0,28 P_{10s} + 0,08 P_{50s}}$$

Los valores  $P_{0,1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  son niveles de flicker excedidos en 0,1 , 1, 3, 10 y 50% del tiempo de medición.

### 2.3. Normativas acerca de la Calidad de Energía

En nuestro país está vigente la Norma Técnica de Calidad de los Servicios (en adelante “NTCSE”), la cual establece tolerancias a indicadores de calidad de producto (tensión y perturbaciones) con el fin de garantizar a los usuarios un suministro eléctrico continuo, adecuado, confiable y oportuno. Dicha norma debe ser cumplida por la empresa proveedora de energía, así como también las empresas industriales tienen la responsabilidad de no contaminar la red con la operación de sus procesos.

Es importante mencionar que la NTCSE actualmente se encuentra suspendida en lo que respecta a perturbaciones debido a los cuestionamientos de su aplicación. Sin embargo, las empresas concesionarias por medida cautelar siguen realizando mediciones de tensión y perturbaciones.

#### Calidad de energía eléctrica

La calidad de la energía eléctrica puede definirse como el conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente para un tiempo dado y un lugar determinado, con el propósito de satisfacer las necesidades del cliente.

#### Control de Calidad de Producto

El control de la calidad de los servicios eléctricos aplicable a las empresas involucradas directa o indirectamente en la prestación y uso de este servicio se realiza en los siguientes aspectos:

Tensión

Perturbaciones (Flicker y tensiones armónicas)

#### Tensión

La NTCSE especifica tolerancias en cuanto a las variaciones de los niveles de tensión medidos. El período de medición es de (07) días calendarios continuos promediados por intervalos de 15 minutos. El indicador de calidad de tensión se refiere a que en un intervalo de medición  $k$ , de 15 minutos de duración está dado por lo siguiente fórmula:

$$\Delta V_k (\%) = 100(V_k - V_N) / V_N$$

La tolerancia del nivel de tensión es del  $\pm 5\%$  de la tensión Nominal.

## **Perturbaciones**

La NTCSE solo contempla indicadores de calidad para el control del flicker y tensiones armónicas.

### **Flicker**

El indicador de calidad es el Índice de Severidad por Flicker de corta duración (Pst), definido de acuerdo a la norma IEC.

Según la NTCSE, el Índice de Severidad por Flicker (Pst) no debe superar el valor de la unidad ( $Pst < 1$ ) en Muy Alta, Alta, Media ni Baja Tensión. Se considera el límite:  $Pst = 1$  como el umbral de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia por una muestra específica de población.

### **Armónicas de tensión**

Las principales medidas técnicas de la calidad de servicio de energía eléctrica son las características de la onda de tensión:

- Amplitud constante.
- Frecuencia constante.
- Forma sinusoidal

Los armónicos son tensiones y corrientes con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz) los cuales son generados por las cargas no-lineales.

Ejemplo:

La distorsión de la forma de onda de corriente esta compuesto de una onda senoidal fundamental a 60 Hz y corrientes de frecuencias múltiplos de 60 Hz tal como de 3er orden (180 Hz), de 5to orden (300 Hz), las cuales se adicionan dando como consecuencia una onda distorsionada (Fig. 7).

Actualmente la alta proliferación de controles y dispositivos electrónicos con elementos de estado sólido y cargas no lineales, tales como hornos o soldadores de arco, sistemas de tracción eléctrica, trenes de laminación, máquinas eléctricas con controles de estado sólido, equipos con núcleos saturables, Compensadores, etc., han producido una gran cantidad de armónicas en las ondas de tensión y corriente.

Las corrientes armónicas al circular por el sistema de potencia producen caídas de tensión armónica que son capaces de distorsionar la onda de tensión de suministro. La forma de evaluar un voltaje o una corriente distorsionada es a través del parámetro denominado distorsión armónica total THD (del inglés "Total Harmonic Distorsion"), que a continuación veremos.

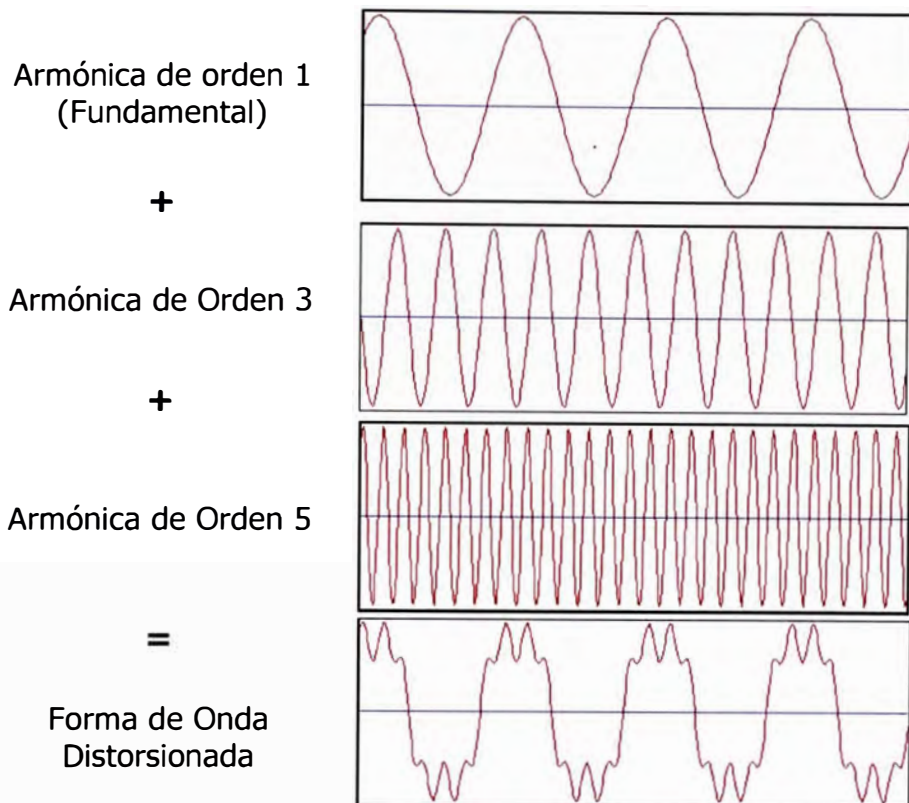


Fig. 2.7: Descomposición de la onda de tensión [14]

Según la NTCSE [10] La fórmula de THD es la siguiente:

$$THD(\%) = \left( \sqrt{\sum_{i=2 \dots 40} \frac{v_i^2}{v_N^2}} \right) * 100\% \dots \text{Fórmula No 5.2}$$

Donde:

$V_N$  : Tensión Nominal

$V_2, V_3, \dots, V_{40}$  : Armónica de tensión del orden 2 al 40

### Tolerancias

Esta Norma establece las tolerancias para alta y muy alta tensión, así como para media y baja tensión, respecto al límite máximo de distorsión de tensión THD; estos límites de tensiones armónicas se muestran en la Tabla N° 2.1.

### Parámetros de Calidad según estándares internacionales

Como se mencionó anteriormente la NTCSE está orientada a establecer indicadores de calidad a las empresas concesionarias y no a proteger los equipos eléctricos de la industria.

Por ejemplo un factor importante en la generación de perturbaciones son las armónicas de corriente las cuales no son penalizadas por la autoridad competente. Por otro lado se ha encontrado que las tensiones desbalanceadas y los armónicos además de producir las pérdidas y el consiguiente calentamiento, también producen otros fenómenos como corrientes en los rodamientos y fallas inesperadas que aumentan tiempos muertos.

Tabla N° 2.1 Tolerancias de THD de tensión según D.S. N° 009-1999-EM [10]

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA ó THD	TOLERANCIA  Vi'  ó  THD'  (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
<b>(Armónicas Impares no múltiplos de 3)</b>		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	$0.1 + 2.5/n$	$0.2 + 12.5/n$
<b>(Armónicas impares múltiplos de 3)</b>		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
<b>(Pares)</b>		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
<b>THD</b>	<b>3</b>	<b>8</b>

Los sistemas generales son considerados para aplicaciones en la industria y los sistemas dedicados son particulares, por ejemplo, si se tiene un sistema aislado atendiendo una sola carga.

#### 2.4. Técnicas de Control de Flícker en Hornos Eléctricos de Arco

Los niveles de flícker son proporcionales a la relación entre la potencia del horno eléctrico de arco y la potencia de cortocircuito del PCC con los otros consumidores. Por ese motivo, la forma más directa de disminuir los niveles de flícker es el aumento de la potencia de cortocircuito de la red de alimentación o la reducción de la potencia del horno. La primera, normalmente no puede ser realizada o exige inversiones muy elevadas y, la segunda reduce la productividad del horno, lo cual evidentemente no es una alternativa desde el punto de vista de la empresa productora de acero.

Aún con lo anteriormente mencionado, a continuación revisaremos las técnicas más usuales consideradas para la reducción o mitigación de los niveles de perturbación en cuanto al efecto Flícker:

### **Modificación de la carga perturbadora:**

Las fluctuaciones rápidas de tensión se pueden atenuar modificando el ciclo de trabajo de la carga perturbadora, como por ejemplo el ritmo de soldadura en las soldadoras, la rapidez de relleno de los hornos eléctricos de arco, el modo de arranque de un motor cuando es directo puede ser llevado a un tipo de arranque que disminuya la sobreintensidad, etc. Cuando se trata de grandes cargas esta técnica es poco probable de aplicar ya que afecta la productividad de la planta

### **Modificación de la red:**

Según sea el contexto de la red, se puede considerar los siguientes métodos:

- Distanciar o aislar la carga perturbadora de los circuitos de iluminación.
- Aumentar la potencia de cortocircuito de la red reduciendo la impedancia en el PCC.

Para aplicar los métodos antes mencionados, se puede considerar:

- Conexión de los circuitos de iluminación lo mas cerca posible del transformador que los alimenta.
- Aumentar la sección de los conductores en baja tensión.
- Conexión de la carga perturbadora a una red de mayor tensión.
- Alimentación de la carga por un transformador independiente

### **Condensador en Serie:**

Introducir un condensador en serie en la red aguas arriba del PCC contribuye a disminuir las fluctuaciones al reducir la reactancia de la línea y con ello la impedancia en el PCC.

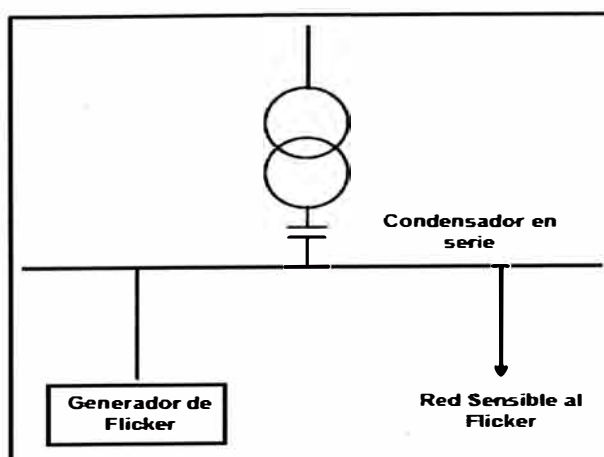


Fig. 2.8: Condensador en serie [4]



La ventaja de esta técnica es que asegura una producción de potencia reactiva. El inconveniente es que se debe proteger los condensadores contra cortocircuitos aguas abajo.

### Reactancia en serie:

Al ser utilizada en combinación con el horno eléctrico de arco se puede alcanzar una reducción del flícker de hasta un 30%. Esta reactancia se coloca en serie con la alimentación del horno, aguas abajo del PCC. Esta técnica de control estabiliza el arco del horno eléctrico, reduciendo el funcionamiento aleatorio del arco.

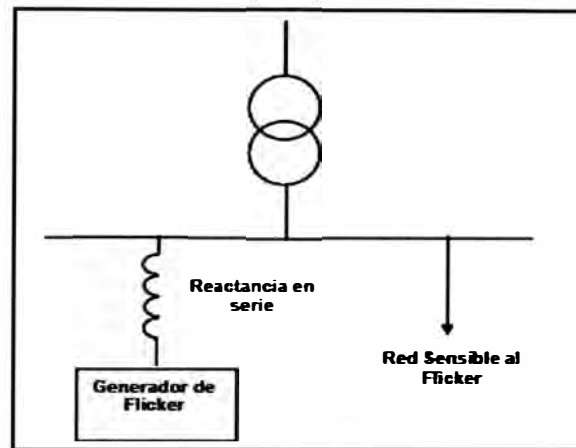


Fig. 2.9: Reactancia en serie [4]

### El SVC:

Actualmente, para reducir el flícker muchas empresas recomiendan los sistemas de compensación estática de potencia reactiva (SVC), lo cual veremos en el siguiente punto.

#### 2.5. Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC)

Son sistemas que utilizando bancos de condensadores fijos además de reactancias controladas por semiconductores, inyectan en la red cantidades de energía reactiva de igual amplitud y signo opuesto a las variaciones de reactivo demandadas por el horno.

Estos dispositivos, en general, son de elevado precio y un sistema SVC convencional puede reducir solamente entre un 25 y 50% el valor del Pst en una planta con horno eléctrico de arco, lo cual no necesariamente va a permitir estar dentro de los valores permitidos por las normativas de calidad de energía, sin embargo son utilizados también porque otorgan otros beneficios en la red, los cuales analizaremos en el siguiente punto del presente informe.

##### 2.5.1 Beneficios de utilizar un SVC

Cuando uno se pregunta porqué utilizar un SVC para la compensación en una planta de producción de acero con horno eléctrico de arco, se deben tener en cuenta qué aspectos son los que uno quiere corregir o mejorar en cuanto a la Calidad de Energía en la red

eléctrica, esto dará como consecuencia un análisis completo de los beneficios que se tendrán, como por ejemplo reducir el nivel de perturbaciones, cumplir con las normativas de calidad, etc.

En la Fig. 2.10 podemos ver los principales beneficios que puede traer el utilizar un SVC en una planta de acería con horno eléctrico de arco, con lo cual el paso a seguir una vez seleccionada esta alternativa como solución técnica es buscar el sustento económico que permita la ejecución del proyecto de instalar el SVC.



Fig. 2.10: Beneficios de utilizar un SVC en una planta de acería [6]

En conclusión, para una planta de producción de acero con horno eléctrico de arco, las principales causas para instalar un SVC se pueden resumir en:

- Estabilización en el perfil de tensiones.
- Reducción del efecto Flícker
- Reducción del nivel de armónicos
- Incremento del factor de potencia.
- Balance de cargas
- Incremento de la capacidad de producción de la planta.

### 2.5.2 Elementos y Principio de Funcionamiento del SVC

Los elementos más característicos de un SVC son los condensadores conmutados por tiristores (TSC) y las bobinas conmutadas (TSR) o controladas (TCR) por tiristores, ya que estos dispositivos son los que incluyen la electrónica de potencia. En la Fig. 2.11 se muestra un esquema simplificado para un SVC donde se incluyen los elementos anteriormente mencionados.

