

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



## **COMPENSACIÓN REACTIVA EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO MEDIANTE EL USO DE SVC LIGHT**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**EDUARDO LENKE ILLANES CHACÓN**

**PROMOCIÓN  
2010- II**

**LIMA – PERÚ  
2014**

# **COMPENSACIÓN REACTIVA EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO MEDIANTE EL USO DE SVC LIGHT**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente informe a toda mi familia: Danilo, Edy, Melissa, Tammy y la más pequeña Valeria, por todo el apoyo que me dieron en todos estos años. Tambien a una persona muy especial que es mi enamorada Paola, gracias por todo. Finalmente a mi asesor el Ing. Roberto Ramirez por su invaluable aporte para realizar este informe.

## SUMARIO

En la actualidad la necesidad de contar con energía de calidad es de vital importancia para la industria pues mejora su productividad y se reducen costos de operación y mantenimiento, asimismo la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) pone a disposición nuestra los indicadores necesarios para asegurar una energía lo más limpia posible de perturbaciones.

En el caso específico de la industria siderúrgica se tienen los hornos de arco eléctrico, que por ser cargas grandes y de naturaleza estocástica, son generadores de muchas perturbaciones en la red, impactando así de manera negativa en la calidad de la energía del sistema en su zona de influencia.

A medida que los hornos de arco eléctrico son de mayor potencia estos desequilibran mucho más la red, esto sumado a que en la actualidad el crecimiento demográfico está poblando zonas industriales, amerita entonces una solución que esté a la altura de las circunstancias.

En el presente informe se aborda el caso específico de la compensación reactiva en hornos de arco eléctrico usando un FACTS conocido como SVC light, el cual minimiza el impacto negativo que tiene esta carga sobre la red que lo alimenta. Se incluyen ejemplos exitosos de su utilización en hornos de arco eléctrico alrededor de mundo y se recomienda su eventual uso en el Perú.

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I</b> .....	3
<b>FACTS EN SISTEMAS DE POTENCIA</b> .....	3
1.1 Introducción .....	3
1.2 Definición .....	3
1.3 Clasificación .....	4
1.4 Tipos de FACTS .....	7
1.4.1 SVC (Static Var Compensator).....	7
1.4.2 STATCOM (Static Compensator).....	9
1.4.3 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitors).....	12
1.4.4 SSSC .....	13
1.4.5 SCCL (Short Circuit Current Limiter).....	14
1.4.6 DPFC (Dynamic Power Flow Controller).....	15
1.4.7 UPFC (Unified Power Flow Controller).....	17
1.4.8 IPFC (Interline Power Flow Controller).....	17
1.4.9 GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller).....	18
1.4.10 Dispositivos Back-to-Back .....	19
1.5 Introducción al SVC Light .....	20
<b>CAPITULO II</b> .....	23
<b>EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO: DEFINICIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO</b> .....	23
2.1 Introducción .....	23
2.2 Principio de funcionamiento del horno de arco eléctrico. ....	23
2.3 Componentes eléctricos principales del horno de arco eléctrico .....	25
2.3 Introducción a las perturbaciones eléctricas generadas por los hornos de arco eléctrico .....	31
<b>CAPITULO III</b> .....	34
<b>PERTURBACIONES ELECTRICAS OCASIONADAS POR LA OPERACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELECTRICO</b> .....	34
3.1 Introducción .....	34

3.2	Descripción de fenómenos eléctricos ocasionados por la operación del horno de arco eléctrico .....	34
3.2.1	Transitorios .....	34
3.2.2	Sobrevoltaje .....	36
3.2.3	Subvoltaje .....	36
3.2.4	Variaciones de voltaje de corta duración .....	37
3.2.5	Interrupciones de corta duración .....	38
3.2.6	Hundimientos de voltaje (sags) .....	38
3.2.7	Subidas de voltaje (swells) .....	39
3.2.8	Desbalance .....	40
3.2.9	Fluctuaciones de voltaje .....	41
3.2.10	Flicker .....	44
3.2.11	Impulsos .....	44
3.2.12	Distorsiones y perturbaciones de la forma de onda .....	45
3.3	Impacto en la red de alimentación del horno de arco eléctrico .....	49
3.3.1	Consumo de potencia reactiva .....	49
3.3.2	Flicker .....	50
3.3.3	Armónicas .....	51
3.3.4	Desbalance de fases .....	51
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>53</b>
<b>EL SVC LIGHT .....</b>		<b>53</b>
4.1	Introducción .....	53
4.2	Principio de funcionamiento .....	53
<b>CAPITULO V .....</b>		<b>65</b>
<b>ANALISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SVC LIGHT EN DIVERSAS PARTES DEL MUNDO .....</b>		<b>65</b>
5.1	Introducción .....	65
5.2	Casos reales con SVC Light .....	65
5.2.1	Acería Uddeholm Tooling AB en Hagfors, Suecia .....	65
5.2.2	Acería Trierer Stahlwerk en Trier, Alemania .....	69
5.2.3	Acería Gerdau en Charlotte, USA .....	72
5.2.4	Acería Zhangjiagang Pohang Co, China .....	76
5.2.5	Acería Outokumpu, Finlandia .....	78
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>80</b>
<b>EVENTUAL IMPLEMENTACIÓN DEL SVC LIGHT EN EL PERU .....</b>		<b>80</b>
6.1	Introducción .....	80

6.2	Cargas variables en el SEIN .....	80
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>86</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>87</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>92</b>
	<b>DIAGRAMA UNIFILAR PLANTA ACEROS AREQUIPA CON SVC CONVENCIONAL .</b>	<b>92</b>
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>94</b>
	<b>EXTRACTO DE INFORMES DIARIOS DEL COES .....</b>	<b>94</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>98</b>

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Perú se tiene la necesidad de contar con energía limpia de perturbaciones, los responsables de que esto suceda son todos los agentes involucrados en el proceso de energía eléctrica, desde los generadores hasta los usuarios finales. Es por esto que en el caso de la industria siderúrgica, que posee hornos de arco eléctrico, al ser un usuario final con una carga tan variable, este usuario en particular debe instalar el equipo de compensación reactiva apropiado para mitigar el impacto negativo que tiene sobre la red de alimentación.

El presente informe se focaliza en un tipo de solución FACTS como es la implementación del SVC Light en hornos de arco eléctrico, en donde se muestra conceptos claves de funcionamiento de un horno de arco eléctrico, las perturbaciones que causa sobre la red que lo alimenta y el uso e importancia del SVC Light.

El objetivo de este informe es:

- a) Mostrar que mediante el uso de un SVC Light se logra compensar (mitigar) de manera satisfactoria la energía reactiva durante todo el ciclo de trabajo del horno de arco eléctrico, mitigando así su impacto en la red de alimentación.

### **Justificación**

La necesidad y los beneficios de contar con una energía de calidad según la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE).

Es imposible modificar la naturaleza de funcionamiento del horno de arco eléctrico, que al ser una carga grande y estocástica siempre va a generar perturbaciones en la red que lo alimenta, por ello se requiere la implementación del SVC Light para mitigar este impacto.

### **Metodología**

Para el desarrollo del presente informe se describen todos los tipos de FACTS que se tienen en la actualidad, se recopiló información del funcionamiento de un horno de arco eléctrico, se revisó normas y cursos de calidad de la energía para ver como los hornos de arco eléctrico impactan negativamente en la red de alimentación, también se recopiló información del SVC Light que es un producto de ABB, el cual detalla los beneficios de su implementación para cargas como hornos de arco eléctrico. Se revisaron casos reales de la implementación del SVC Light en hornos de arco eléctrico en diversas partes del mundo y como este equipo de compensación reactiva mitiga exitosamente las



perturbaciones en la red de alimentación. Finalmente se dan recomendaciones para su eventual uso en el Perú.

### **Motivación**

Comprender la importancia de los sistemas de compensación para su aplicación en las instalaciones de hornos de arco eléctrico.

Actualmente la necesidad de contar con una energía limpia es básica pues se ve reflejada en menores costos de operación y mantenimiento, esto hace que las empresas opten cada vez por soluciones nuevas e innovadoras que estén a la altura de las circunstancias.

### **Limitación**

Para el análisis de la necesidad del proyecto se utilizó resultados obtenidos e informes elaborados por ABB.

### **Estructura de la presentación**

El presente informe está organizado de la siguiente forma:

Capítulo I:

Definición y descripción de los diferentes tipos de FACTS.

Capítulo II:

Definición y principio de funcionamiento de los hornos de arco eléctrico

Capítulo III:

Perturbaciones eléctricas generadas por la operación del horno de arco eléctrico

Capítulo IV:

El SVC Light: definición y principio de funcionamiento

Capítulo V:

Ejemplos reales de la implementación del SVC Light en diversas partes del mundo

Capítulo VI:

Eventual implementación del SVC Light en el Perú.

Conclusiones y recomendaciones

# CAPITULO I

## FACTS EN SISTEMAS DE POTENCIA

### 1.1 Introducción

La variedad de cargas en el mercado de la electricidad y la creciente demanda en los últimos años, han provocado que los sistemas eléctricos se saturen; en ese sentido, siendo muy complicado la implementación de nuevos circuitos de transmisión redundantes, es necesario que los sistemas de potencia trabajen lo más cercanamente posible a sus límites térmicos.

Sin embargo, los límites de transmisión se constituyen en las restricciones prácticas para llegar a las condiciones de mayor utilización de los sistemas de transmisión.

En ese sentido, la operación del sistema eléctrico en estas condiciones límite trae consigo un comportamiento con mayores índices de riesgo.

Las redes actuales de transmisión de corriente alterna no fueron concebidas en su momento para poder controlar fácilmente la tensión y el flujo de energía en un mercado liberalizado, el resultado es que en ellas aparecen problemas de control tanto en régimen permanente, como ante condiciones transitorias. El desarrollo de los sistemas FACTS (Flexible AC Transmission Systems), basados en la electrónica de alta potencia, ofrece una solución eficiente en costo y que ha sido probada durante varios años con resultados exitosos.

### 1.2 Definición

El término FACTS engloba la totalidad de sistemas basados en la electrónica de alta potencia que se utilizan para la transmisión de corriente alterna.

En general los FACTS pueden ser utilizados para incrementar la capacidad y margen de estabilidad de los sistemas de transmisión, mejorar el comportamiento dinámico de los sistemas de transmisión y mejorar la calidad de energía. Sus principales cualidades son la compensación de la potencia reactiva, el control de tensión y el control de flujo de potencia. [1]

Debido a los dispositivos de electrónica de potencia que utilizan, los FACTS tienen una velocidad de respuesta mucho mayor en comparación con las soluciones tradicionales de compensación reactiva mediante la conmutación mecánica o transformadores de desfaseamiento. Además cuentan con diferentes opciones de control que ofrecen flexibilidad y multifuncionalidad.