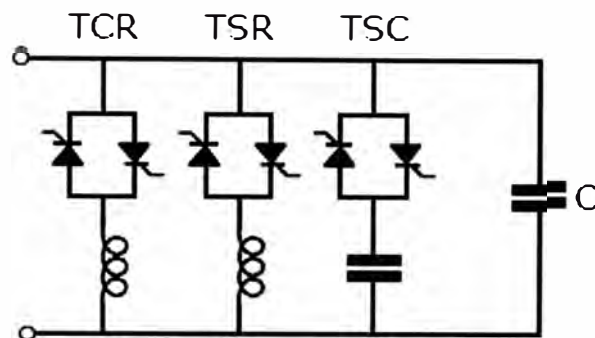


Fig. 2.11: Esquema simplificado de un SVC [14]

A continuación veremos las principales características de los elementos antes mencionados: TSC y TCR

### Condensador conmutado por tiristores

El esquema del condensador conmutado por tiristor o TSC (del inglés “thyristor switched capacitor”) representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva. Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores como se aprecia en la Fig. 2.12, en la que se muestra un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en antiparalelo. De forma que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero.

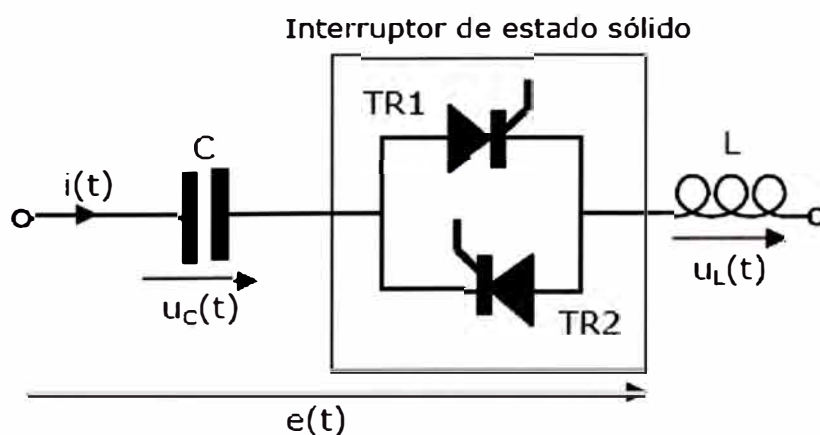


Fig. 2.12: Configuración de un TCS [14]

En serie con el condensador es habitual encontrar una bobina (L en la Fig. 2,12), ya sea para limitar la derivada de la intensidad  $di(t)/dt$  y así proteger a los tiristores, o bien, para crear un filtro sintonizado a una determinada frecuencia. La actuación del interruptor estático es prácticamente instantánea, por consiguiente, se puede elegir como instante de

conexión aquel en que el valor de la tensión de alimentación provoque la menor corriente transitoria. La actuación del interruptor estático es prácticamente instantánea, por consiguiente, se puede elegir como instante de conexión aquel en que el valor de la tensión de alimentación provoque la menor corriente transitoria.

### Bobina controlada por tiristores

Otro elemento característico en el SVC es la bobina controlada por tiristores o TCR (del inglés “thyristor controlled reactor”). La misión de este elemento es conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina.

El esquema de un TCR (ver Fig. 2.13) está formado por una bobina ( $R+L$ ) y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores en antiparalelo. En este caso, a la electrónica de potencia se le aplica un control de fase, de forma que se regula el valor eficaz de la corriente que circula a través de la reactancia.

Si en vez de realizar un control de fase, los tiristores se emplean como si fuesen un interruptor estático, la configuración descrita recibe el nombre de bobina conmutada por tiristores o TSR (del inglés “thyristor switched reactor”). Para minimizar los transitorios de desconexión, el instante más favorable sería cuando la tensión de alimentación alcanzase su nivel máximo o mínimo.

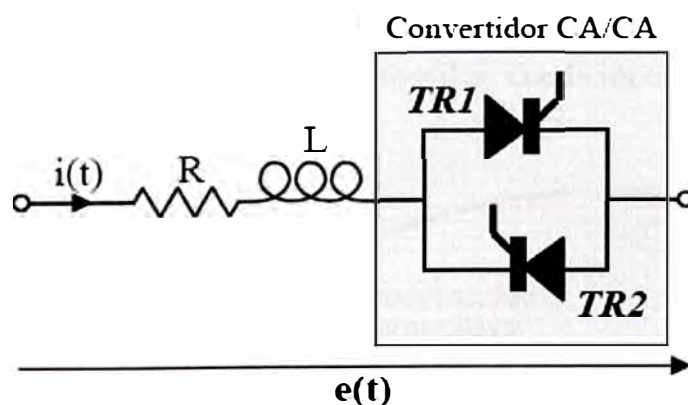


Fig. 2.13: Configuración de un TCR [14]

Otra alternativa podría ser la de utilizar los tiristores para controlar la intensidad de una batería de condensadores, no obstante, el aplicar el control de fase sobre capacidades ocasionaría fuertes corrientes de conexión que tendrían que soportar los propios tiristores, además de la dificultad que esto originaría en el control.

### Configuración del SVC

En general un SVC puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la Fig. 2.14.

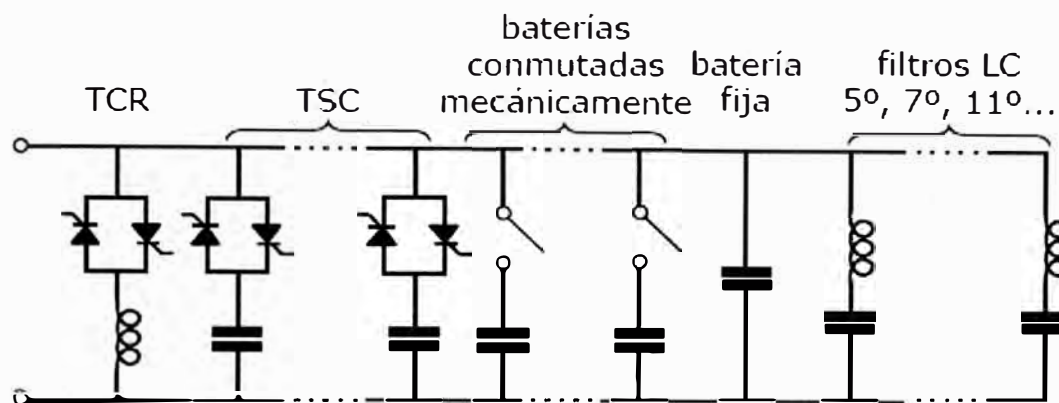


Fig. 2.14: Configuración por fase de un SVC [14]

De esta forma, el SVC tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad (TSC o controladas mecánicamente), del TCR y de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en bancos o filtros LC (ver Fig. 2.15).

La inclusión de filtros LC, ya sean sintonizados a un determinado armónico o bien de paso-bajo, sirven para evitar que parte de los armónicos generados en el TCR se transmitan a la red. Con objeto de reducir los armónicos emitidos por el SVC también se pueden emplear estrategias como las del rectificador de 12 pulsos, dividiendo el SVC en dos y conectando cada parte a un transformador YY e YD. Los bancos de condensadores, o inductancias, accionadas mecánicamente pueden trabajar como unidades de reactiva de reserva que entrarían en funcionamiento en aquellas condiciones más severas para el control realizado por el SVC.

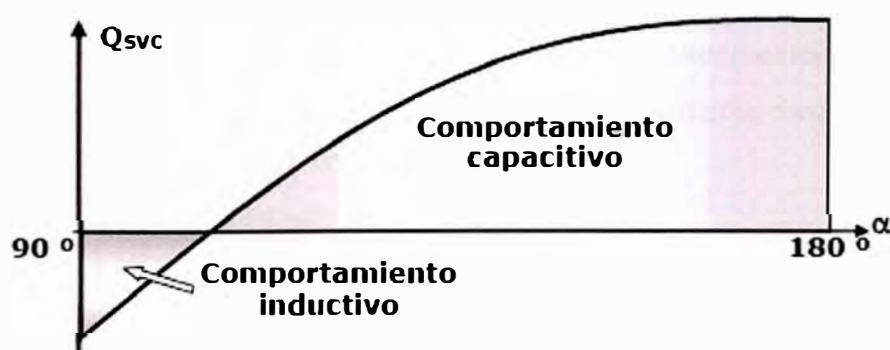


Fig. 2.15: Potencia. Reactiva generada por el TCR en función del ángulo de disparo [14]

### 2.5.3 Control de Tensión y Factor de potencia con el SVC

Para analizar el comportamiento de un SVC en control de tensión y corrección del factor de potencia se empleará el circuito mostrado en la Fig. 2.16; donde  $U$  es la tensión en el consumo,  $E$  es la tensión de suministro,  $P$  y  $Q$  representan el consumo de la carga y  $Q_{svc}$  es la potencia reactiva generada por el SVC.

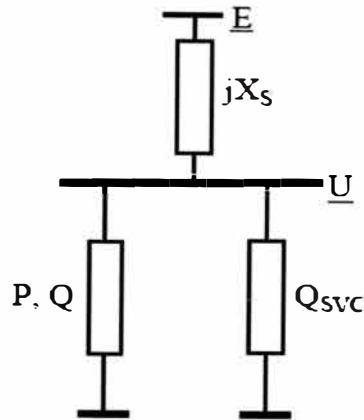


Fig. 2.16: Circuito equivalente [14]

La caída de tensión  $\Delta U$  en el consumo se puede expresar como:

$$\Delta U = E - U = jX_s \frac{P - j(Q - Q_{svc})}{U} \dots (1)$$

Donde se ha tomado como referencia la tensión  $\underline{U} = U \angle 0$ ,  $\underline{E}$  es la tensión de suministro y:

$$Q_{svc} = B_{svc} U^2 \dots (2)$$

Utilizando la ecuación (1) se puede expresar el valor eficaz de la tensión como:

$$E^2 = \left[ U + \frac{X_s(Q - Q_{svc})}{U} \right]^2 + \left[ \frac{X_s P}{U} \right]^2 \dots (3)$$

El valor de  $Q_{svc}$  que se requeriría para mantener constante la tensión se obtendría de la ecuación (3) con la condición de  $E = U$ . Por otra parte, si lo que se desea es hacer una corrección del factor de potencia, dicho valor sería  $Q_{svc} = Q$ . De lo que se deduce que no se pueden controlar la tensión y el factor de potencia simultáneamente. A continuación se muestran aplicaciones de control de tensión y de factor de potencia mediante la utilización de SVC.

### Control de tensión mediante SVC

El SVC se desarrolló a principios de los años 70 para el control de la tensión en puntos de la red en los que hubiese hornos de arco eléctrico, el cual se carga con chatarra de acero en la que se introducen unos electrodos. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos produce un calor intenso que funde el acero. Durante el proceso de fundición se producen unas variaciones bruscas y de carácter aleatorio en la corriente que se consume. De esta forma, el resto de los consumos conectados a la red en paralelo con el horno pueden padecer unas variaciones de tensión indeseables, por ejemplo, en forma de flicker.

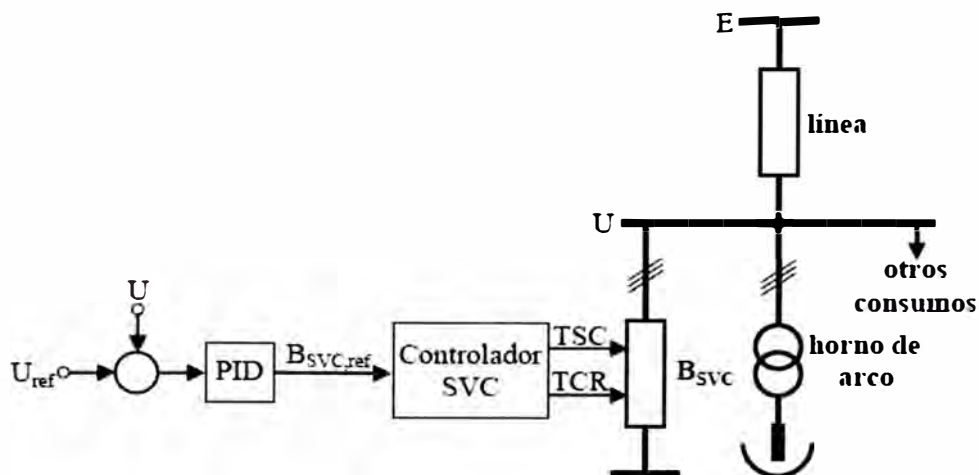


Fig. 2.17: Configuración para el control de la tensión mediante un SVC [14]

El principio de funcionamiento del SVC, basado en electrónica de potencia, se adapta perfectamente a este tipo de situaciones, ya que se puede realizar un control progresivo y rápido de la tensión, o sea de la reactiva, en el punto de la red en el que se desee actuar. En estas situaciones en las que la variable de control es la tensión, la actuación sobre el SVC se puede realizar a través de un regulador que actúe sobre el ángulo de disparo del TCR y que conecte o desconecte las unidades de TSC en función de la desviación de la tensión con respecto a la tensión de referencia, tal y como se muestra en la Fig. 2.17.