Las principales aplicaciones de los FACTS son:

Control de flujo de potencia

Incremento de la capacidad de transmisión

Control de tensión

Compensación de potencia reactiva

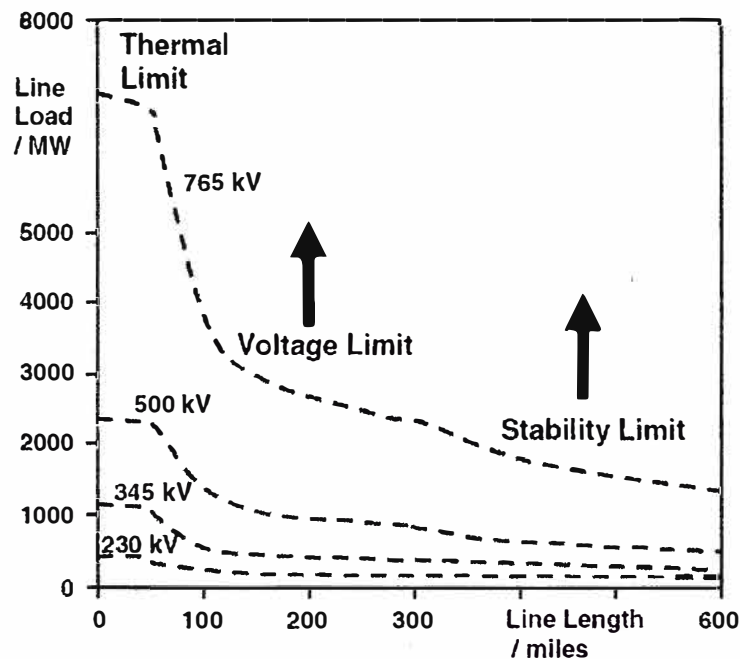
Mejora de la estabilidad en el sistema eléctrico

Mejora de la calidad de la energía

Mitigación del efecto flicker

Mejora del comportamiento eléctrico en interconexiones de sistemas eléctricos de potencia.

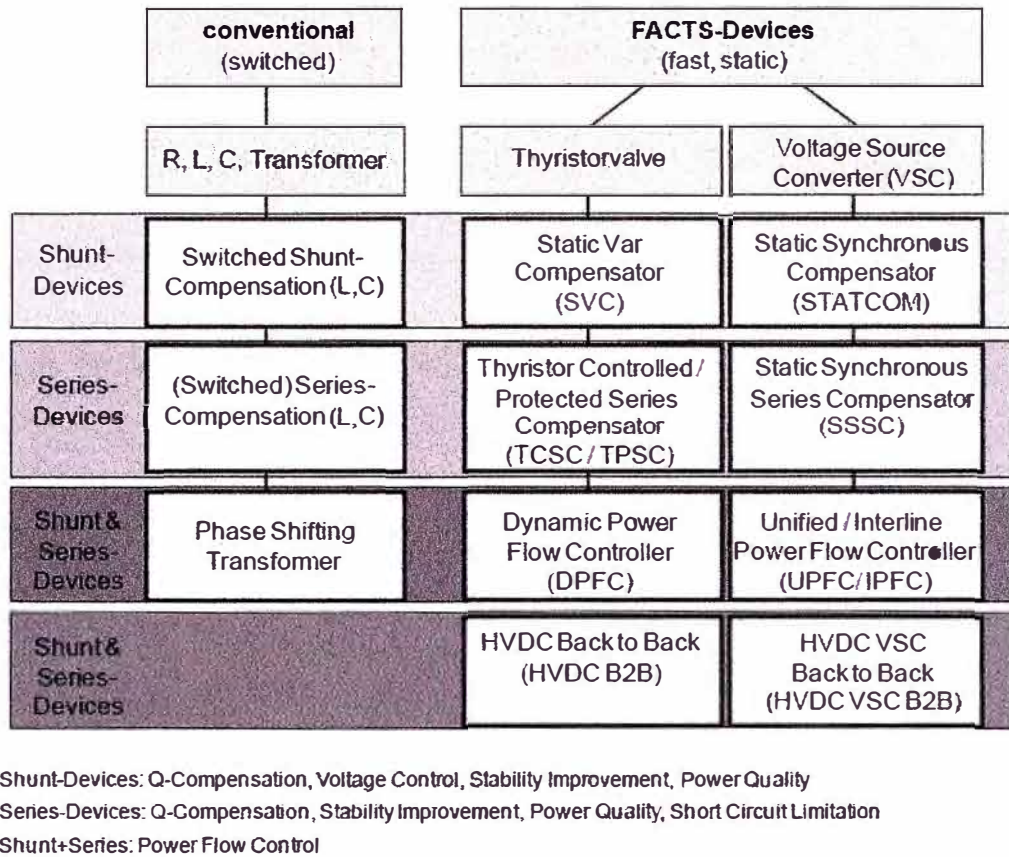
En todas las aplicaciones se debe de hacer un estudio técnico económico que justifique la inversión de este tipo de solución. La Fig.1.1 muestra la idea básica para el uso de FACTS en sistemas de transmisión. El uso de líneas para la trasmisión de potencia activa está limitado por los límites térmicos de la línea, en este escenario el control de tensión y mejora de la estabilidad se logra usando diferentes tipos de FACTS.



**Fig. 1.1 Límites de operación para líneas de transmisión en diferentes niveles de tensión. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

### 1.3 Clasificación

El aumento de la capacidad de los dispositivos de electrónica de potencia ha conducido al desarrollo de diferentes tipos de FACTS. La Fig.1.2 muestra una serie de equipos de compensación reactiva separados en convencionales y los de tipo FACTS. [2]



**Fig.1.2 Resumen de principales dispositivos FACTS. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

La columna de la izquierda agrupa a los dispositivos convencionales como lo son resistencias, inductancias o capacitancias que son conmutadas mecánicamente, también se incluye a los transformadores de desfase.

Los FACTS también incluyen a estos elementos en su diseño pero involucran válvulas de conmutación de electrónica de potencia o convertidores electrónicos para realizar la conmutación y posibilitar el control.

Los FACTS de la columna izquierda utilizan válvulas de tiristores o convertidores, tecnología que es muy conocida y ha sido probada durante varios años, asimismo tienen pocas pérdidas debido a su alta frecuencia de conmutación.

Los FACTS de la columna derecha son de tecnología más avanzada e involucran a las fuentes de tensión controladas (VSC: Voltage Source Converters), que usan para la conmutación los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) o los IGCT (Insulated Gate Comnutated Thyristors). Esta fuente de tensión controlada provee una tensión controlada en fase y amplitud gracias a la conmutación de los IGBT e IGCT mediante modulación PWM (Pulse Width Modulation). Debido a la modulación en altas frecuencias se logra tener menores emisiones de armónicos e inclusive poder compensar perturbaciones eléctricas en la red. La desventaja es que mientras más alta sea la

frecuencia de conmutación, las pérdidas serán mayores, en base a esto se consideran diseños especiales como por ejemplo enfriamiento con agua.

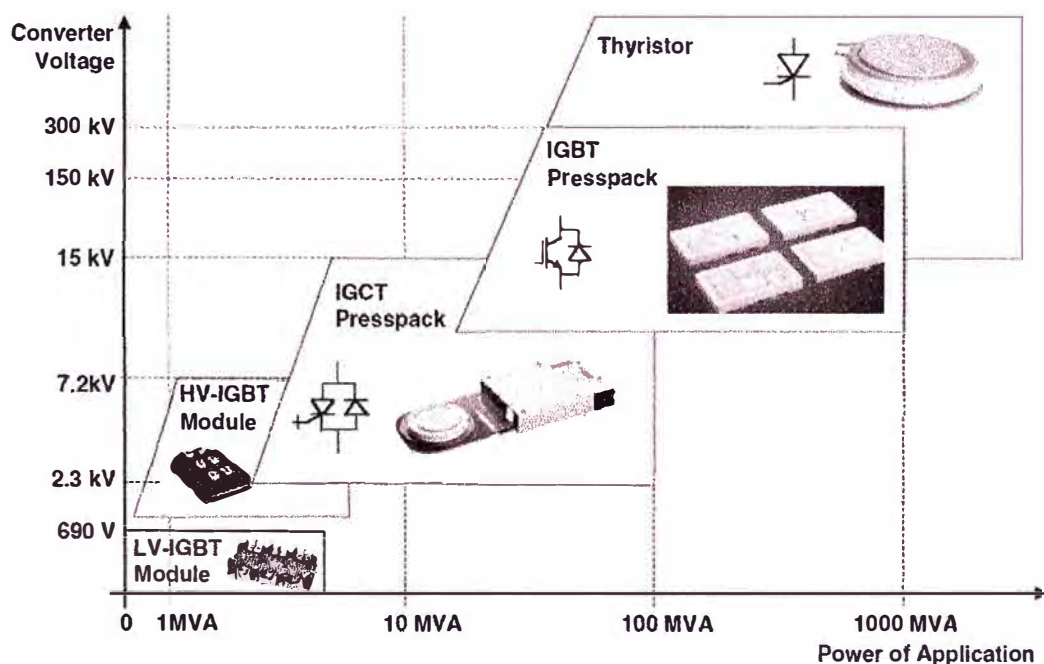
En la Fig.1.2 también se puede observar el tipo de conexión que tienen los dispositivos FACTS con el sistema, los cuales son conexión shunt (paralelo), conexión serie e híbridos shunt-serie.

La Fig.1.3 muestra una estadística referencial del número de FACTS versus potencia instalada alrededor del mundo. Se aprecia que los SVC y la compensación serie, representan los FACTS de mayor utilización en el mundo. [2]

Type	Number	Total Installed Power in MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	20	3.000
Series Compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	45	18.000
HVDC VSC B2B	1 + (12 with cable)	2250
UPFC	2-3	250

**Fig.1.3 Presencia de FACTS alrededor del mundo. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

La Fig.1.4 muestra las características límite de los dispositivos de conmutación usados en los diferentes tipos de FACTS.



**Fig.1.4 Rango de niveles de tensión para dispositivos de conmutación en FACTS [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

## 1.4 Tipos de FACTS

A continuación se describe los tipos de FACTS mostrados en la figura 1.2.

### 1.4.1 SVC (Static Var Compensator)

A lo largo de los años se han construido SVCs con diseños diversos. Sin embargo la mayoría de ellos tienen elementos controlables conmutables similares. Los más comunes son:

- Reactancia controlada por tiristores (TCR)
- Condensador conmutado por tiristores (TSC)
- Reactancia conmutada por tiristores (TSR)
- Condensador conmutado mecánicamente (MSC)

El TCR consiste de una bobina de reactancia fija, del tipo sin núcleo magnético (núcleo de aire), está conectada en serie a una válvula de tiristores bidireccional. La corriente de frecuencia fundamental es variada mediante el control del ángulo de conducción de la válvula de tiristores.