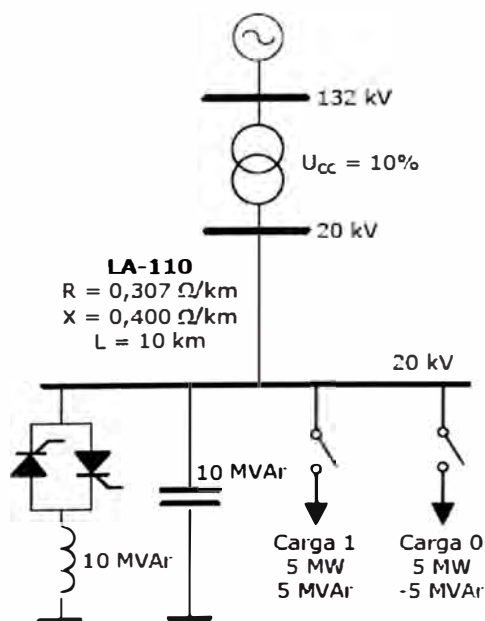


Fig. 2.18: Circuito ejemplo de control de tensión con un SVC [14]

A continuación se muestra un ejemplo de simulación de la aplicación de un SVC para el control de la tensión (extraído de la bibliografía “Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva - Camilo Carrillo / José Cidrás – 2003”), cuando se conectan y desconectan las cargas mostradas en la Fig. 2.18 de la siguiente manera:

- $t = 0$  s      La Carga 1 está conectada y la Carga 0 está desconectada
- $t = 2.0$  s      Se conecta la Carga 0
- $t = 2.5$  s      Se desconecta la Carga 0
- $t = 2.6$  s      Se desconecta la Carga 1
- $t = 3.5$  s      Se conecta la Carga 1

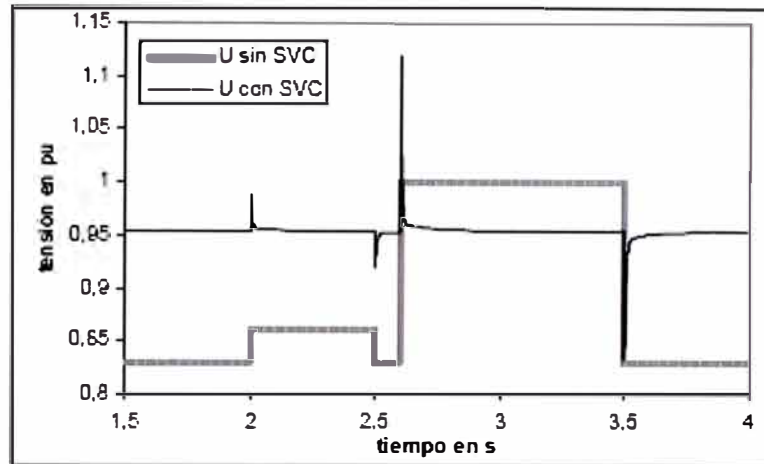


Fig. 2.19: Tensión de las cargas [14]

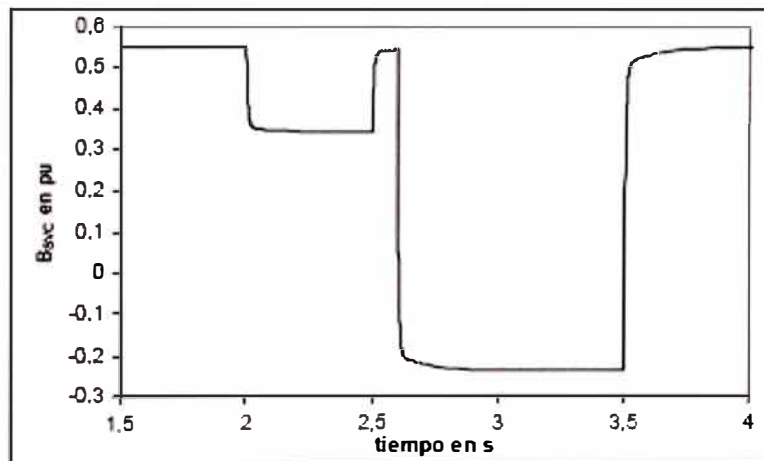


Fig. 2.20: Susceptancia del SVC [14]

Para el control se utiliza un PID cuya salida es directamente el valor de la susceptancia del SVC. La variación de la tensión en el nudo de las cargas con y sin SVC se puede ver en la Fig. 2.19, además de la evolución de la susceptancia del SVC ( $B_{svc}$ ) en la Fig. 2.20.

### Corrección de factor de potencia mediante SVC

La utilización del TSC para el control del factor de potencia en aquellas aplicaciones donde se desee minimizar los transitorios de conexión es bastante habitual. No obstante, el comportamiento de estos equipos se puede mejorar incluyendo un TCR en el diseño, de forma que la regulación del factor de potencia sea continua.



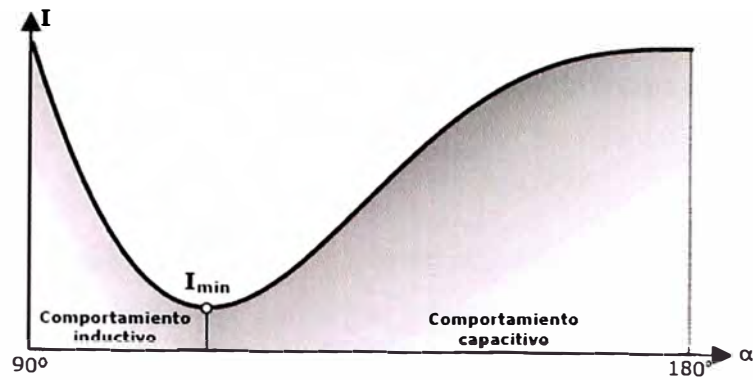


Fig. 2.21: Susceptancia del SVC [14]

El control de estos equipos puede realizarse en bucle abierto midiendo la potencia reactiva consumida por la carga y actuando sobre el SVC o bien en bucle cerrado midiendo la potencia reactiva consumida por el conjunto formado por la carga a compensar y el SVC. No obstante, el emplear la potencia reactiva como variable de entrada no está exento de problemas, ya que es necesaria la medida simultánea de la tensión y la intensidad, además de la problemática que acarrea su definición cuando hay armónicos en la red.

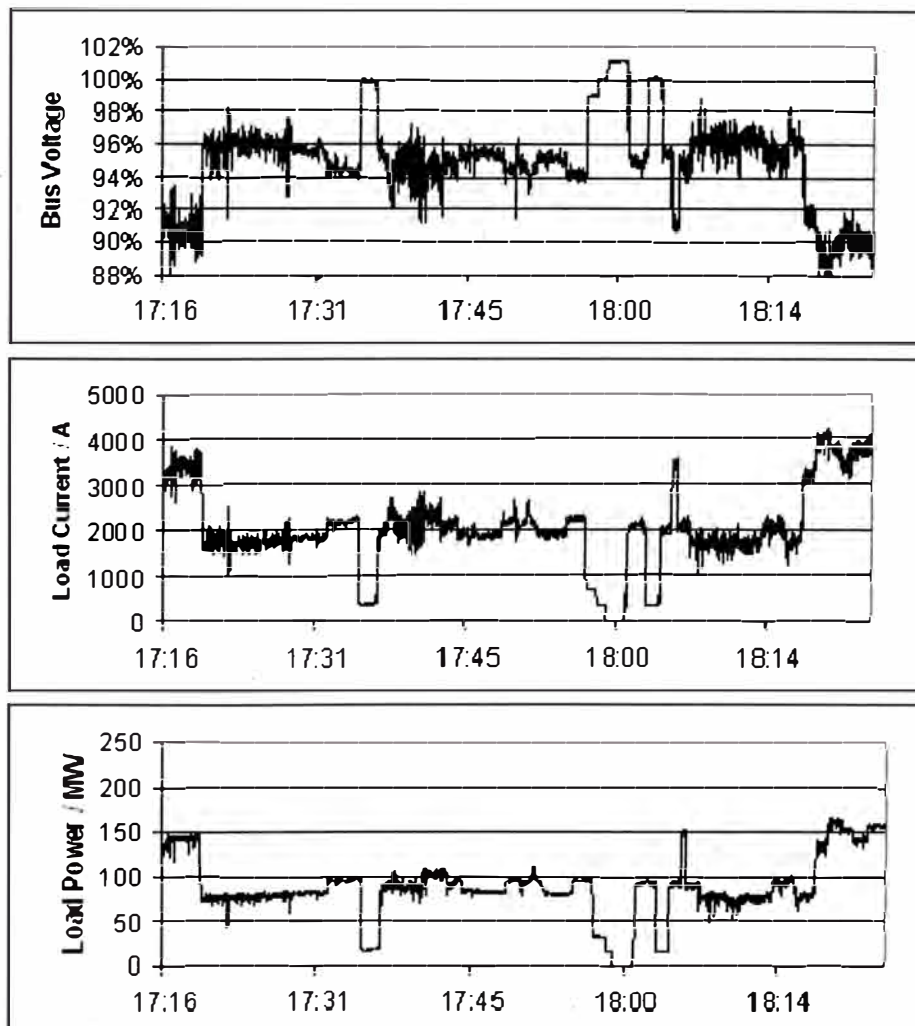


Fig. 2.22: Mediciones en una planta con Horno Eléctrico de Arco sin SVC [6]

Si se atiende al comportamiento de la intensidad (ver Fig. 2.21), su valor para el conjunto de la carga más el compensador se puede poner de forma aproximada como:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{svc})^2}}{E} \dots(4)$$

Donde  $P$  y  $Q$  son, respectivamente, las potencias activa y reactiva demandadas por la carga,  $Q_{svc}$  es la reactiva generada por el SVC y  $E$  es el valor eficaz de la tensión de red. Según este comportamiento, el control del SVC se puede realizar de forma que se busque el valor mínimo de la intensidad.

## 2.6 Comparación de la operación de una planta de acero con y sin SVC

Como hemos visto anteriormente, en una planta que opera con horno eléctrico de arco, los principales efectos en la calidad de la energía son el desbalance de tensión y las perturbaciones. Al instalar un SVC en el sistema, estos problemas se reducen.

En la Fig. 2.22 podemos apreciar mediciones en una planta de producción de acero que opera con horno eléctrico de arco sin SVC, en las cuales se ve claramente las variaciones en la tensión, corriente y de potencia activa.

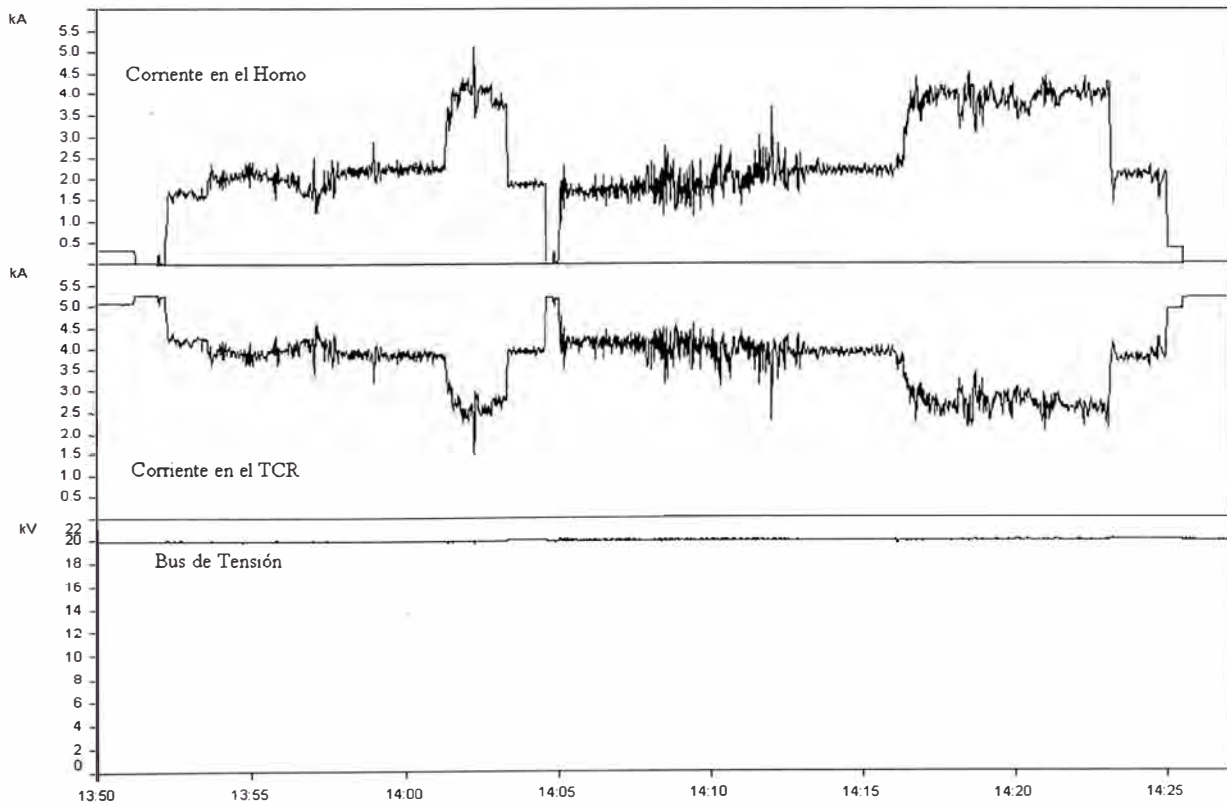


Fig. 2.23: Mejora del perfil de tensiones con el SVC [6]

Al instalar un SVC en el sistema de la planta, el cual utiliza bancos de condensadores fijos además de reactancias controladas por semiconductores, inyecta en la red cantidades de energía reactiva de igual amplitud y signo opuesto a las variaciones de reactivo

demandadas por el horno, con lo cual también inyecta cantidades idénticas en amplitud y de signo opuesto de corriente, dando como resultado que el perfil de tensiones sea completamente estable como podemos ver en la Fig. 2.23.

En la Fig. 2.24 se puede apreciar también lo expresado en el párrafo respecto a la notable mejora en el perfil de tensiones, reduciendo a su vez las fluctuaciones de voltaje y con ello reducir el nivel de Flicker en la planta. Además se aprecia que se incrementa la potencia que se está consumiendo (si lo comparamos con lo mostrado en la Fig. 2.22), lo cual dará la posibilidad de incrementar la producción de la planta a consecuencia de instalar el SVC, tema que analizaremos en mayor detalle en el siguiente punto.

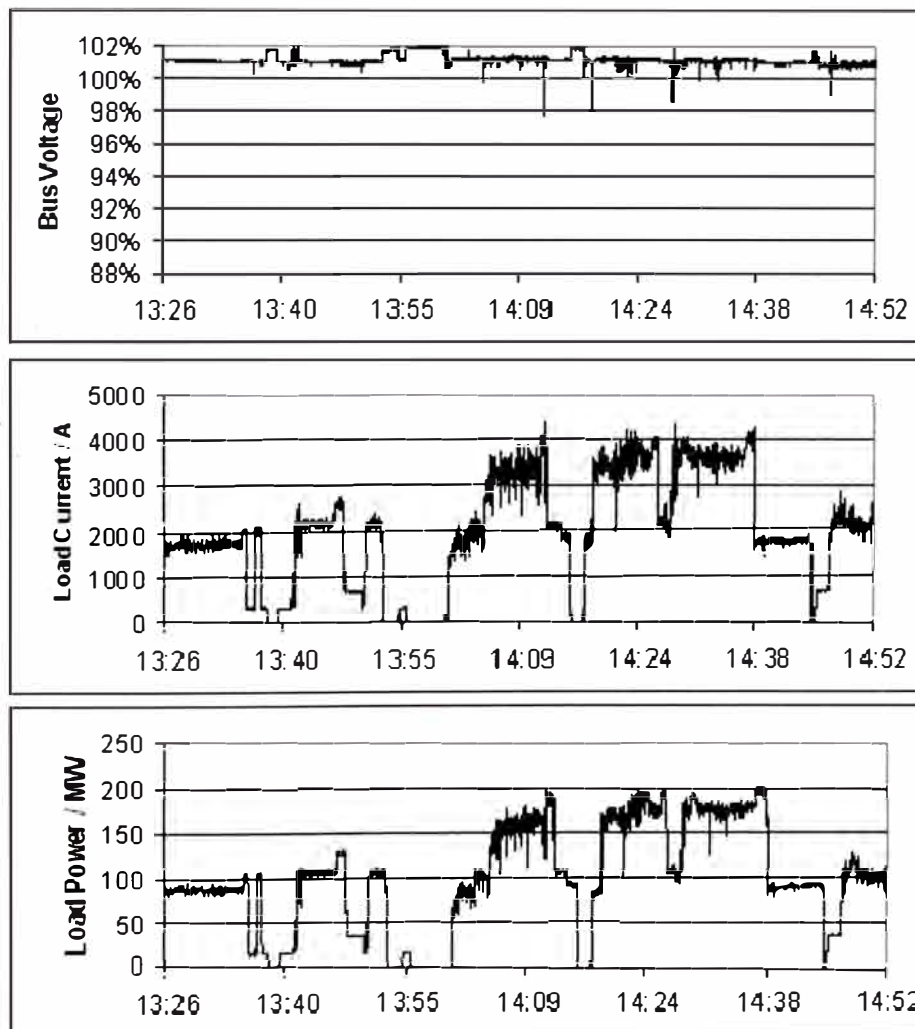


Fig. 2.24: Mediciones en una planta con Horno Eléctrico de Arco con SVC [6]

## 2.7 Incremento de producción en una planta de acero debido al SVC

Hemos visto que al instalar el SVC se estabiliza la tensión en el bus de la carga, pero también con ello se logra incrementar la potencia activa en el horno eléctrico de arco, esto se puede apreciar mejor en la Fig. 2.25, así como el comportamiento de la tensión.

Lo anteriormente expuesto es mucha importancia ya que al tener mayor potencia activa disponible en el horno, este permitirá tener un proceso de fundición del material en menor tiempo y gracias a ello se reducirá el consumo de energía en el proceso (tendremos un ahorro acumulable anualmente), se puede reducir el consumo de los electrodos debido a que estarán menor tiempo expuestos al cortocircuito generado para la fundición del metal (y con ello el costo de sus mantenimiento y repuestos), así como el consumo de material refractario (y su costo). Sin embargo lo más importante, es que al reducir los tiempos del proceso como tal, es que podemos con ello incrementar la producción del horno y por tal la productividad de la planta, ya que podemos tener mayores ciclos de fundición por día y por tal mayor cantidad de toneladas de acero por año (que es el valor de productividad de la planta).

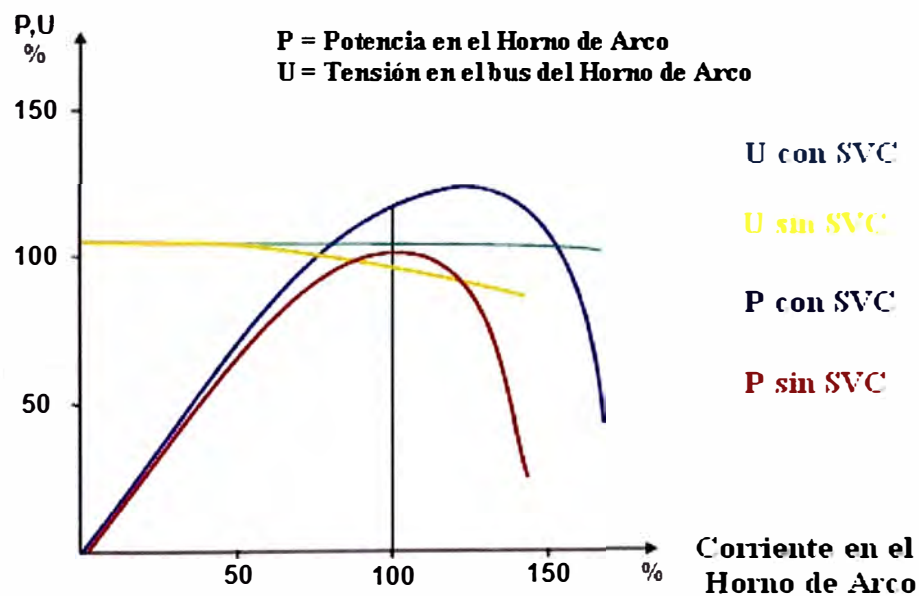


Fig. 2.25: Límites de operación del Horno Eléctrico de Arco con y sin SVC [1]

Evidentemente lo anteriormente expuesto es un análisis hecho desde el punto de vista eléctrico, hay que verificar que las condiciones del horno eléctrico de arco así como del proceso mismo de la planta están preparados para dicho incremento de producción.

## **CAPITULO III**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1 Descripción de la problemática**

La planta de producción de acero objeto del presente informe ejecutó un proyecto de gran envergadura que consistió en instalar un nuevo horno eléctrico de arco de 70t de capacidad en reemplazo de su antiguo horno de 40t (el cual se reutilizará como horno cuchara) con el objetivo de incrementar la producción de la acería de 400000 a 530000t/año en una primera etapa, y a 700000t/año en una segunda etapa. Para ello, adicionalmente solicitó la ampliación de potencia de sus instalaciones de un valor inicial de 50 MVA a 100 MVA, por lo que reemplazó también el transformador de potencia de la subestación principal, el transformador de horno y los equipamientos eléctricos complementarios.

Cuando la empresa productora de acero solicitó dicho incremento de carga, la entidad correspondiente le solicitó que como parte del estudio de implementación del proyecto se evaluarán los efectos que produciría en la red eléctrica el nuevo horno eléctrico de arco, así como los nuevos índices que calidad de energía.

Como era de esperarse, dichos estudios indicaban que los índices de calidad estarían por encima de lo requerido por la NTCSE, por lo cual la empresa se comprometió a evaluar una solución para mitigar dichos efectos una vez que el nuevo horno eléctrico de arco esté operativo y se puedan obtener valores reales de dichos efectos. Justamente el presente informe consiste en determinar la solución óptima para mitigar uno de dichos efectos, en este caso el Flicker.

#### **3.2 Datos de la planta**

A continuación se presentan los datos de la planta de producción de acero objeto de nuestro estudio (el cual opera con un horno eléctrico de arco), condiciones ambientales, datos principales de la operación, detalle de los principales equipos, así como los datos obtenidos en mediciones de calidad de energía referentes a perfiles de tensión y efecto flicker con el horno eléctrico de arco de 70tn en operación.

**Condiciones Ambientales**

Altitud sobre nivel del mar	:	1,000m.
Temperatura Ambiente	:	10 a 35° C
- Promedio en verano	:	22° C
- Promedio en invierno	:	16° C
Humedad Relativa	:	70 a 90%
- Promedio	:	80% +/- 2%
<b>Condiciones en las salas eléctricas</b>		
- Automatización	:	10 a 25° C
- Fuerza	:	10 a 35° C (no condensación)
Nivel de sismicidad	:	Zona 3 (0.4g)

**Datos del sistema eléctrico**

<b>Alta tensión</b>		
- Tensión de operación	:	220kV
- Desviación máxima del nivel de operación	:	+/- 5%
- Nivel de cortocircuito		
Mínimo	:	1200MVA
Máximo	:	1800MVA
Frecuencia	:	60Hz
- Máxima desviación del nivel de operación	:	+/- 0.5%
<b>Transformador de potencia</b>		
- Capacidad	:	100/125MVA ONAN/ONAF
- Tensión de operación	:	220/33kV
- Impedancia del transformador	:	10% (referida a 100MVA)
- Taps de operación	:	+/- 8x1.25%
- Tipo de conexión	:	Ynd11
<b>Sistema de media tensión</b>		
- Tensión de operación	:	33kV
- Desviación máxima del nivel de operación	:	+/- 5%
<b>Nivel de cortocircuito</b>		
- Mínimo	:	545MVA
- Máximo	:	643MVA

**Transformador de Horno Eléctrico de arco**

- Capacidad	:	100/120MVA
- Tensión nominal primaria	:	33kV
- Tensión secundaria	:	0.8-1.4kV
- Impedancia del transformador	:	8% (referida a 100MVA)
- Rango de potencia constante	:	Entre 1.4 y 1.15kV
- Rango de corriente constante	:	Entre 1.15 y 0.8kV
- Número de taps	:	16
- BIL en devanado primario (33kV)	:	200kV

**Reactor de Horno**

- Reactancia a 33kV	:	33.36MVAR
- Tensión de operación	:	33/33kV
- Número de taps	:	6 (0, 40, 50, 70, 85, 100%)

**Datos de la carga (Horno Eléctrico de Arco)**

Capacidad del Horno Eléctrico de Arco	:	70ton
Diámetro interior de la cuba	:	5,300mm
Diámetro interior de los paneles refrigerados	:	5,400mm
Reactancia del sistema secundario del horno	:	3.75mOhm

**Datos de la producción**

Producción anual de acero líquido	:	530,000ton
Horas netas disponibles para la producción	:	6,600h/año
Productividad horaria	:	81.5ton/h
Acero sangrado	:	62.5ton
Tap-to-Tap	:	46min
Temperatura de vaciado	:	1,630° C

**3.3 Mediciones en la red**

A continuación se muestran en gráficas las principales mediciones realizadas en la red respecto a tensión (medición realizada en la barra de 220kV). Potencia Activa, Potencia Reactiva y Efecto Flicker (mediciones realizadas en la barra de 33kV. Esto nos permitirá realizar nuestros análisis en cuanto a los niveles de sobretensiones y perturbaciones para plantear el problema y seleccionar la solución ha implementar. Desafortunadamente no se pudo obtener información disponible acerca de los niveles de distorsión armónica, pero se puede indicar que los valores están claramente por encima de lo indicado en la NTCSE.

A continuación veremos la gráfica obtenida respecto a la tensión

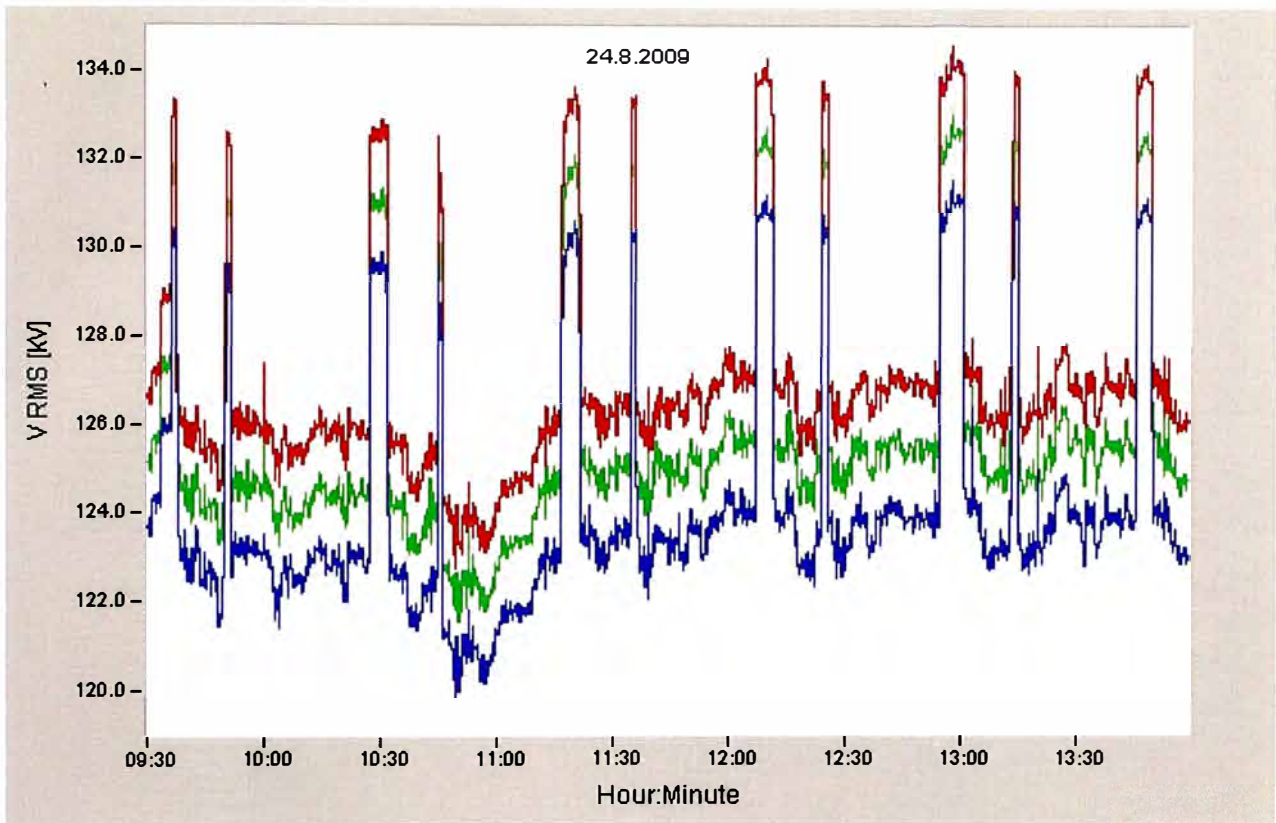


Fig. 3.1: Tensión por Fase sin SVC (en barra de 220kV)