El TSC comprende un condensador en serie con una válvula de tiristores bidireccional y una reactancia amortiguadora con núcleo de aire. La función del conmutador de tiristores es conectar o desconectar el condensador para un número entero de semiciclos de la tensión aplicada. El condensador no está bajo el control por fase, sino que simplemente está conectado o desconectado. La reactancia del circuito TSC sirve para limitar la corriente en condiciones anormales y para ajustar el circuito a la frecuencia deseada.

Las impedancias de las reactancias, condensadores y del transformador de potencia definen el rango de funcionamiento del SVC.

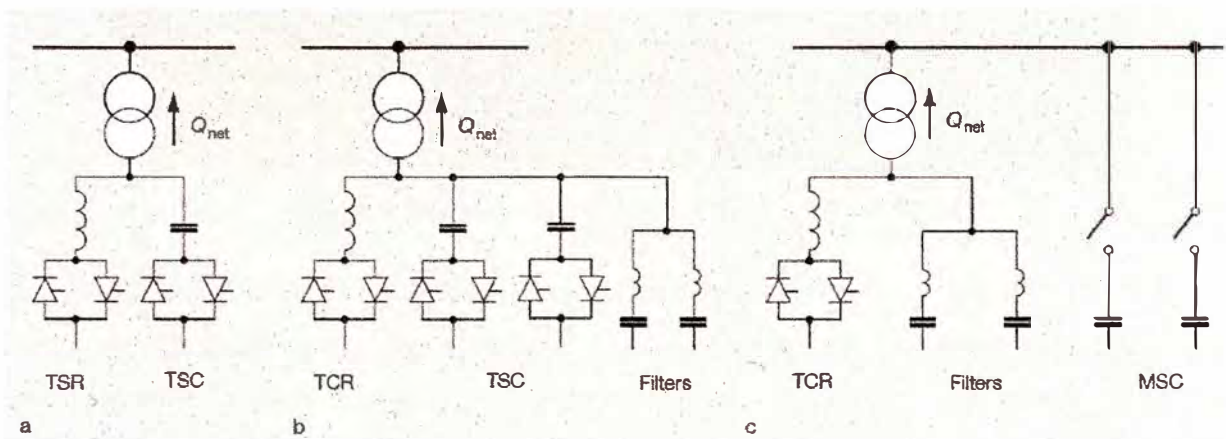
El esquema V-I correspondiente tiene dos regiones de funcionamiento diferentes. Dentro del rango de control, la tensión es controlable con una precisión que viene dada por la pendiente. Fuera del rango de control, la característica para bajas tensiones es la de una reactancia capacitiva y para tensiones altas la de una corriente constante. El rendimiento en la zona de baja tensión puede mejorarse fácilmente añadiendo una batería adicional de TSC (que se utiliza sólo en condiciones de baja tensión).

El TSR es un TCR sin control de fase de la corriente, que se conecta o desconecta de manera similar a un TSC. Frente al TCR este dispositivo tiene la ventaja que no genera corrientes armónicas. [6]

El MSC es una derivación sintonizada a una determinada frecuencia que comprende una batería de condensadores en serie con una reactancia. Está diseñado para ser conmutado sólo unas pocas veces al día, ya que la conmutación se realiza por disyuntores. La misión del MSC es satisfacer la demanda de potencia reactiva en régimen permanente.

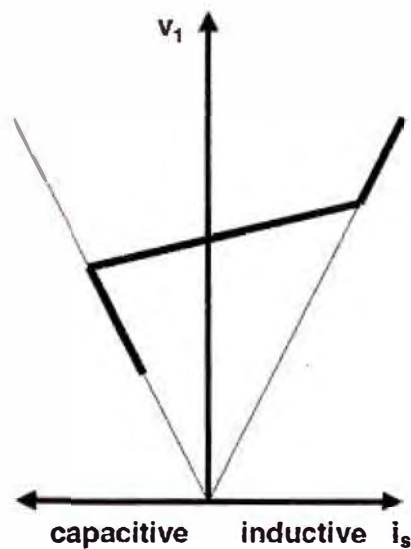
Los SVC realizan las siguientes funciones:

- Estabilización dinámica de la tensión: aumento de la capacidad de transferencia de energía y reducción de la variación de tensión.
- Mejora de la estabilidad angular: aumento de la estabilidad en régimen transitorio, mejor amortiguación del sistema de transmisión de energía eléctrica.
- Equilibrio dinámico de la carga.
- Soporte de la tensión en régimen permanente.

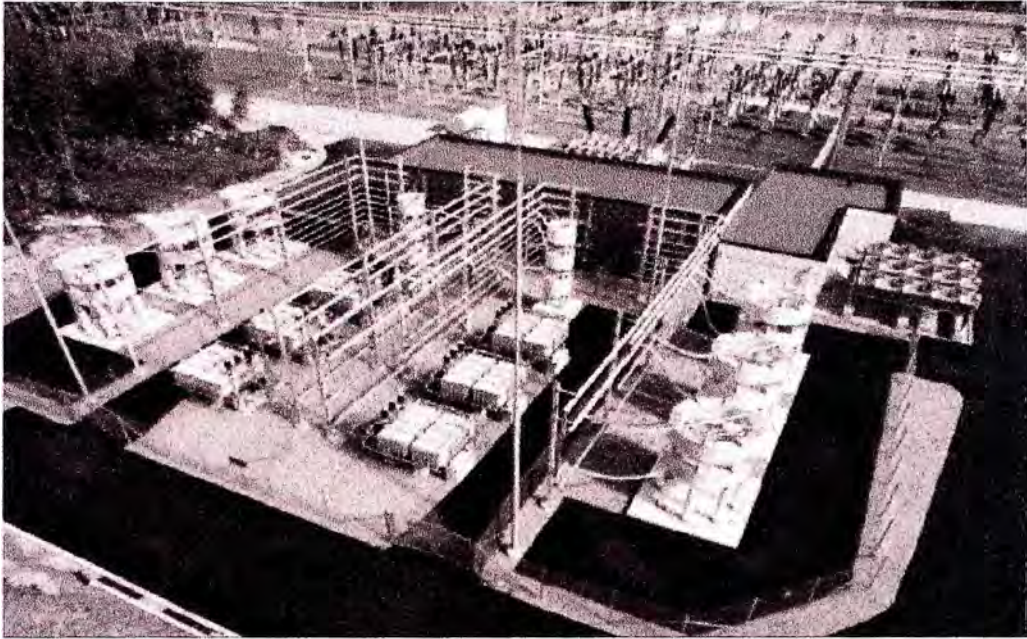


**Fig.1.5 Configuraciones de SVC [Fuente: ABB]**

**a) Configuración TSR-TSC, b) Configuración TCR-TSC, c) Configuración TCR-MSC.**



**Fig.1.6 Característica V-I de SVC [Fuente: ABB]**

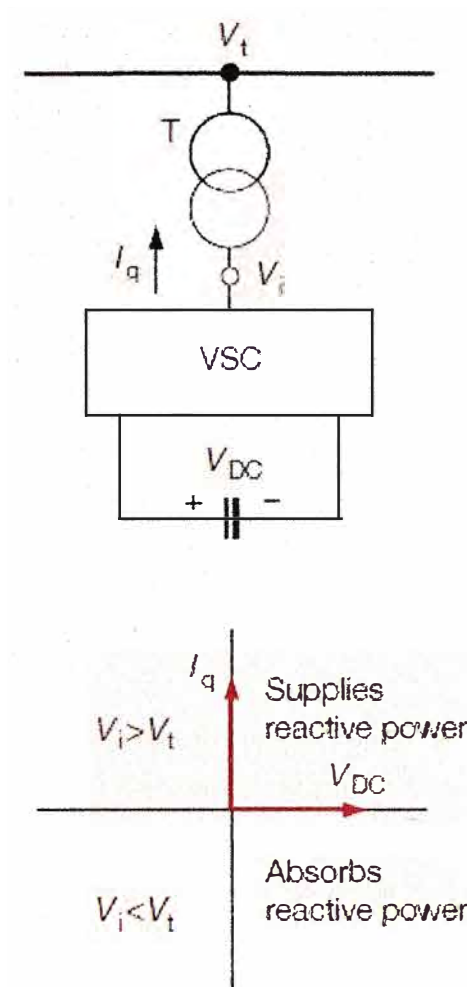


**Fig.1.7 Vista panorámica de SVC [Fuente: ABB]**

#### 1.4.2 STATCOM (Static Compensator)

El STATCOM está basado en una fuente de tensión sincrónica de estado sólido, similar a una máquina síncrona, que genera un conjunto equilibrado de (tres) tensiones sinusoidales a la frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo de desfase controlable. El STATCOM consiste en un convertidor de fuente de tensión, un transformador de acoplamiento y un sistema de control. En esta aplicación, el dispositivo de fuente de energía de CC puede ser sustituido por un condensador en CC, de forma que el intercambio de energía en régimen permanente entre el compensador estático y el sistema de CA pueda ser solo reactivo. [4]



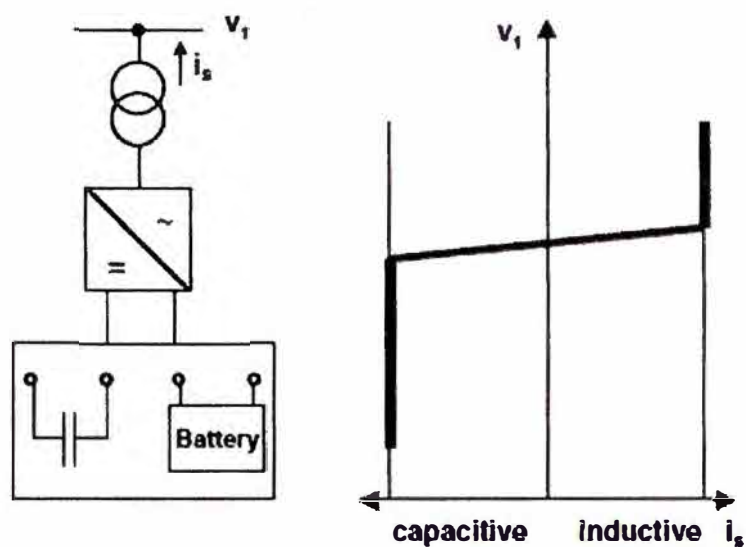


**Fig.1.8 Esquema de funcionamiento de STATCOM [Fuente: ABB]**  
 **$I_q$ : intensidad de salida del convertidor,  $V_i$ : Tensión del convertidor**  
 **$V_t$ : Tensión entre terminales**

$I_q$  es la corriente de salida del convertidor, perpendicular a la tensión del convertidor  $V_i$ . Es posible controlar la magnitud de la tensión del convertidor, por tanto su potencia de reactiva de salida. Si  $V_i$  es mayor que la tensión entre terminales  $V_t$ , el STATCOM suministrará potencia reactiva al sistema eléctrico. Si  $V_i$  es menor que  $V_t$  el STATCOM absorberá potencia reactiva.