A continuación veremos la gráfica obtenida respecto a la potencia activa

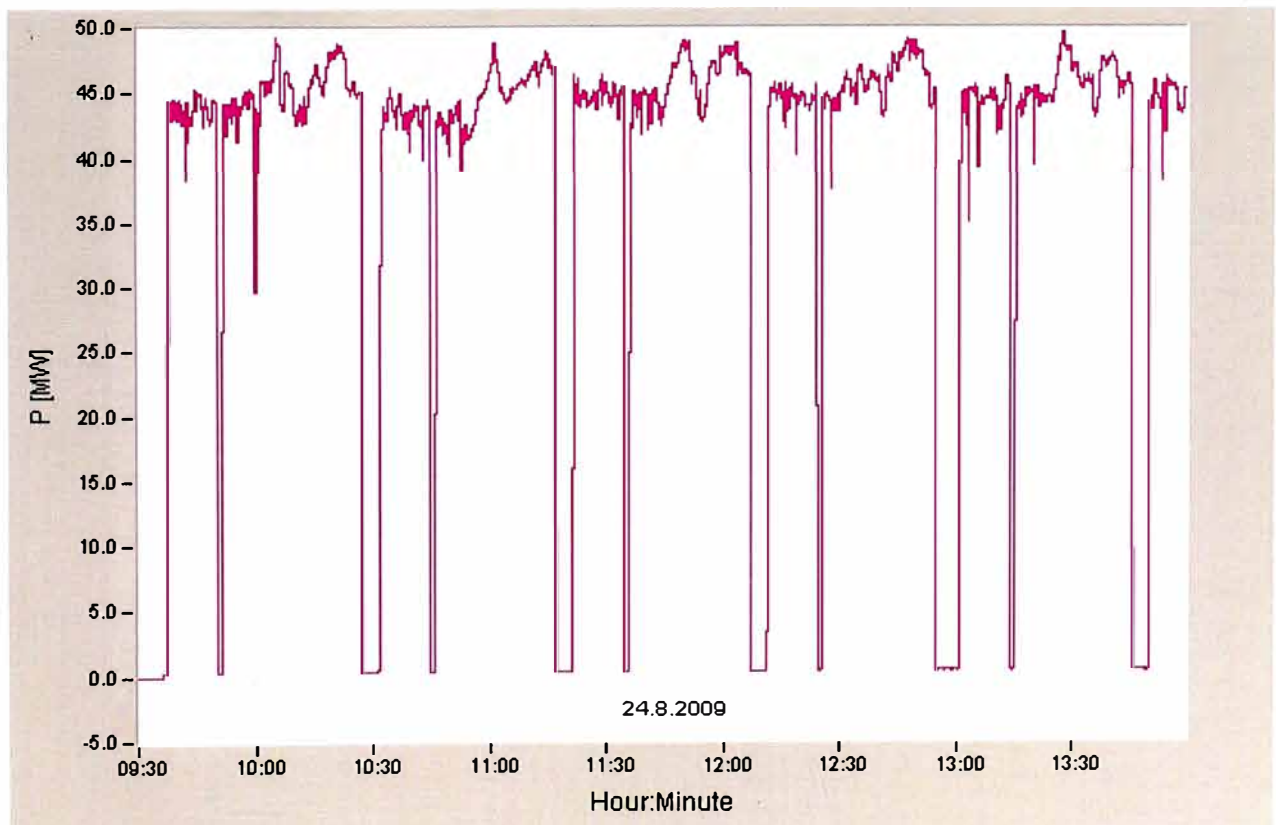


Fig. 3.2: Potencia Activa sin SVC



A continuación veremos la gráfica obtenida respecto a la potencia reactiva

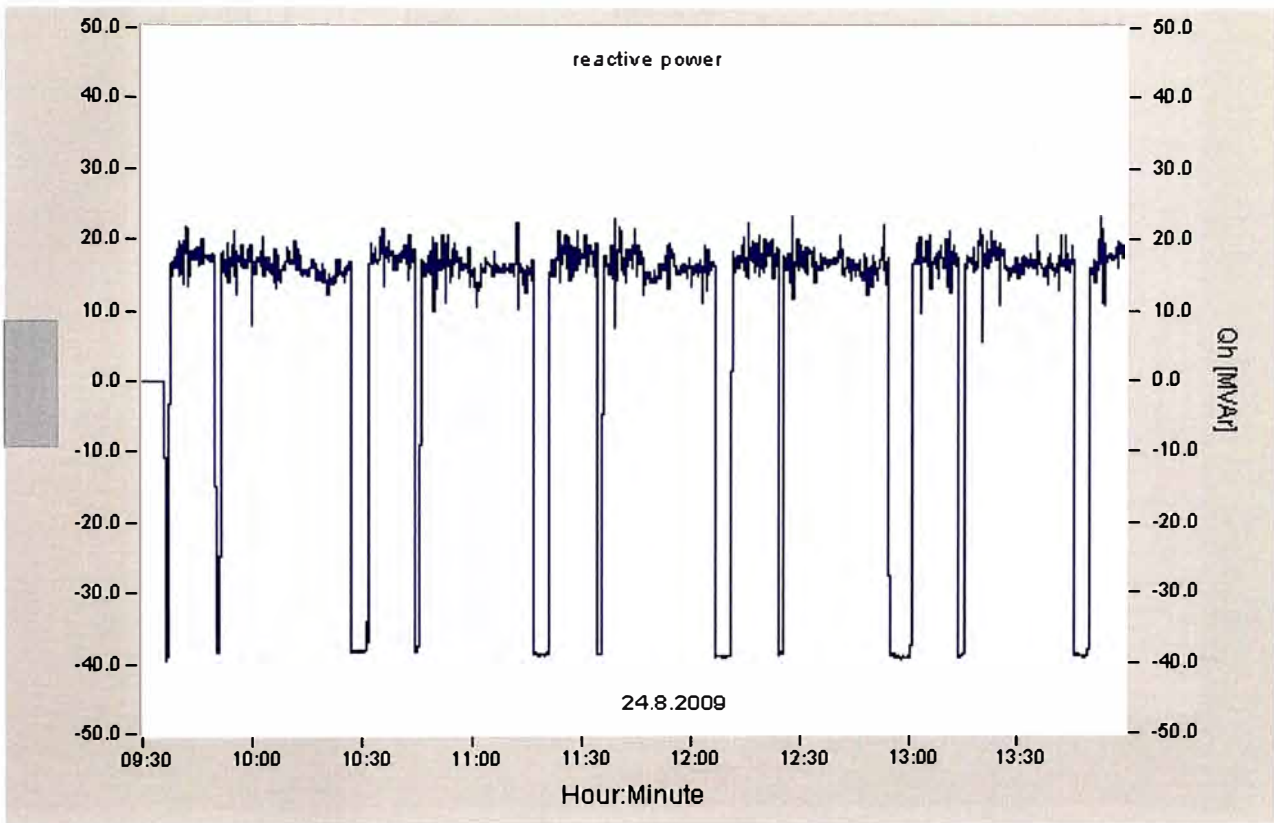


Fig. 3.3: Potencia Reactiva sin SVC

A continuación veremos las gráficas obtenidas respecto a Flícker

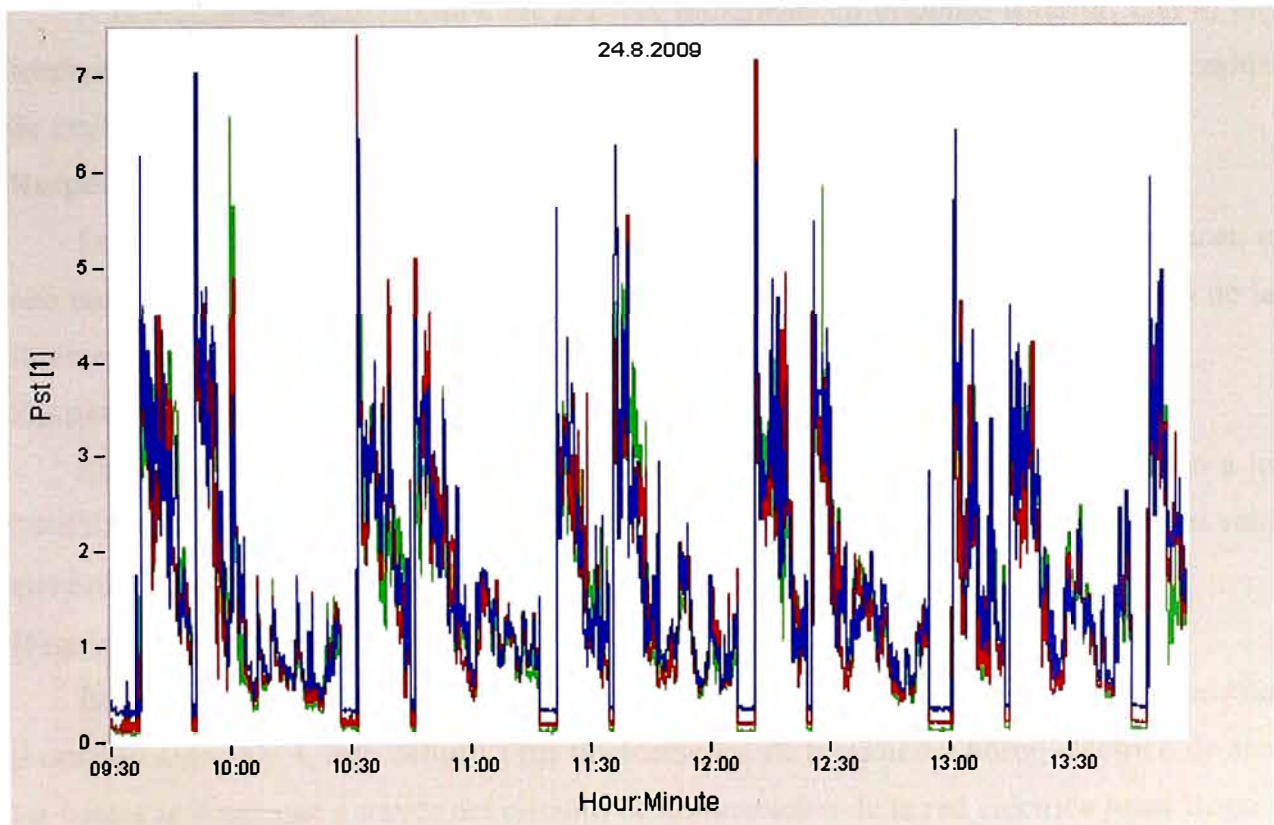


Fig. 3.4: Flícker sin SVC

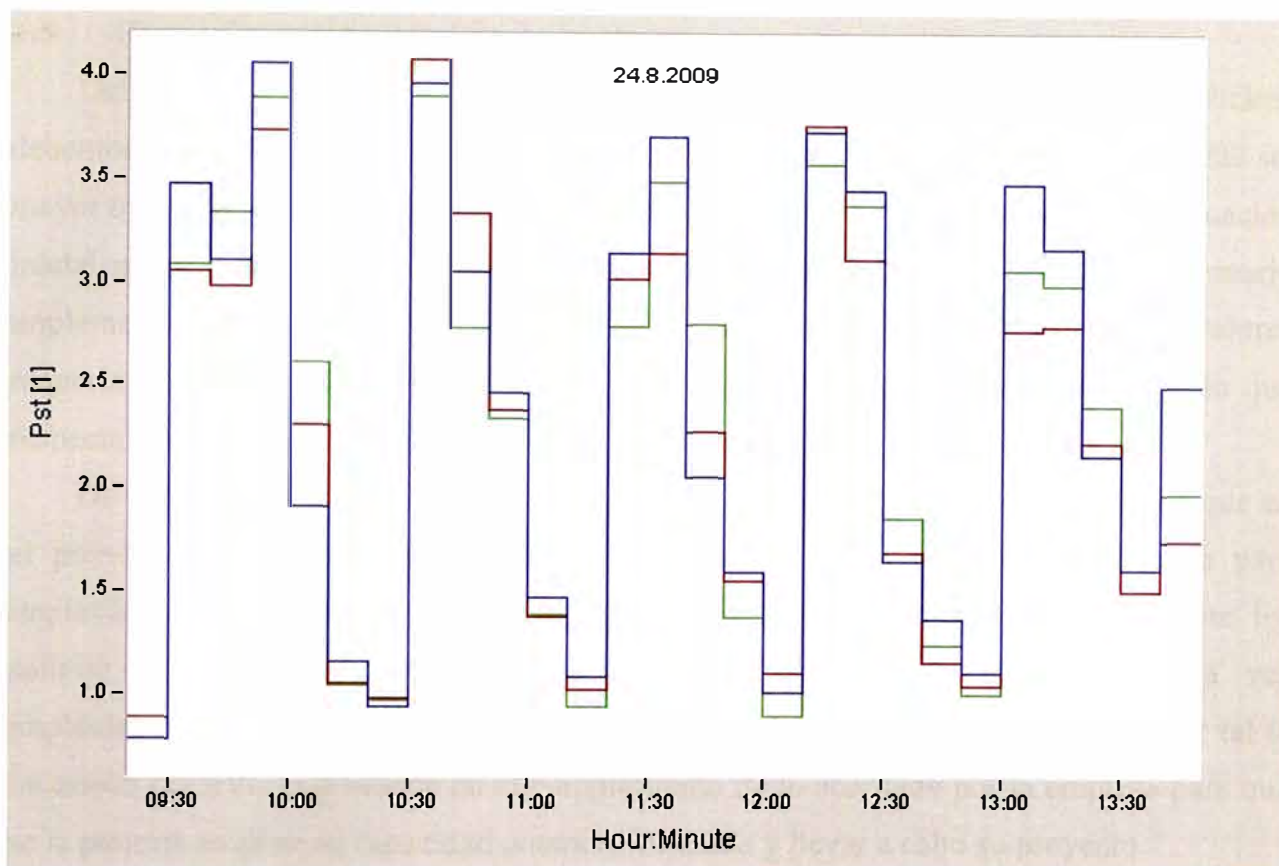


Fig. 3.5: Flícker en 10 minutos sin SVC

### 3.4 Análisis de la Situación Inicial de la planta

A continuación analizaremos las gráficas mostradas en el punto anterior, con lo cual tendremos una visión de lo que ocurre en la planta y podremos revisar si hay la necesidad de implementar alguna solución:

#### Respecto al perfil de tensiones

En la Fig. 3.1 se puede apreciar el desbalance de tensión por fase que se producen en alta tensión (220kV trifásico), el cual está en alrededor de 7%, así como en el caso de las fluctuaciones de tensión estas sobrepasan el 8%.

#### Respecto a la potencia reactiva

En la Fig. 3.3 se puede apreciar que el nivel de potencia reactiva está cercano a los 20MVAR, lo cual ocasiona que el factor de potencia del sistema eléctrico esté en un valor alrededor de 0.9.

#### Respecto al efecto Flícker

En las Fig. 3.4 y 3.5 se aprecia que el nivel de Pst en la planta se encuentra en un valor promedio entre 2 y 4, esto debido a las fluctuaciones de tensión del horno eléctrico de arco las cuales se propagan a través del circuito de alimentación de la red eléctrica hasta llegar a los usuarios de baja tensión., provocando incomodidad a los consumidores residenciales.

### 3.5 Requerimientos eléctricos de la planta

Debido a que el enfoque del presente informe se concentra en los niveles de Flícker, debemos recordar que en el capítulo 2.4 se indica que según la NTCSE, el Pst no debe ser mayor que el valor de la unidad. Por lo anteriormente expuesto es claro que en la situación inicial no se está cumpliendo con lo requerido por la NTCSE, por lo cual es necesario implementar un sistema que permita mitigar este problema y llegar a los valores requeridos, a pesar de que actualmente dicha norma se encuentra suspendida en lo que respecta a los niveles de perturbaciones.

De otro lado, si bien es cierto aún la NTCSE está suspendida hay que recordar que en el punto 3.1 indicamos que cuando la empresa solicitó el incremento de carga para implementar su proyecto de ampliación de capacidad, la entidad correspondiente les solicitó que evaluarán los efectos producidos con el nuevo horno y que a vez implementaran una solución, a lo cual la empresa productora de acero accedió. Por tal la inversión del SVC está basada en el cumplimiento de lo acordado por la empresa para que se le permita ampliar su capacidad potencia instalada y llevar a cabo su proyecto.

En conclusión, teniendo en cuenta lo anterior así como el punto 3.2 lo que esperamos tener como valores en la planta son:

En 220kV (PCC)

- Desbalance de tensión:  $\leq 2\%$
- Factor de potencia:  $> 0.96$
- Fluctuaciones de tensión:  $\leq 5\%$
- Distorsión de armónicos de tensión:  $THD \leq 3\%$
- Pst:  $\leq 1$

## CAPITULO IV

### METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

#### 4.1. Comparación entre alternativas de solución

En el punto 2.4 analizamos las posibles soluciones para reducir los niveles del efecto Flícker en una planta de producción de acero con horno eléctrico de arco, sin embargo también descartamos desde el inicio algunas de ellas como por ejemplo el aumento de la potencia de cortocircuito de la red ya que exige inversiones muy elevadas, o reducir la potencia del horno, que a su vez reduce la productividad de la planta, lo cual obviamente no es una opción para los responsables de la producción y menos aún para los accionistas de la empresa. Por lo anteriormente expuesto, en general para mejorar la calidad de energía en este tipo de plantas, las opciones mas atractivas se reducen al uso de circuito de filtros (con condensadores) o al uso de un SVC. En la Fig. 4.1 podemos apreciar una comparación de las ventajas entre las dos alternativas a seleccionar:


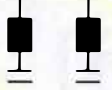
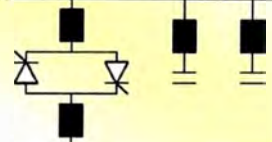
	<b>Circuito de Filtros</b> 	<b>SVC</b> 
<b>Inversión</b>	\$	\$\$
<b>Mejoramiento del Factor de Potencia</b>	SI	yes
<b>Reducción de la Distorsión Armónica</b>	SI	yes
<b>Sobrecompensación</b>	SI	yes
<b>Estabilización de voltaje</b>	no	yes
<b>Reducción de Flícker</b>	no	yes, up to 2 times

Fig. 4.1: Comparación entre alternativas de compensación [1]

#### 4.2. Selección de la solución a implementar

Analizando la figura anterior y considerando que nuestro objetivo es la reducción del efecto flícker, la alternativa que mas se adecua es el SVC, sin embargo mas adelante revisaremos los beneficios como consecuencia de utilizar esta solución tanto en lo técnico como también en lo económico, así como la comparación con respecto a la NTCSE.

### 4.3. Cálculo del SVC

Según la UIE (International Union for Electricity Applications) el nivel de Flicker producido por un Horno Eléctrico de Arco durante el proceso de fundición de acero puede ser calculado por la siguiente fórmula:

$$P_{st} = K_{st} \cdot \frac{S_{SCF}}{S_{SCN}} \dots (5)$$

$$S_{SCF} = \frac{V^2}{X_{SCF}} \dots (6)$$

Donde:

- $K_{st}$  = Coeficiente experimental comprendido entre 48 y 85, y recomendable igual a 70.
- $S_{SCF}$  = Potencia de cortocircuito del horno, periodo de fundición.
- $S_{SCN}$  = Potencia de cortocircuito de la red a nivel del PCC.
- $X_{SCF}$  = Suma de reactancias (ver Fig. 4.2).

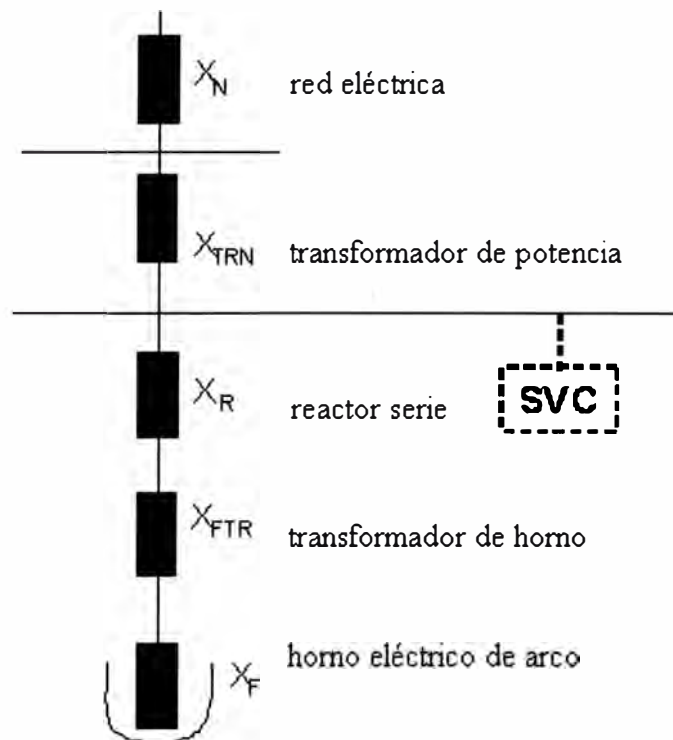


Fig. 4.2: Reactancias en el sistema [3]

Sin el SVC instalado tenemos:

$$S_{SCF} = \frac{U_{REF}^2}{X_N + X_{TRN} + X_R + X_{FTR} + X_F} \dots (7)$$

Con el SVC instalado, se mantiene constante la tensión en el bus de la carga, motivo por el cual las reactancias aguas arriba no tienen una influencia significativa en la operación del horno eléctrico de arco, por lo cual un cálculo más realista de la potencia de

cortocircuito del horno con SVC sería según la siguiente fórmula, en la que justamente se eliminan aquellas reactancias que no tienen influencia en el sistema:

$$S_{SCF} = \frac{U_{REF}^2}{X_R + X_{FTR} + X_F} \dots(8)$$

Ahora empecemos a calcular cada uno de los valores de las reactancias considerando los valores que tenemos en el punto 3.1 (datos de la planta):

- Cálculo de la reactancia de la red:

$$X_N = \frac{33^2}{1200} = 0.908\Omega$$

- Cálculo de la reactancia del transformador de potencia:

$$X_N = \frac{10\% \cdot 33^2}{100} = 1.089\Omega$$

- Cálculo de la reactancia del reactor serie (en el tap 85%):

$$X_R = 85\% \cdot \frac{33^2}{36.69} = 25.23\Omega$$

- Cálculo de la reactancia del transformador de horno (con el tap a 1kV):

$$X_{FTR} = \frac{8\% \cdot \frac{1.09^2}{1.0^2} \cdot 33^2}{100} = 1.04\Omega$$

- Cálculo de la reactancia del horno:

$$X_N = 0.00375 \cdot \frac{33^2}{1.0^2} = 4.08\Omega$$

Ahora considerando la fórmula (8) tenemos:

$$S_{SCF} = \frac{U_{REF}^2}{X_R + X_{FTR} + X_F} = \frac{33^2}{25.23 + 1.04 + 4.08}$$

$$S_{SCF} = 36\text{MVA}$$

Para calcular los valores de Pst de la planta sin SVC se debe considerar el mínimo y el máximo del nivel de cortocircuito, para ello usamos la ecuación (5).

Considerando el nivel de cortocircuito mínimo:

$$Pst = Kst \frac{S_{SCF}}{S_{SCN \min}} = 70 \cdot \frac{36}{1200} = 2.1$$

Considerando el nivel de cortocircuito máximo:

$$Pst = Kst \frac{S_{SCF}}{S_{SCN \max}} = 70 \cdot \frac{36}{1800} = 1.4$$

Ahora, para calcular los valores de Pst de la planta con SVC, debemos considerar que un buen diseño del SVC puede reducir el Flícker producido por la operación del horno eléctrico de arco hasta en un factor de 2, con lo cual resultan los valores mostrados en la Tabla N° 4.1:

Tabla N° 4.1: Resultados de los cálculos de Pst

Nivel de cortocircuito	Pst sin SVC	Pst con SVC
1200MVA	2.1	1.05
1800MVA	1.4	0.7

### Cálculo del TCR

En la práctica, no necesariamente se obtendrán los valores de Pst calculados, ya que para ello el diseño del SVC tendría que ser perfecto para reducir el flícker en un factor de 2; realmente este factor puede estar alrededor de 1.7. Considerando lo anterior, necesitamos compensar la capacidad de potencia del horno eléctrico afectado por dicho factor, con lo cual podemos calcular la capacidad del TCR:

$$S_{TCR} = 1.7 S_{EAF} = 1.7 \times 100 = 170\text{MVAR}$$

Del mismo modo, tomando en consideración la capacidad del TCR hacemos el diseño del circuito de filtros, el cual usualmente requiere el 90% de la capacidad del TCR, sin embargo para tener un criterio de margen de seguridad de 10% consideraremos para el sistema una compensación del 100% del TCR.

$$S_{QFC} = S_{TCR} = 170\text{MVAR}$$

Debido a que el circuito de filtros consiste en un circuito de inductancias y capacitores conectados en serie y sintonizados a una determinada frecuencia que permita evitar cualquier estado de resonancia, haremos la sintonización preliminar mostrada en la Tabla N° 4.2 considerando el tamaño del TCR. En el Anexo A podemos encontrar un diagrama unifilar del SVC propuesto considerando dichos valores.

Tabla N° 4.2: Resultados del cálculos de los filtros de armónicas

Participación Armónica	Frecuencia de sintonización	Compensación MVAR
2da	120Hz	40
3era	180Hz	40
4ta	240Hz	30
5ta	300Hz	60

#### 4.4. Evaluación Económica

Mediante un proceso logístico se convocó a los principales proveedores de equipos SVC con experiencia en plantas con horno eléctrico de arco, como por ejemplo ABB, Siemens, Areva, entre otros.

Haciendo el análisis de las alternativas presentadas se llega a la conclusión que la inversión requerida para este proyecto es mostrada en la Tabla N°4.3.

Tabla N° 4.3: Inversión requerida para la instalación del SVC

ITEM	DESCRIPCIÓN	INVERSIÓN EN US\$
1	Consultoría y estudios de operatividad, protección, etc.	38 000,00
2	Equipamientos eléctricos (SVC y equipos en 33kV)	3 985 000,00
3	Obras civiles	872 000,00
4	Servicios para la puesta en marcha del sistema	42 000,00
5	Otros (logística, transportes locales, etc.)	27 000,00
	Monto Total de Inversión en US\$	4 964 000,00

Desafortunadamente para el presente análisis no tenemos la información suficiente disponible para hacer una correcta evolución de retorno de inversión. Adicionalmente, debido a que la NTCSE está actualmente suspendida y que por tal no se está penalizando por concepto de Flícker (foco del presente informe) no tenemos como calcular el retorno de inversión de la instalación del SVC debido a que actualmente no hay cargos o facturaciones por ese concepto.

De otro lado, tal como indicamos antes, esta inversión está justificada ya que el objetivo principal del proyecto es lo acordado por la empresa para poder ampliar su capacidad potencia instalada, por lo cual realmente la inversión del SVC se tendría que incluir en la evaluación económica de todo el proyecto de ampliación de la planta, y no solo con respecto a la reducción del efecto flícker específicamente.

Sin embargo, mas adelante veremos que es posible justificar la inversión del SVC por otros beneficios económicos para la planta (lo cual discutiremos en el punto 5.2).



## CAPITULO V

### PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 5.1 Resultados Obtenidos

Una vez realizada la inversión e instalado el SVC, se procedió a realizar mediciones en la planta de acero para verificar que los resultados vayan de acuerdo a lo esperado en los capítulos anteriores. A continuación se presentan las gráficas de mediciones correspondientes a:

- Tensión
- Potencia Activa
- Flícker
- Potencia Reactiva

Hay que indicar que las mediciones de tensión se realizaron en la barra de 220kV, mientras que las mediciones de Potencia Activa, Potencia Reactiva y Efecto Flícker en la barra de 33kV.

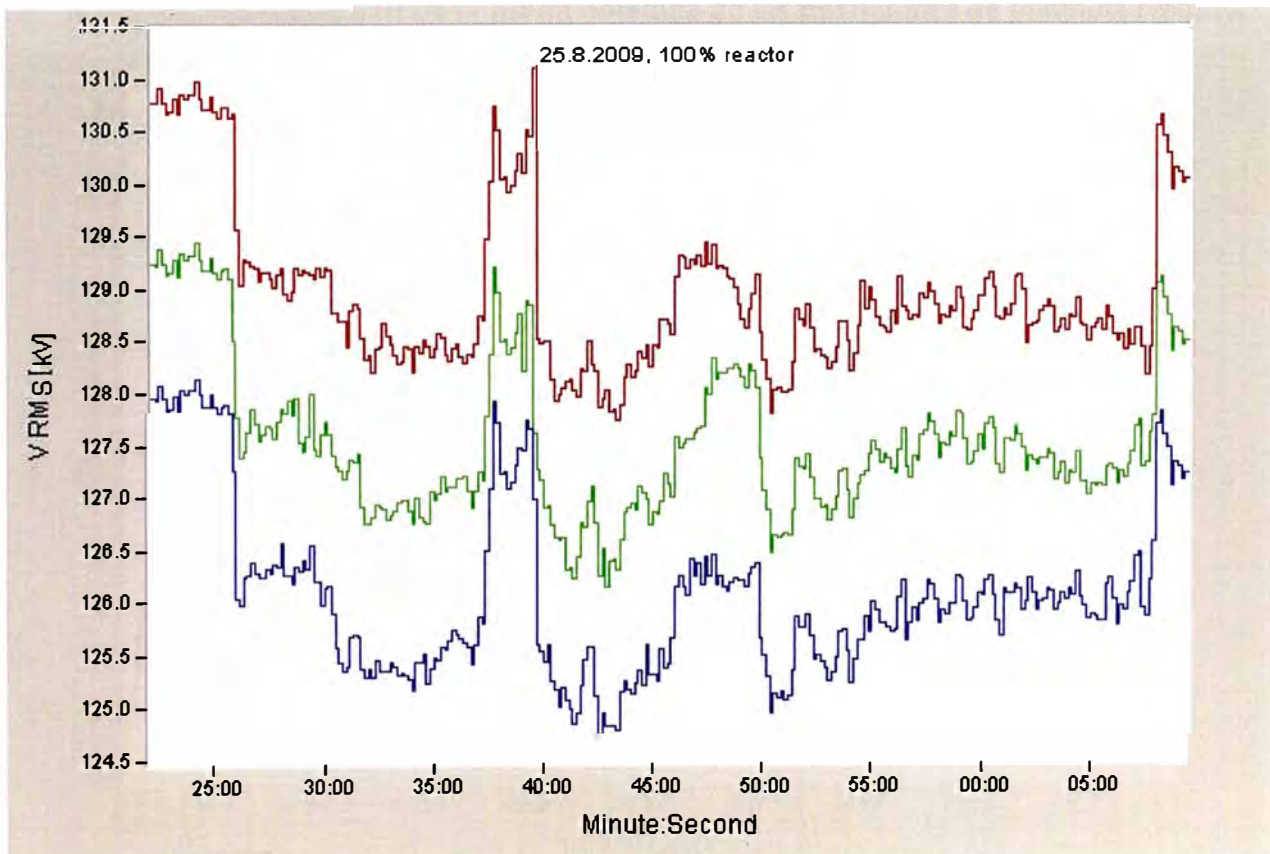


Fig. 5.1: Tensión por Fase con SVC (en barra de 220kV)