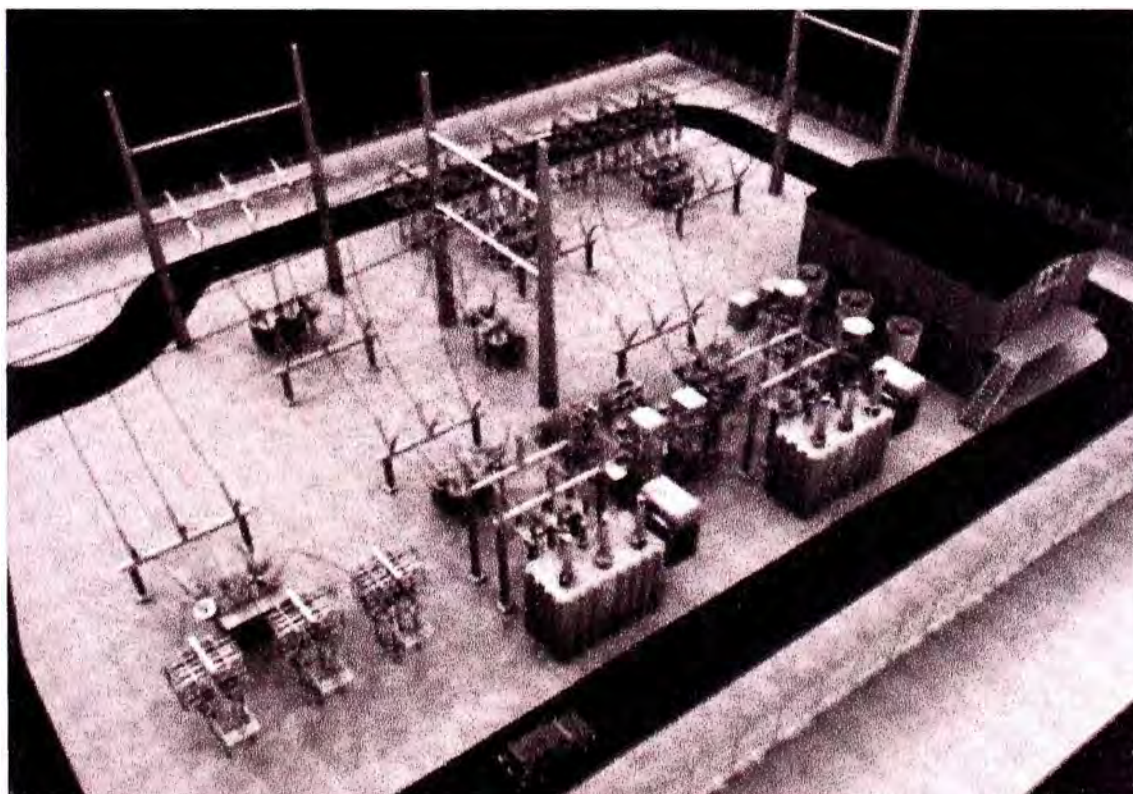
El STATCOM tiene características similares al compensador síncrono, pero como utiliza electrónica de potencia no tiene inercia. Es superior al compensador síncrono porque ofrece un mejor control dinámico de la tensión, menor costo de inversión y menores costos de operación y mantenimiento.

Los STATCOM son construidos con tiristores que poseen capacidad on-off como los GTO o los actuales IGCT o con varios IGBT en serie. La Fig.1.8 muestra la curva V-I y la estructura.



**Fig.1.9 Característica estructural y curva V-I de STATCOM [Fuente: ABB]**

La pendiente de la curva V-I determina la característica del control de la tensión. La ventaja del STATCOM es que la compensación de potencia reactiva es independiente del nivel de tensión en el punto de conexión, esto puede observarse en la Fig.1.9 se aprecia que las máximas corrientes son independientes del nivel de tensión en comparación con los SVC. Esto significa que inclusive en casos de contingencias muy severas el STATCOM mantiene su capacidad.

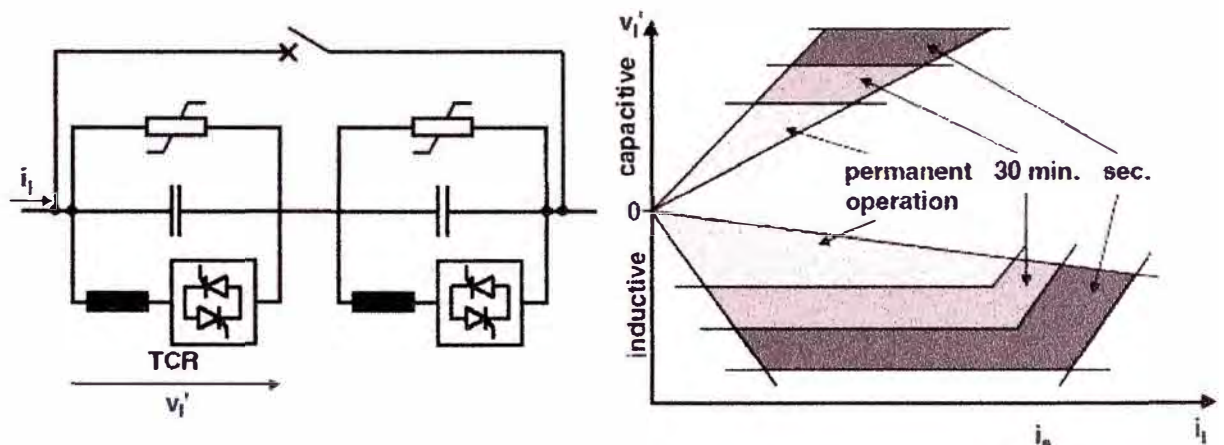


**Fig.1.10 Vista panorámica de una subestación con STATCOM [Fuente: ABB]**

### 1.4.3 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitors)

Este tipo de FACTS aborda problemas específicos en líneas de transmisión de gran longitud. En primer lugar incrementa la amortiguación cuando sistemas eléctricos muy largos son interconectados. En segundo lugar, puede resolver el problema de resonancia subsíncrona (SSR: Sub-Synchronous Resonance), que es un fenómeno que surge de la interacción entre grandes unidades de generación térmica del tipo turbovapor y sistemas de transmisión con compensación serie. La rápida capacidad de conmutación que tiene permite controlar el flujo de potencia en la línea, lo cual a su vez aumenta la capacidad de transmisión de las líneas existentes. También permite un rápido reajuste del flujo de potencia en respuesta a diferentes contingencias en la red. El TCSC puede regular el flujo de potencia en estado estacionario dentro de los límites propios del equipo. [2]

Desde el punto de vista tecnológico el TCSC se asemeja al capacitor serie convencional. La Fig.1.11 muestra el esquema eléctrico del TSSC y la curva V-I.



**Fig.1.11 Esquema de funcionamiento de TCSC y curva V-I [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

Las principales funciones del TSSC son dos:

- Provee amortiguación a las oscilaciones electromecánicas entre sistemas eléctricos de potencia, variando la reactancia de la línea de transmisión que los interconecta. Para este caso el TCSC aporta una reactancia capacitiva variable.
- El TCSC cambia la impedancia aparente (vista desde la línea) para frecuencias sub-síncronas, debido a esta característica la resonancia sub-síncrona es evitada.

El TCSC usa varios algoritmos de control que trabajan en conjunto. Estos controles accionan las válvulas de tiristores del banco de condensadores principal, haciendo que

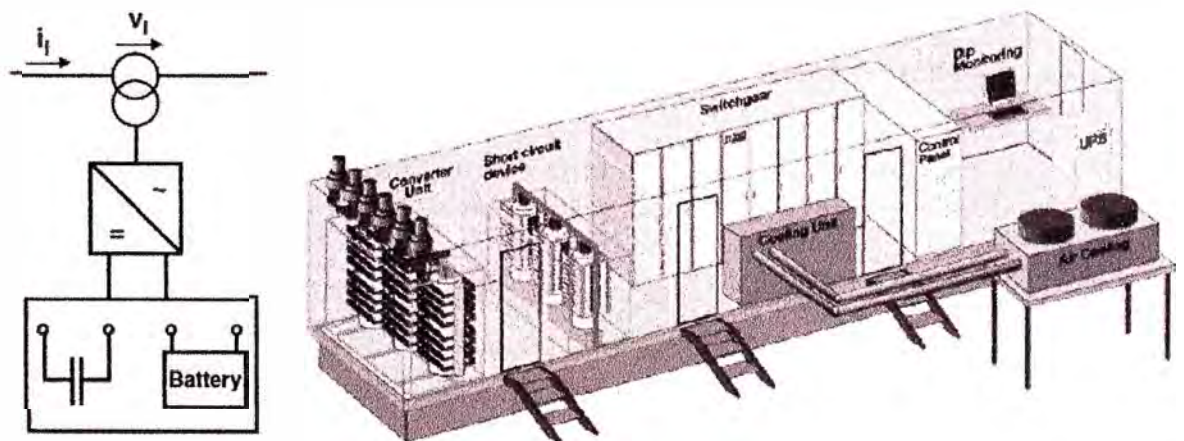
sea un capacitor variable a la frecuencia fundamental pero un inductor virtual a frecuencias sub-síncronas. La Fig.1.12 muestra el primer TCSC comisionado en 1996.



**Fig.1.12 Vista panorámica de TCSC [Fuente: ABB]**

#### 1.4.4 SSSC

Mientras que el TCSC es modelado como una impedancia serie, el SSSC es una fuente de tensión serie. En la Fig.1.13 se muestra el principio de operación, el cual es muy similar al STATCOM. Sin embargo, este dispositivo es más complejo debido a las características de montaje y sistema de protección. Es necesario un sistema de protección especial para las válvulas de tiristores debido a la poca sobrecarga que soportan las válvulas, especialmente cuando son IGBT. [2]



**Fig.1.13 Esquema de funcionamiento de SSSC y layout típico. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

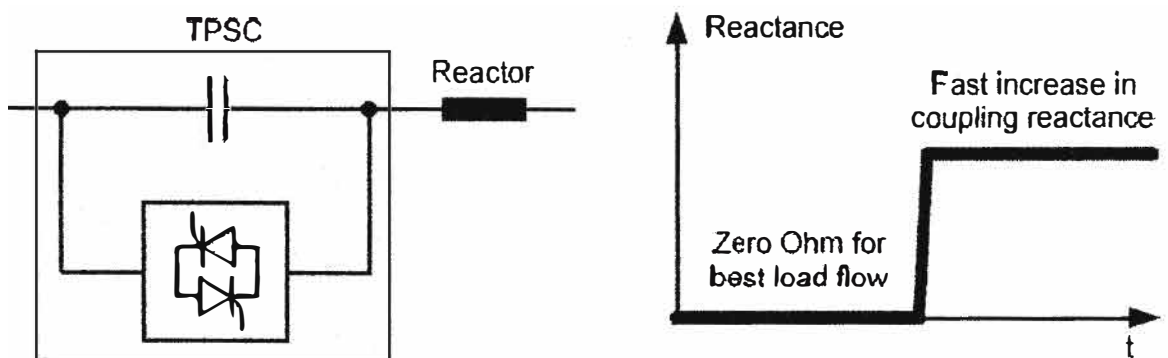
La fuente de tensión controlada y el sistema de protección especial hacen que este dispositivo sea costoso, teniendo en cuenta que su mejor performance no puede ser usada en sistemas de transmisión, sin embargo es muy beneficioso si lo vemos desde el punto de vista de calidad de energía.

Desde el punto de vista de calidad de energía este dispositivo es conocido como DVR (Dynamic Voltage Restorer). El DVR es usado para mantener constante el nivel de tensión, por ejemplo en la barra principal de una fábrica. Variaciones de voltaje y el efecto flicker también pueden ser mitigados. La duración de esta acción está limitada por la energía almacenada en el capacitor DC. Con un mecanismo de carga en el lado DC, este dispositivo se puede comportar como una gran fuente de tensión ininterrumpible (UPS: Uninterruptible Power Supply)

Estudios realizados en diversas partes del mundo concuerdan que los hornos de arco eléctrico son una de las principales fuentes de perturbaciones en lo que a temas de calidad de la energía se refiere.

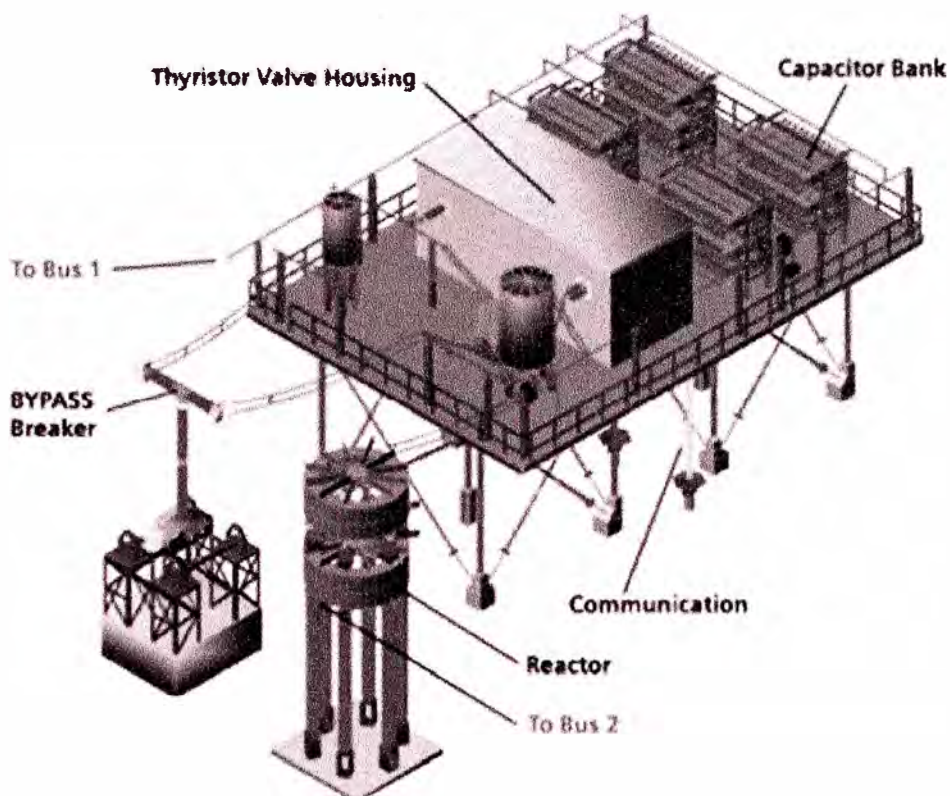
#### 1.4.5 SCCL (Short Circuit Current Limiter)

Es un TPSC (Thyristor Protected Series Capacitor) junto con un reactor serie que en conjunto pueden limitar la corriente de cortocircuito en pocos milisegundos debido al rápido incremento de la reactancia de acoplamiento en respuesta a un súbito cortocircuito. La Fig.1.14 muestra el principio de operación del SCCL y su diagrama operacional. [2]



**Fig.1.14 Esquema de funcionamiento y diagrama de operación de SCCL [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

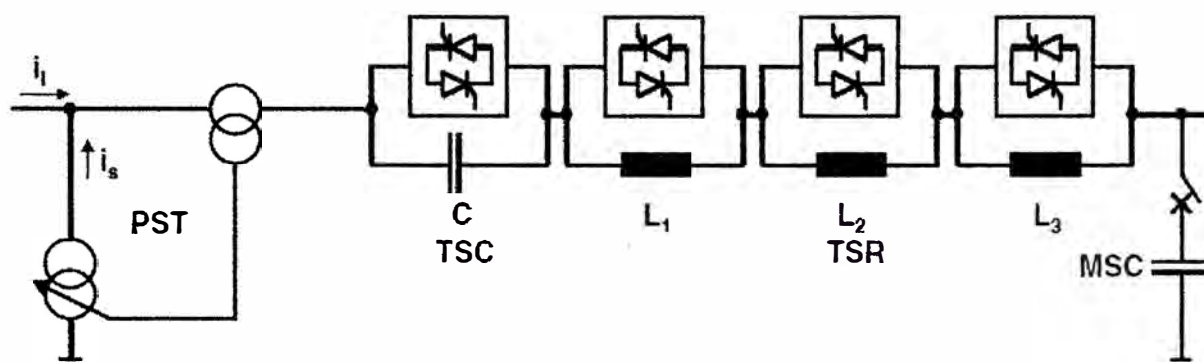
En condiciones de estado estacionario, la impedancia resultante tiene un comportamiento capacitivo o neutral, similar a la compensación serie con TCSC. En este escenario el SCCL puede ser usado para compensar la impedancia de una línea de transmisión y mejorar la estabilidad del sistema. Ni bien ocurre un cortocircuito en las cercanías de esta instalación que está en serie con el equipo a limitar, el TPSC es cortocircuitado por el tiristor y el reactor limita la corriente de cortocircuito.



**Fig.1.15 Vista panorámica típica de SCCL. [Fuente: SIEMENS]**

#### 1.4.6 DPFC (Dynamic Power Flow Controller)

El DPFC es un dispositivo híbrido entre un transformador de desfase (PST: Phase Shifting Transformer) y compensación serie conmutada. La Fig.1.16 muestra el diagrama unifilar del DPFC. [2]



**Fig.1.16 Esquema de funcionamiento de DPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

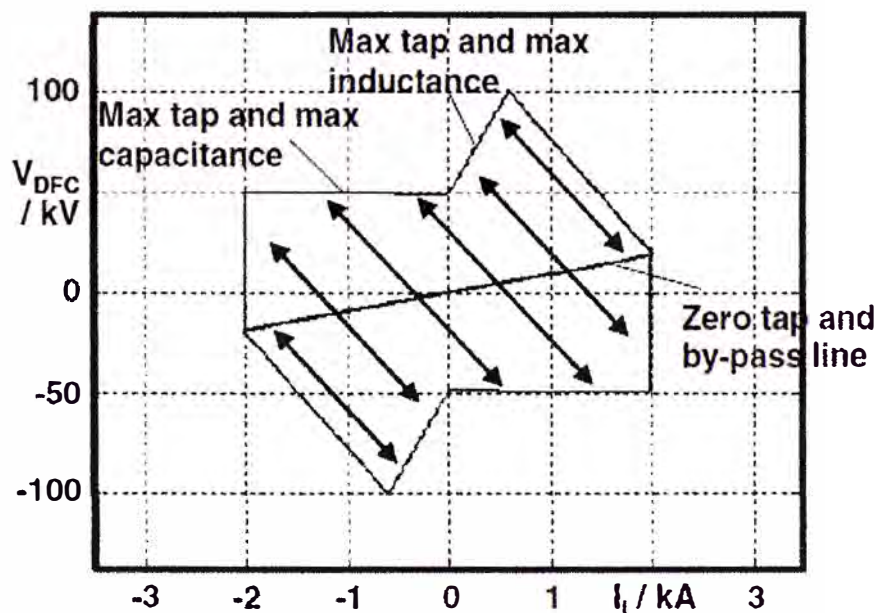
El DPFC tiene los siguientes componentes:

- Un transformador de desfasamiento estándar con regulación por taps (PST)
- Capacitores y reactores conmutados por tiristores (TSC / TSR)
- Un capacitor shunt conmutado mecánicamente (MSC). (Opcional dependiendo de los requerimientos de potencia reactiva del sistema)

Basado en los requerimientos del sistema, el DPFC consiste en un conjunto de TSC o TSR. El capacitor shunt conmutado mecánicamente (MSC) proveerá un mejor nivel de tensión en caso de sobrecarga u otras contingencias. Normalmente las reactancia de los capacitores y reactores son seleccionados para entrar por pasos. La conmutación de las reactancias serie ocurren a corriente cero para evitar los armónicos.

La operación del DPFC obedece las siguientes reglas:

- TSC / TSR son conmutados cuando se requiere una respuesta rápida.
- El trabajo en condiciones de sobrecarga es manejado por el TSC /TSR.
- La regulación por taps del transformador de desfasamiento (PST) debe ser evitada de ser posible para corrientes mayores a las nominales.
- El consumo de potencia reactiva del dispositivo puede ser optimizado con la operación del MSC, regulación del PST por taps y la conmutación de las capacitancias y reactores.