A continuación mostramos la figura obtenida de las mediciones de potencia activa

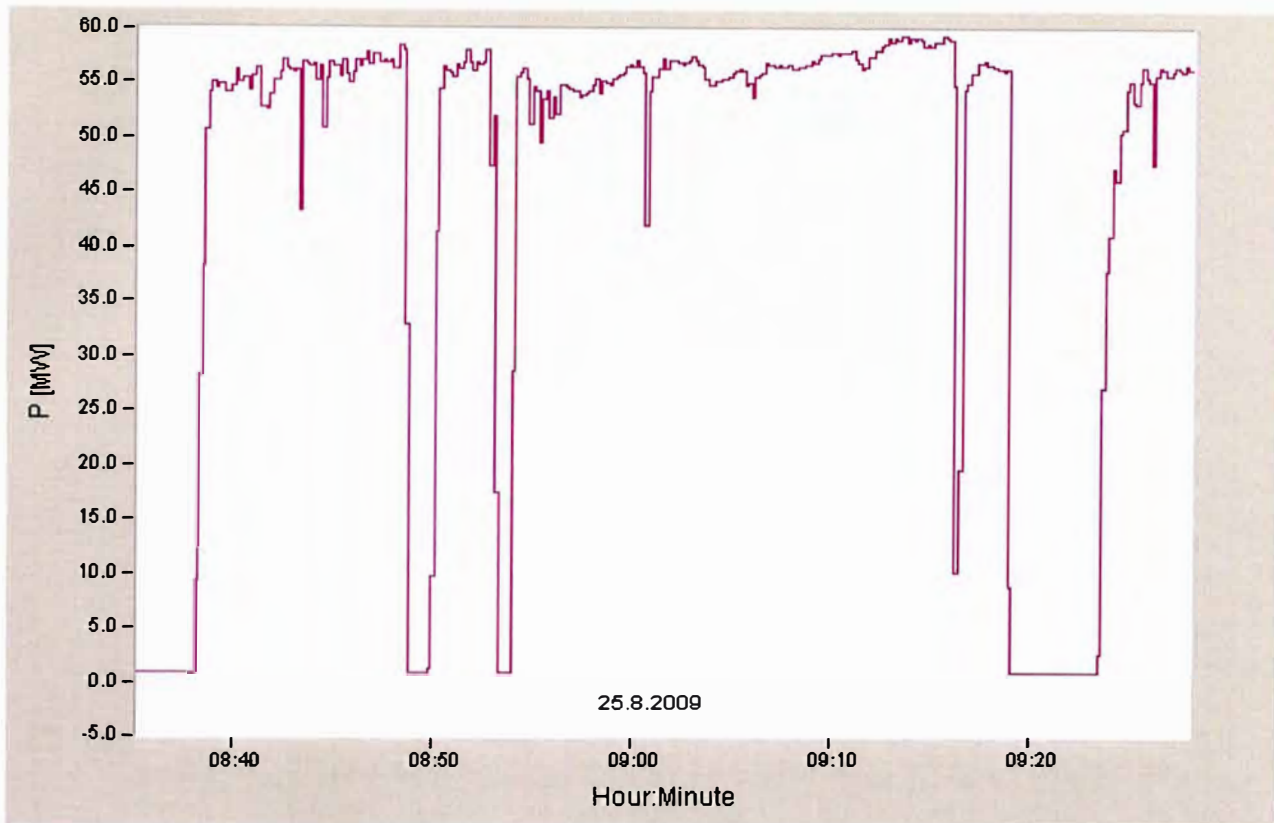


Fig. 5.2: Potencia Activa con SVC

A continuación mostramos la figura obtenida de las mediciones de potencia reactiva

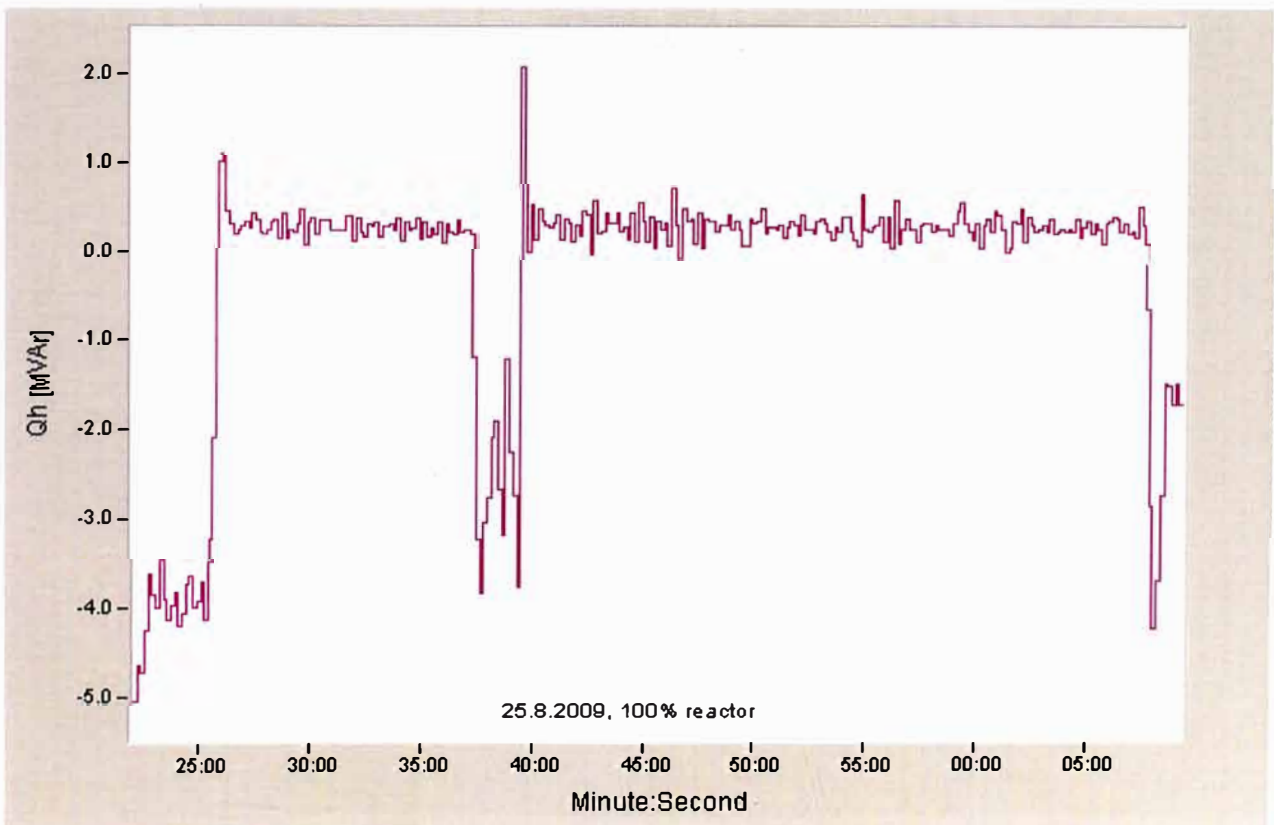


Fig. 5.3: Potencia Reactiva con SVC

A continuación mostramos las figuras obtenidas de las mediciones de Flícker

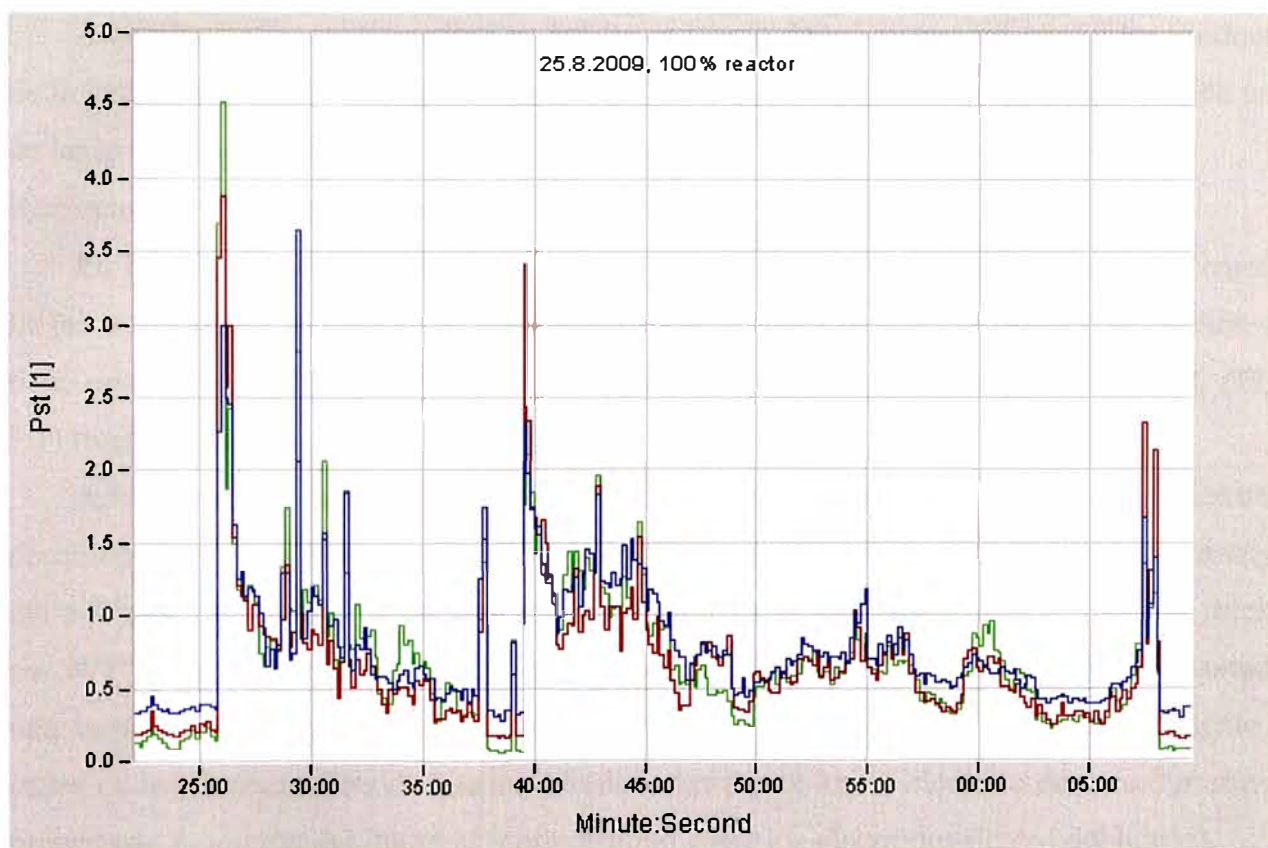


Fig. 5.4: Flicker con SVC

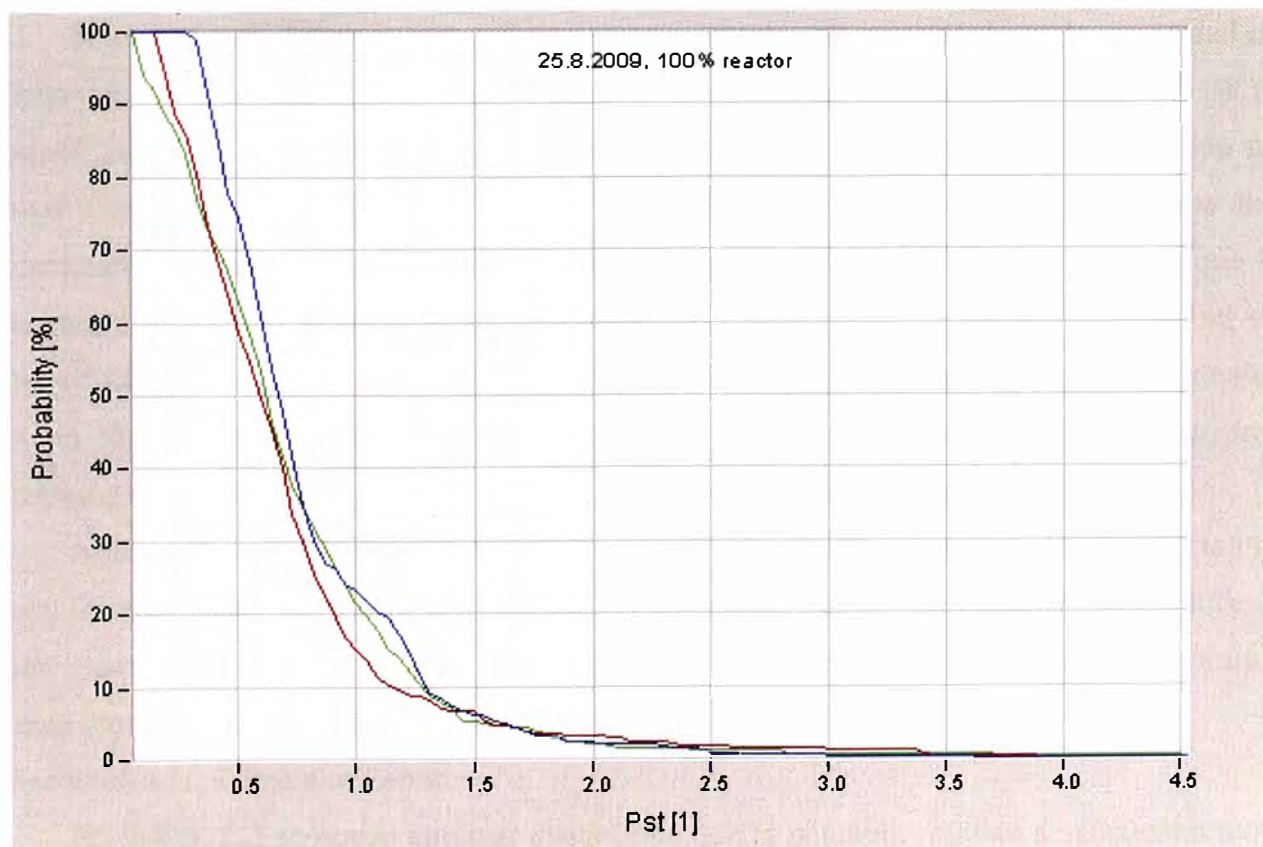


Fig. 5.5: Flicker con SVC

## 5.2 Análisis de los resultados

A continuación, analizaremos en detalle cada uno de los resultados obtenidos producto de la instalación del SVC sugerido en la planta, lo cual hemos podido apreciar en cada una de las gráficas en el punto 5.1.

Respecto al perfil de tensiones:

En la Fig. 5.1 se puede apreciar que las curvas del perfil de tensiones en alta tensión llegan a valores de acuerdo a lo esperado ya que para el caso del desbalance de tensión se tiene un valor de 1.5% (por debajo del 2% esperado) lo cual antes de instalar el SVC (Fig. 3.1) llegaba a ser de casi 7%.

Además, en la misma Fig. 5.1 se puede observar que las fluctuaciones de tensión decrecen considerablemente y se puede concluir que están por el nivel de 2.3% (por debajo del 5% esperado), obviamente esta mejora considerable con respecto a la situación inicial sin SVC donde se tenían fluctuaciones del orden de 8% (ver Fig. 3.1), dará como resultado una importante reducción en los niveles de flicker, los cuales se generan justamente a causa de las fluctuaciones de tensión ocasionadas por el horno eléctrico de arco durante el proceso de fundición del material (cortocircuito entre los electrodos dentro del horno).