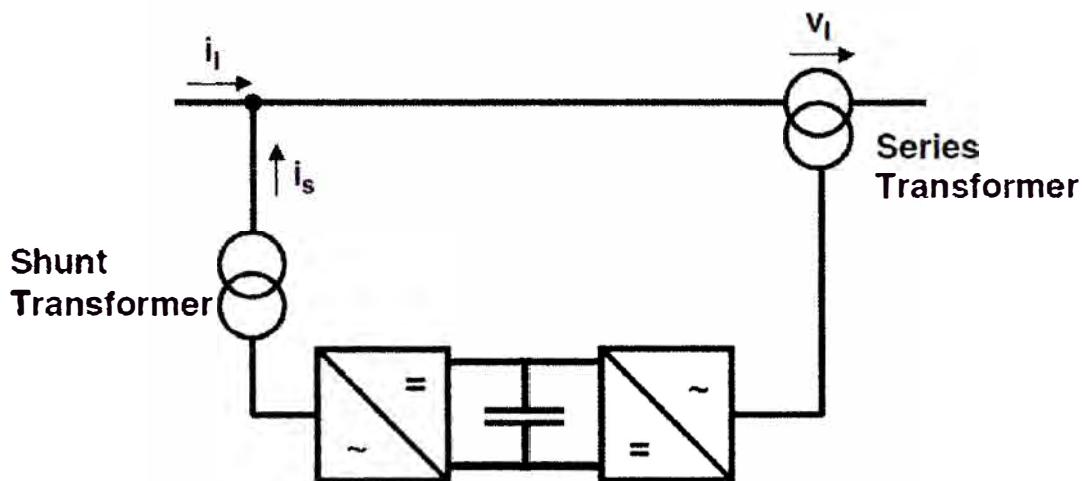
**Fig.1.17 Diagrama operacional de DPFC. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

La operación en el primer y tercer cuadrante corresponde a una reducción de potencia gracias al DPFC, mientras que la operación en el segundo y cuarto cuadrante corresponde a un incremento en el flujo de potencia gracias al DPFC. La pendiente de la línea de que pasa por el origen (en el cual la posición del tap es 0% y los TSC y TSR están en by-pass) depende de la impedancia de cortocircuito del PST.

#### 1.4.7 UPFC (Unified Power Flow Controller)

El UPFC es la combinación de un compensador estático del tipo shunt y compensación estática serie. Actúa como un dispositivo compensador shunt y un transformador de desfase simultáneamente.

El UPFC consiste en un transformador shunt y un transformador serie, que son conectados a través de dos fuentes de tensión controladas con un capacitor DC en común. El circuito DC permite que el intercambio de potencia activa entre los transformadores shunt y serie controle el desfase de los voltajes serie.



**Fig.1.18 Esquema de funcionamiento de UPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

La Fig.1.18 muestra el esquema de operación del UPFC. El UPFC provee un control completo de la tensión y del flujo de potencia. Los convertidores son protegidos con un puente de tiristores. Debido a los grandes esfuerzos que realizan las fuentes de tensión controlada y al sistema de protección del dispositivo, el UPFC es bastante costoso lo cual solo lo hace factible en aplicaciones donde se requiera control de voltaje y de flujo de potencia al mismo tiempo.

#### 1.4.8 IPFC (Interline Power Flow Controller)

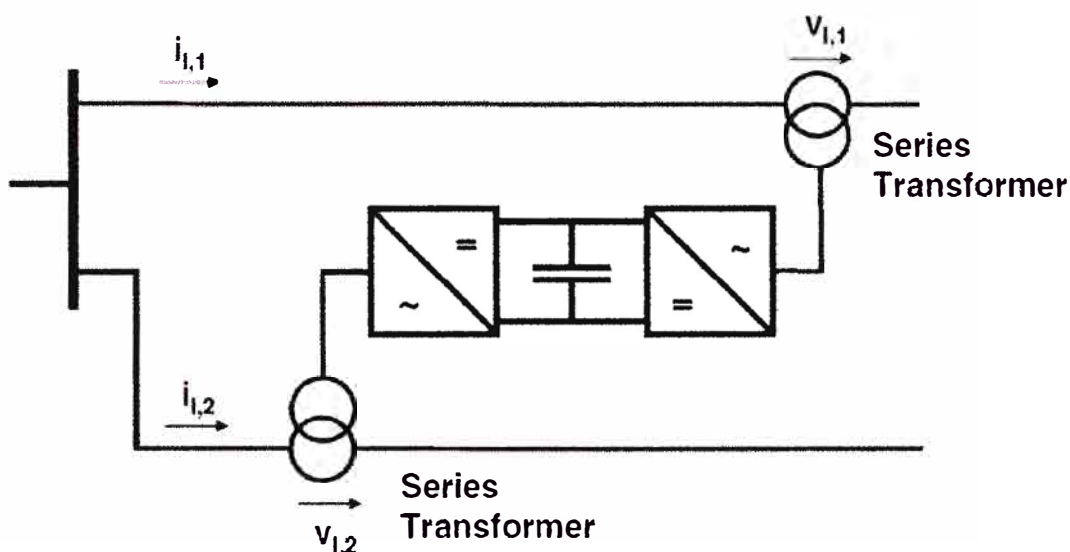
Uno de los últimos dispositivos FACTS es el compensador estático convertible (CSC) que fue instalado recientemente como un plan piloto en Nueva York. Con la aparición de este nuevo dispositivo se hizo posible dos configuraciones nuevas de FACTS como lo son: el



IPFC (Interline Power Flow Controller) y el GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller). [2]

El objetivo es controlar el flujo de potencia en varias líneas o una pequeña sub red (área) en lugar del control clásico de una sola línea como el caso del DPFC o UPFC.

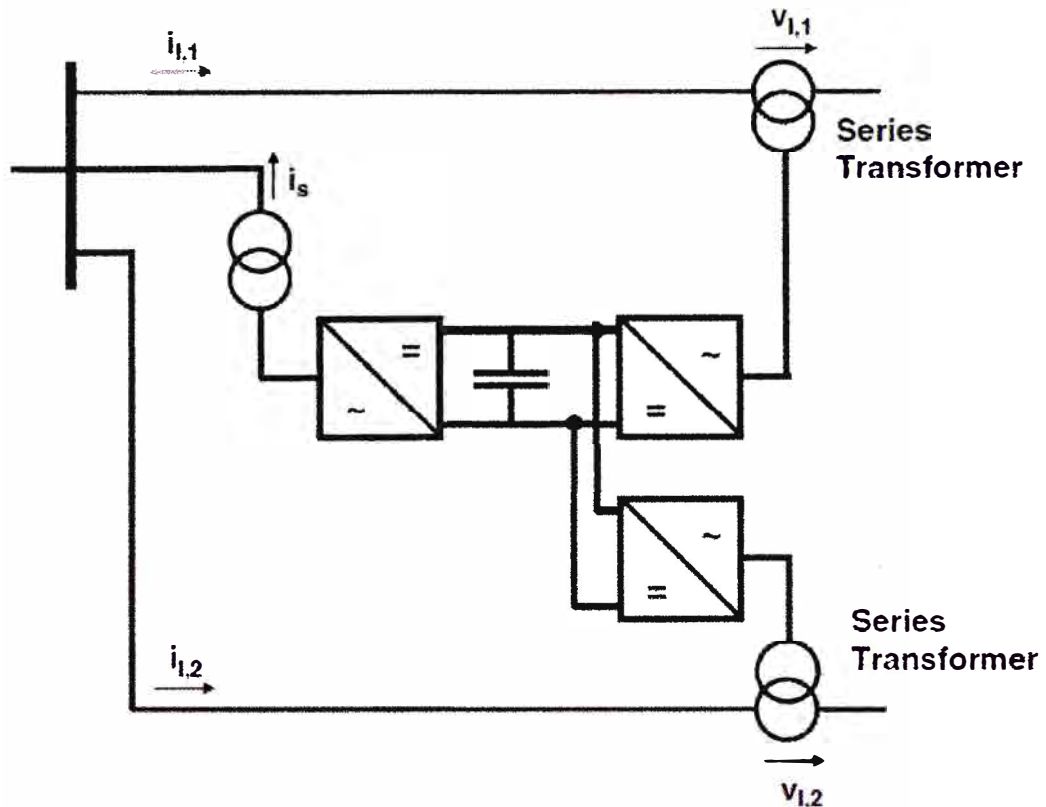
El IPFC consiste en dos fuentes de tensión controladas (VSC) en las que sus capacitores DC están acoplados, esto permite que la potencia activa circule entre ellos. Con esta configuración, dos líneas pueden ser controladas simultáneamente para optimizar el flujo de potencia en la red. En general, debido a su complejidad y costos, se tiene que identificar casos específicos que justifiquen la inversión.



**Fig.1.19 Esquema de funcionamiento de IPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

#### 1.4.9 GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller)

El GUPFC combina tres o más fuentes de tensión controladas en paralelo y serie. Este dispositivo FACTS extiende el concepto del control de tensión y flujo de potencia más allá de lo que puede lograr el conocido UPFC. El GUPFC más simple consiste en tres fuentes de tensión controladas, una de ellas en conexión shunt y las otras dos en serie con dos líneas de transmisión de la subestación. [2]



**Fig.1.20 Esquema de funcionamiento de GUPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**

La Fig.1.20 muestra el esquema del GUPFC básico, este puede controlar cinco (05) variables diferentes: nivel de tensión, potencia activa y reactiva de las dos líneas de manera independiente.

El concepto del GUPFC puede ser extendido para más líneas de ser necesario. En general el GUPFC incrementa la capacidad de transmisión de las líneas y puede aliviar el congestionamiento de líneas de manera flexible.

Al igual que el IPFC, es costoso y complejo, por ende se tiene que identificar aplicaciones específicas que justifiquen su uso. Un ejemplo puede ser instalarlo en una subestación importante de la red.

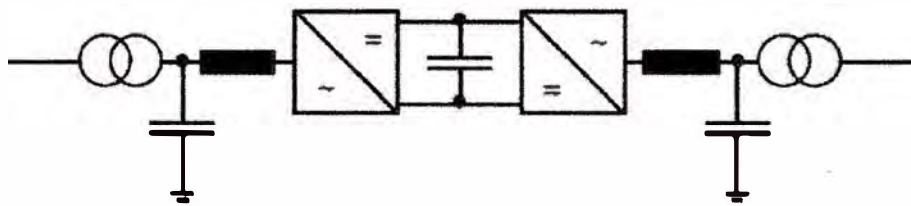
#### 1.4.10 Dispositivos Back-to-Back

Los dispositivos back-to-back proveen en general un gran control y limitación del flujo de potencia. Una sobrecarga en estos dispositivos es prácticamente imposible. Pueden resistir pérdidas de cargas en cascada, los cuales pueden ocurrir debido a salidas de líneas y su correspondiente sobrecarga de las demás líneas. [2]

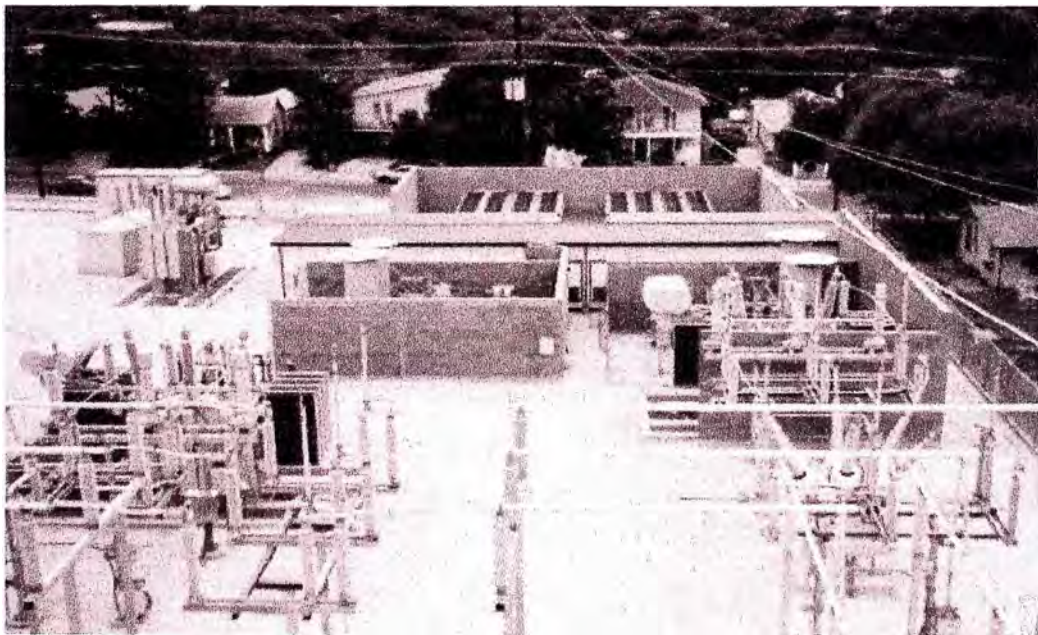
Los dispositivos convencionales HVDC Back-to-Back con convertidores en base a tiristores necesitan filtros para mitigar la distorsión de armónicos que ocupan bastante espacio. La potencia reactiva no es controlable. Estos dispositivos son mayormente

utilizados cuando dos redes asíncronas necesitan interconectarse o en la transmisión de energía por líneas muy largas.

Los dispositivos HVDC Back-to-Back con fuentes de tensión controlables tienen mejor performance que los que usan convertidores con tiristores. Ocupan menos espacio y proveen un control de tensión en ambos extremos del sistema, por ende también controlan el flujo de potencia. Por estas características pueden incrementar la capacidad de transmisión de las líneas y adicionalmente balancear el flujo de potencia.



**Fig.1.21 Esquema de funcionamiento de HVDC Back-to-Back con fuentes de tensión controladas [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania]**



**Fig.1.22 Vista panorámica de un HVDC Back-to-Back con fuentes de tensión controladas, 2x36MVA [Fuente: ABB]**

### 1.5 Introducción al SVC Light

SVC Light es el nombre comercial de un STATCOM de la marca ABB que fue mejorado utilizando última tecnología de válvulas IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

La tecnología del sistema SVC Light se basa en el principio de que la topología de la instalación debería ser sencilla, con un mínimo de equipos convencionales. Los equipos convencionales son sustituidos por dispositivos de alta tecnología, tales como válvulas

IGBT y sistemas informáticos de alto rendimiento. La utilización de conmutación PWM de alta frecuencia (aproximadamente 2kHz) ha hecho posible utilizar un único convertidor conectado a un transformador de potencia estándar por medio de reactancias de conmutación de núcleo de aire. Los principales componentes de la instalación, tales como: las válvulas IGBT, los condensadores de CC, el sistema de control y el sistema de refrigeración de válvulas están situados dentro de un mismo contenedor. El equipamiento exterior es limitado: intercambiadores de calor, reactancias de conmutación y el transformador de potencia. [6]

El intervalo de funcionamiento del SVC Light está definido por la tensión máxima que se puede establecer en los terminales de convertidor y por su intensidad de corriente máxima. En condiciones de subtensión se puede mantener una intensidad constante, igual a la intensidad máxima del convertidor. Esto muestra que la producción de MVAR disminuye linealmente con la tensión. En condiciones de sobretensión, la intensidad máxima puede ser mantenida hasta en el límite de la tensión entre terminales del convertidor.

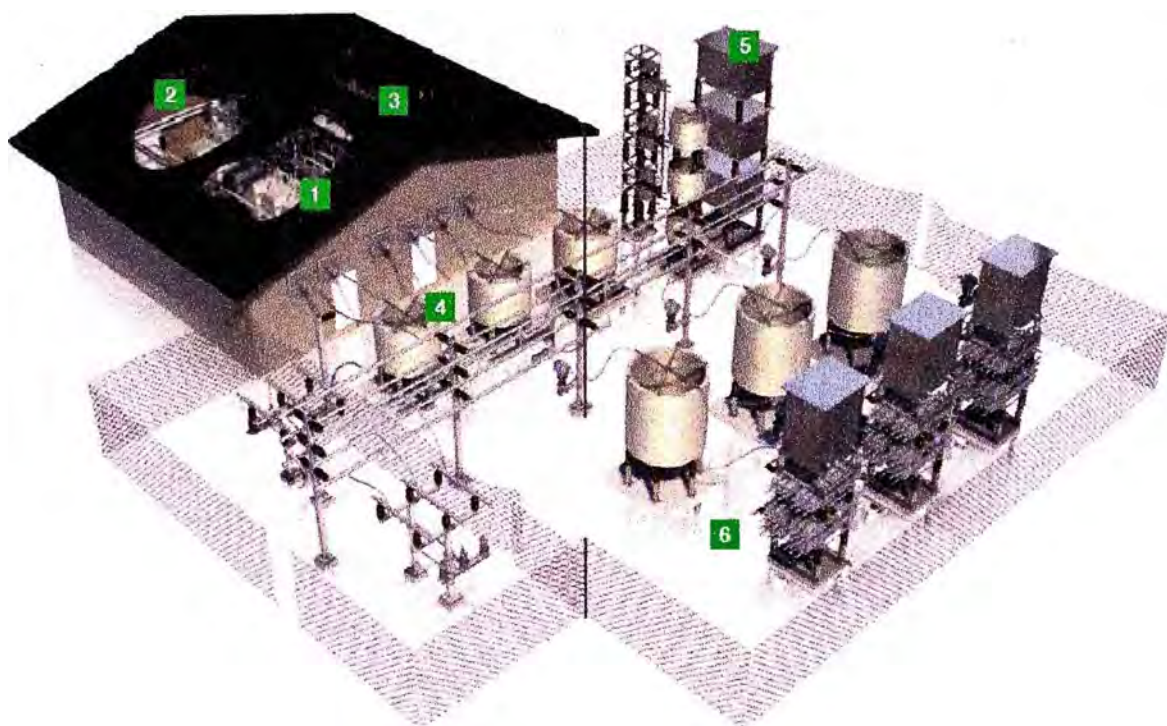
Las válvulas de semiconductores de un sistema SVC Light responden casi instantáneamente a una orden de conmutación. Por consiguiente, el factor que limita la velocidad de respuesta de la instalación viene determinado por el tiempo requerido para realizar las mediciones de tensión y procesar los datos del sistema de control. Si se utiliza un controlador de alta ganancia, el tiempo de respuesta será inferior a un cuarto de ciclo. En la mayoría de los casos, la instalación puede estar diseñada por completo sin filros de armónicos. En otros casos, cuando los requisitos impuestos a los armónicos de orden superior son muy estrictos, puede ser necesario un filtro de paso alto. Por consiguiente es muy poco probable de que se produzcan las condiciones para resonancia. Debido a esta propiedad, el SVC Light puede ser reubicado en otra posición cuando varían los requisitos impuestos por la red.

La alta frecuencia de conmutación utilizada en el SVC Light da como resultado una capacidad intrínseca para producir tensiones a frecuencias muy por encima de la frecuencia fundamental. Esta propiedad se aprovecha para el filtrado activo de armónicos ya presentes en la red. El SVC Light inyecta entonces a la red, una corriente armónica, con la fase y amplitud correctas para contrarrestar las tensiones armónicas.

La bibliografía técnica reporta que se puede construir SVC Light compactos dependiendo del tipo de aplicación.

La Fig. 1.23 muestra una imagen referencial del SVC Light [4], donde:

- (1) Fuente de tensión controlable (VSC)
- (2) Sistema de control y protección
- (3) Sistema de enfriamiento
- (4) Reactores de fase
- (5) Filtros de paso alto
- (6) Filtros de armónicos (opcional)



**Fig.1.23 Vista panorámica de un SVC Light. [Fuente: ABB]**

## **CAPITULO II**

### **EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO: DEFINICIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

#### **2.1 Introducción**

Estudios realizados en diversas partes del mundo concuerdan que los hornos de arco eléctrico son una de las principales fuentes de perturbaciones en lo que a temas de calidad de la energía se refiere.

La naturaleza estocástica de la carga combinada con la alta potencia de consumo (del orden de los MVA) hace de los hornos de arco eléctrico una fuente de perturbaciones muy peculiar en la red de alimentación.

Para mitigar estas perturbaciones se ve la necesidad de implementar el uso del SVC Light, el cual es un FACTS (Flexible AC Transmission System) de la marca ABB diseñado exclusivamente para su aplicación en paralelo con cargas variables, en este caso específico: Hornos de arco eléctrico.

Para entender mejor el problema se procede a explicar el funcionamiento de un horno de arco eléctrico y los problemas que provoca en la red de alimentación. Se planteará el problema con hornos de arco eléctrico de corriente alterna debido que son los más usados en la industria, no sin antes mencionar que también existen hornos de arco eléctrico de corriente continua cuyo funcionamiento es similar a los de corriente alterna con la diferencia que llevan un rectificador en la entrada del horno.

#### **2.2 Principio de funcionamiento del horno de arco eléctrico.**

Los hornos de arco se basan en la transformación de la energía eléctrica en calor aplicado a la carga, lo que provoca la elevación de su temperatura. La energía eléctrica procede de una red de corriente alterna en alta tensión y llega al horno a través de un circuito eléctrico que consta básicamente de:

- Una línea de entrada en alta tensión.
- Un transformador principal, que reduce la tensión de entrada a la requerida en el horno.
- Un circuito eléctrico, a continuación del secundario del transformador, que termina en los electrodos.

En los hornos de corriente alterna se disponen de tres electrodos encima de la carga que está puesta a tierra y el arco salta entre los electrodos a través de la carga, es decir, cada electrodo hace alternativamente de cátodo y ánodo.[3]

Por otra parte, el circuito eléctrico completo comprende resistencias, reactancias y condensadores que determinan los parámetros de funcionamiento de la instalación.