Respecto a la potencia activa:

Se puede apreciar en la Fig. 5.2 que hay un incremento importante en la capacidad de potencia activa en el transformador de horno eléctrico de arco, la que supera los 55 MW (y puede llegar incluso a 60 MW), a comparación de los 45 MW que teníamos cuando no estaba instalado el SVC (ver Fig. 3.2). Lo anteriormente indicado es uno de los puntos mas importantes de nuestro análisis, ya que es esta mayor potencia activa disponible la que le permitirá al horno eléctrico de arco culminar cada proceso de fundición del material en menor tiempo que antes de instalar el SVC, con lo cual se lograrán beneficios adicionales como incrementar las toneladas de acero producidas lo cual puede permitir mayores ingresos económicos a la empresa, o de lo contrario menores consumos de energía.

Adicionalmente es importante señalar que al reducir los tiempos de fundición (tap to tap) se tendrá también menor desgaste de los electrodos del horno (en donde se produce el arco para fundir el material), así como también de los refractarios, lo cual nos permitirá tener menores costos operativos por estos conceptos.

Respecto a la potencia reactiva:

En la Fig. 5.3 se puede apreciar claramente que la potencia reactiva se encuentra muy cercana al valor de cero, a comparación de los casi 20 MVAR en que se encontraba antes

de instalar el SVC (ver Fig. 3.3). Con estos resultados se puede concluir que el factor de potencia mejora notablemente de 0.9 (antes de instalar el SVC) al valor de 0.99, excelente valor para mitigar cualquier inconveniente relacionado con pérdidas en la red o facturaciones por este concepto.

Respecto al nivel de distorsión armónica:

Desafortunadamente aún no tenemos valores reales disponibles para presentar en este informe, sin embargo podemos indicar que el THD de tensión está por debajo del valor esperado de 3%, lo cual mitiga cualquier riesgo de daño en los equipamientos de la planta.

Respecto al efecto Flicker:

En la Fig. 5.4 se aprecia la mejora en el valor del Pst con respecto a lo mostrado en la Fig. 3.4 (antes de instalar el SVC), sin embargo se aprecia también que si bien es cierto en gran parte del intervalo de tiempo de medición el valor del Pst está por debajo de la unidad ( $Pst < 1$ ), hay una parte en el mismo intervalo de tiempo en que se encuentra por encima de la unidad ( $Pst > 1$ ); esto era de esperarse ya que como dijimos en su momento, en la práctica el SVC no logra reducir el Flicker con un factor exacto de 2, además de que los cálculos son realizados con los valores máximo y mínimo de la potencia de cortocircuito de la red.

Por lo dicho antes, sirve de mucho analizar los resultados de la Fig. 5.5, en la cual vemos los valores acumulados en que varía el Pst a lo largo de la medición, de ahí verificamos que el Pst tiene valores de la siguiente forma:

- $Pst > 1.50$  en el 6% de todo el intervalo de medición
- $Pst > 1.15$  en el 10% de todo el intervalo de medición
- $Pst > 1.00$  en el 20% de todo el intervalo de medición

De lo anterior concluimos que encontramos el valor esperado de  $Pst < 1$  en el 80% del total del intervalo de medición, que es finalmente el resultado de interés para el presente informe. Sin embargo, al no lograr un valor menor a la unidad en todo momento tendremos que revisar mas en detalle este hecho con lo que especifica la NTCSE., así como también tomando otras consideraciones.

### **5.3 Comparación entre los niveles de Flicker obtenidos con los indicados en la Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos**

Revisando la Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos (que como indicáramos en su momento se encuentra temporalmente suspendida) referente al efecto Flicker encontramos lo siguiente:

En el punto 5.3.2 (Indicadores De Calidad), la NTCSE se indica: Se consideran los siguientes indicadores de calidad:

Para Flicker: El Índice de Severidad por Flicker de corta duración (Pst) definido de acuerdo a las Normas IEC.

En el punto 5.3.3 (Tolerancias), la NTCSE indica:

Flicker.- El Índice de Severidad por Flicker (Pst) no debe superar la unidad ( $Pst < 1$ ) en Muy Alta, Alta, Media ni Baja Tensión. Se considera el límite:  $Pst = 1$  como el umbral de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia por una muestra específica de población.

Entonces, si bien es cierto la NTCSE establece el límite de  $Pst = 1$ , no indica si esto aplica para el 100% del intervalo de medición (como en otros países la tolerancia se aplica para un porcentaje de dicho intervalo).

En nuestro caso particular el sistema cumplirá con estar por debajo de la unidad ( $Pst < 1$ ) en el 80% de los intervalos de medición, entonces será importante clarificar que es lo que la NTCSE solicite cuando entre en vigencia nuevamente y con ello mitigar cualquier riesgo de penalización por parte de las entidades a cargo del tema, ya que de lo contrario se tendría que evaluar que solución dar al caso y con ello probablemente se reducirían o minimizarían los beneficios obtenidos por instalar el SVC (como por ejemplo el incremento en la capacidad de producción, ya que una de las formas de reducir el efecto Flicker es reducir la potencia en el horno, tal como vimos en el punto 2.4). .

Adicionalmente hay que considerar que los equipos de medición de Flicker según la norma IEC 61000-4-15 pueden tener un nivel de tolerancia permisible de 5%, lo cual también debe ser tomado en cuenta al momento de hacer los análisis de cumplimiento de la norma.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- La instalación de un SVC en una planta de producción de acero que opera con horno eléctrico de arco permite mejorar los indicadores de Calidad de Energía del sistema, tanto para el caso de la tensión como para el caso de las perturbaciones en la red (distorsión armónica y Flícker).
- En lo que respecta al perfil de tensiones, en nuestro caso el SVC nos permitió reducir los niveles de desbalance de tensión por fase a 1.5%, así como de las fluctuaciones de tensión a 2.3%. Esto evitará daños en distintos equipos ocasionados por las sobretensiones en la red.
- En lo que respecta a la potencia reactiva, el SVC nos permitió reducirla a un valor muy cercano a cero (0.1MVAR) y con ello obtener un factor de potencia muy elevado (0.99), reduciendo así las pérdidas en la red.
- En lo que respecta al efecto Flícker (enfoque del presente informe), se concluye que en la práctica un SVC convencional puede reducir el valor de Pst hasta un factor cercano a 2 (usualmente puede estar entre 1.7 y 1.8), lo cual no necesariamente permite que el sistema llegue a valores de Pst por debajo de la unidad durante todo el proceso de producción. En nuestro caso, se cumple con dicho límite hasta en el 80% de los intervalos de tiempo de medición.
- El SVC es utilizado usualmente para mejorar los perfiles de tensión de la planta y reducir las perturbaciones en la red, sin embargo debido a que el SVC permite incrementar la capacidad de potencia en el horno eléctrico de arco nos permite también obtener beneficios adicionales para la planta, ya que al tener mayor potencia en el horno, el proceso de fundición se completará en menores tiempos y con ello se puede incrementar la producción de material final de la acería hacia el siguiente proceso (laminación) que podría permitir mayores ingresos económicos a la empresa si es que se incrementa también la producción del producto final de la planta siderúrgica, o de lo contrario tendremos menores consumos de energía (y con ello menores facturaciones

por este concepto), así como también menor desgaste de los electrodos y refractarios de horno en cada proceso de fundición (y con ello menores costos y tiempos de mantenimiento).

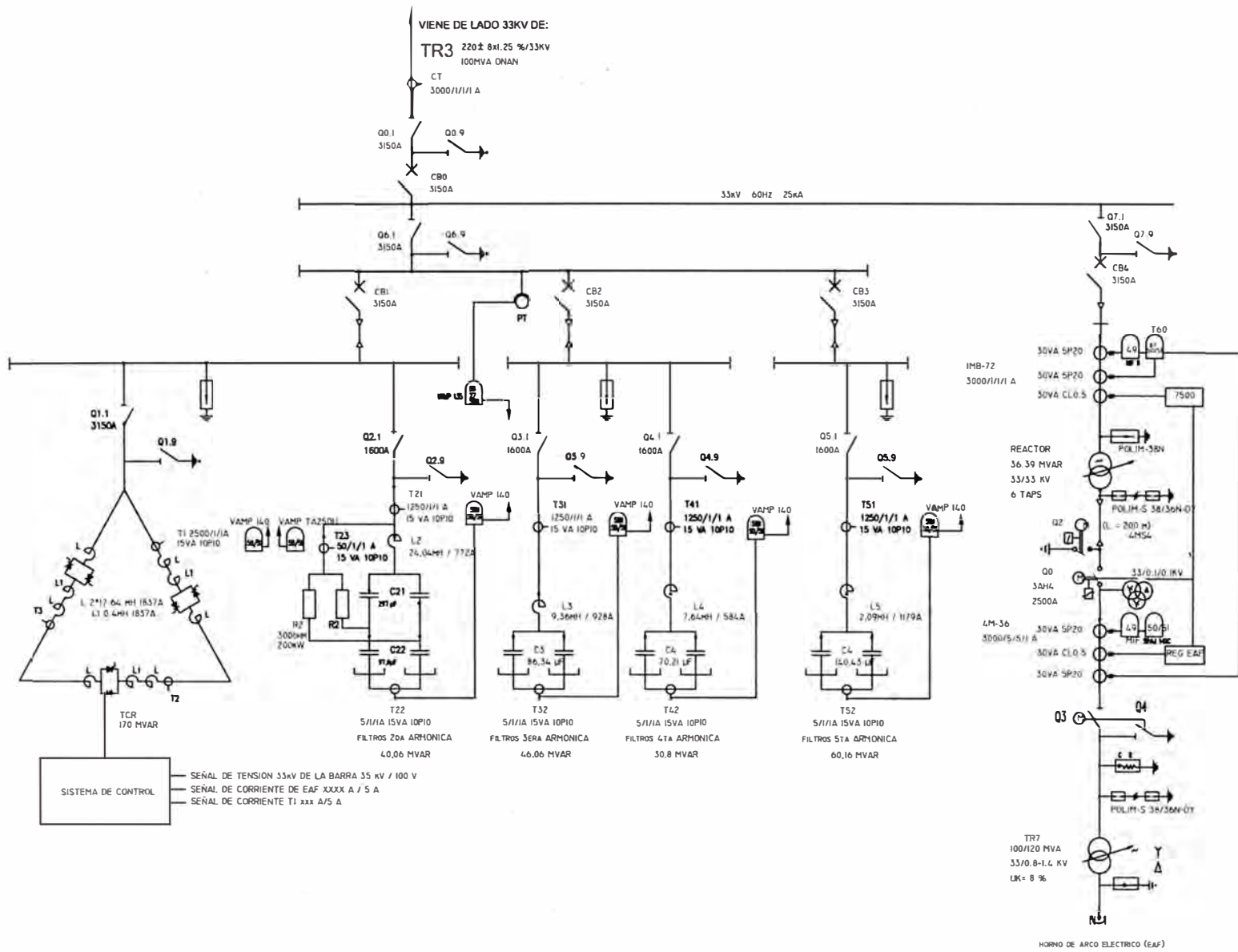
### **RECOMENDACIONES**

- Es importante realizar nuevas mediciones en las que la impedancia del sistema cambie con respecto a las impedancias que hemos tomado en cuenta, básicamente considerando taps distintos en el reactor del horno y el transformador del horno, para determinar el comportamiento de los índices de calidad (sobretudo el caso de flícker).
- Con respecto a los niveles de Pst obtenido, hay que considerar la necesidad de dialogar con las entidades supervisores del sistema eléctrico y de las normativas para mitigar cualquier riesgo de penalización al momento de entrar nuevamente en vigencia la NTCSE.
- Se deben hacer las pruebas correspondientes para verificar si es posible aprovechar la mayor potencia disponible para el horno y definir el nuevo tiempo tap to tap que se requiere para completar el proceso de fundición de material con el horno al 100% de carga, (lo cual debe ser menor que los 46 minutos antes de instalar el SVC).
- Se debe analizar si los demás procesos de la planta (reducción directa y laminación) están en capacidad de aprovechar la mayor capacidad de producción que puede tener la acería para definir si es posible ampliar la producción del producto terminado.
- En caso no se pudiese realizar lo indicado en el punto anterior, una forma de aprovechar esta situación favorable es que se puede independizar los cronogramas de mantenimiento preventivo de la acería con respecto a la planta de laminación, debido a que se puede prever la producción de palanquilla suficiente es menor tiempo que el originalmente programado y con ello tener actividades de mantenimiento mas exhaustivas para mejorar la performance de la acería.
- En caso de que finalmente se requiera reducir el Pst a valores por debajo de la unidad en más del 80% del intervalo de medición, será necesario analizar otras alternativas similares en el mercado. Actualmente existen proveedores que indican tener soluciones que permiten reducir hasta en un factor de 6 (seis) los valores del Pst (con la sistema conocido como STATCOM), a diferencia del SVC que permite reducirlo hasta un factor cercano a dos. Otros proveedores indican tener soluciones que siempre garantizarán tener valores de Pst por debajo de la unidad (como el caso de SVC Light).



## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**ESQUEMA UNIFILAR DEL SVC**



## BIBLIOGRAFIA

- [1] “Increased productivity with Large Static Var Compensator”  
SIEMENS AG - Dr. Dieter Fink - 1997
- [2] “SVC Systems with Light Triggered Thyristor Valves”  
SIEMENS AG – Industrial Solutions & Services - 2003
- [3] “Diseño de un SVC para la mitigación de flícker producido por hornos de arco”  
CIGRE - J. L. Agüero - 2007
- [4] “Calidad del servicio eléctrico - Flícker”  
Universidad Simón Bolívar - Ing. José Gregorio León - 2005
- [5] “SVC Light: a powerful flicker mitigator”  
ABB Power Technologies – 2005
- [6] “EAF Solutions”  
SIEMENS AG - 2006
- [7] “SVC for maintaining of power quality in the feeding grid in conjunction with an Electric Arc Furnace in a steel plant” CIRED – 2005
- [8] “Voltage criteria in steel plant networks”  
53<sup>rd</sup> Electric Furnace Conference - 1995
- [9] “AC arc Furnaces Flicker measurement without and with a SVC system”  
Department of electrical engineering University of Vigo - MP Donsion
- [10] “Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos” Perú  
Ministerio de Energía y Minas – Dirección General de Electricidad – 1997
- [11] “Energy and Environmental savings in steel making by means of SVC”  
ABB Power Systems AB / AC Systems Division
- [12] “Simulación, estudio y ajuste del sistema de control de un SVC  
Mediante el programa ATP /EMTP”  
Miguel Montilla, Escuela de Ing. Eléctrica - Universidad de los Andes – 2002
- [13] “Parámetros eléctricos de operación del horno de arco”  
L.R.Jaccard – 2002

- [14] “Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva”  
Camilo Carrillo / José Cidrás – 2003
- [15] “Harmonic and Arc Transient Overvoltage Analyses Furnace Power Systems”  
S. R. Mendis, Member, IEEE, and A. Gonzalez, Senior Member, IEEE – 1992