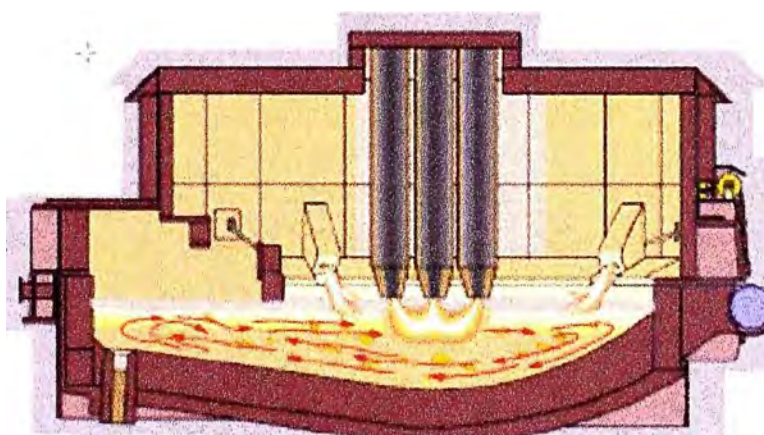
Dichos parámetros son:

- La tensión e intensidad de la corriente.
- Las potencias activas a la entrada y en el arco.
- Los factores de potencia en diversos puntos.

Finalmente los parámetros anteriores se llevan a diagramas de funcionamiento que permiten determinar las condiciones óptimas de funcionamiento:

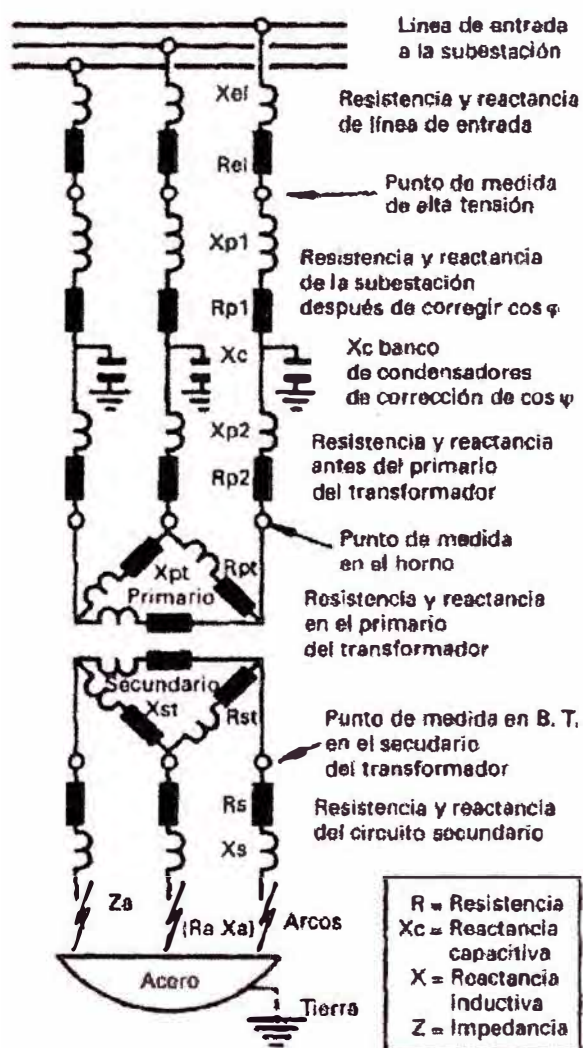
- Máxima producción, que procederá de la mayor potencia del arco.
- Máximo rendimiento, es decir, mínimas pérdidas energéticas respecto a la potencia consumida, lo que determina normalmente un punto de funcionamiento a potencia en el arco algo inferior a la máxima.
- Mínimo costo de funcionamiento, lo que implica, no solo el coste de la energía sino otros como consumo de electrodos y refractario, carga, mano de obra, etc.

En la Fig. 2.1 se muestra la vista interior de un horno de arco eléctrico



**Fig.2.1 Vista interior de un horno de arco eléctrico [Fuente: ABB]**

En la Fig. 2.2 se muestra un esquema eléctrico típico de conexión de un horno de arco eléctrico.

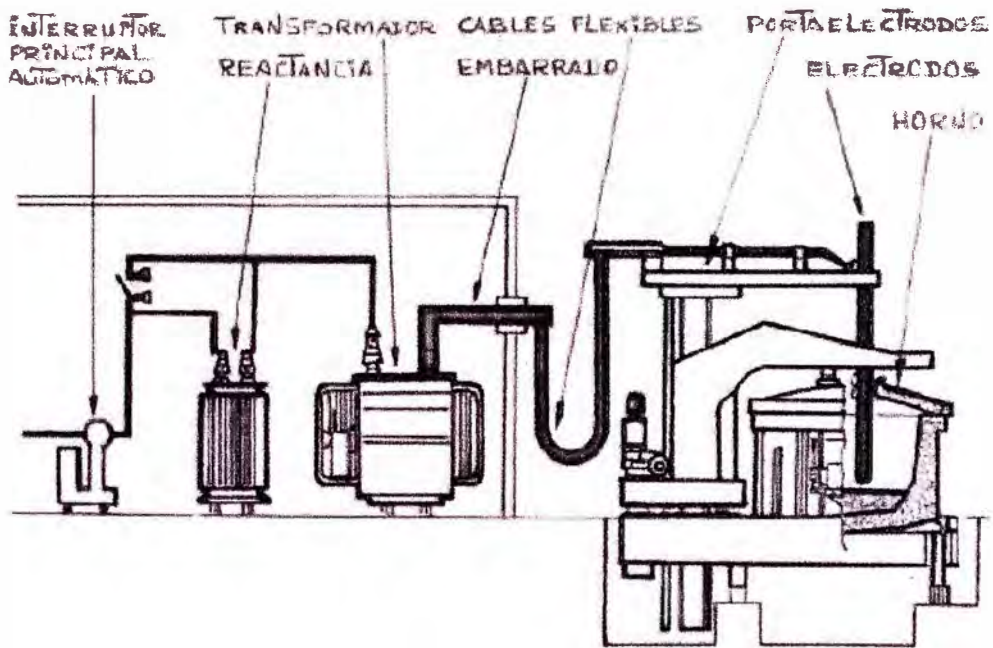


**Fig.2.2 Esquema eléctrico típico de horno de arco eléctrico. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España]**

### 2.3 Componentes eléctricos principales del horno de arco eléctrico

En la Fig.2.3 se muestra una vista simplificada de la instalación de un horno de arco eléctrico. [3]





**Fig.2.3 Vista simplificada de horno de arco eléctrico [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España]**

En los hornos antiguos la caseta eléctrica, emplazada junto al horno, tenía en su pared exterior los controles y mandos. Actualmente hay un puesto de control climatizado, e insonorizado, en el que están los mandos a distancia de los equipos situados en la caseta. A continuación se describen los elementos principales:

#### Interruptor principal

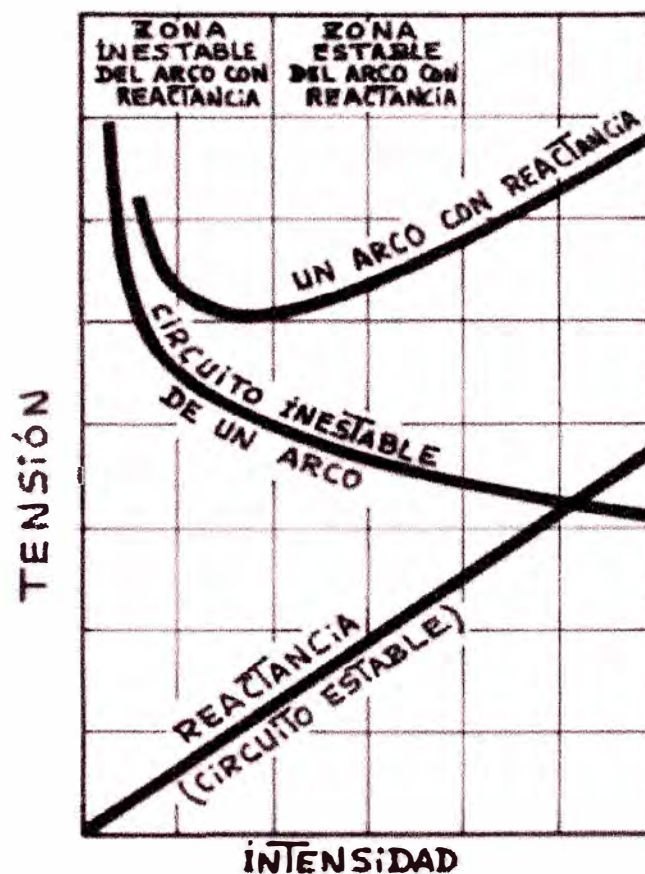
Es un mando automático en el que la apertura y cierre deben ser rapidísimos para evitar averías en la operación del horno de arco. En la antigüedad los contactos del interruptor eran sumergidos en aceite para una mayor rigidez dieléctrica, actualmente existen nuevas tecnologías que usan unas resinas sintética líquidas e inclusive celdas tipo GIS. El interruptor se acciona múltiples veces durante el proceso de trabajo para elevación de electrodos, cambio de tensiones en el transformador, colada (proceso de recojo de material fundido), etc. Su falla provocaría que se quemara la reactancia o el transformador o provocaría otras averías en la regulación de electrodos, transformadores de señal, etc.

#### Bobina de reactancia

Esta reactancia realiza dos funciones durante el proceso de fundición.

Por un lado absorbe y neutraliza las variaciones de intensidad y tensión del arco eléctrico cuando al principio de la fusión los electrodos tocan o se separan de trozos sólidos de chatarra. Los picos de potencia producidos incidirían fuertemente sobre el resto de la instalación de la fábrica e incluso en líneas exteriores de la misma.

Por otro lado aumenta la impedancia del circuito y garantiza una marcha estable en el arco. Asimismo, disminuye la tensión cuando aumenta la intensidad, cosa que ocurre cuando los electrodos descienden y se acercan al baño. Para conseguir la estabilización del arco a una determinada tensión hace falta conseguir que a una elevación de tensión corresponda una elevación de intensidad. Esto se consigue intercalando una reactancia en serie con el arco. Hay una zona en las curvas de trabajo en la que al aumentar la tensión aumenta la intensidad y, por tanto, la estabilidad del arco. (Ver Fig. 2.4.)



**Fig.2.4 Características y estabilidad del arco eléctrico en el horno. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España]**

La reactancia sólo se utiliza al principio de la fusión, en el periodo de tiempo en que la carga está sólida. Después, cuando los electrodos han hecho “pozo” (electrodos sumergidos) y están sobre acero líquido el arco se estabiliza y puede eliminarse la reactancia mediante un interruptor de by-pass llamado también eliminador de reactancia.

#### Transformador del horno

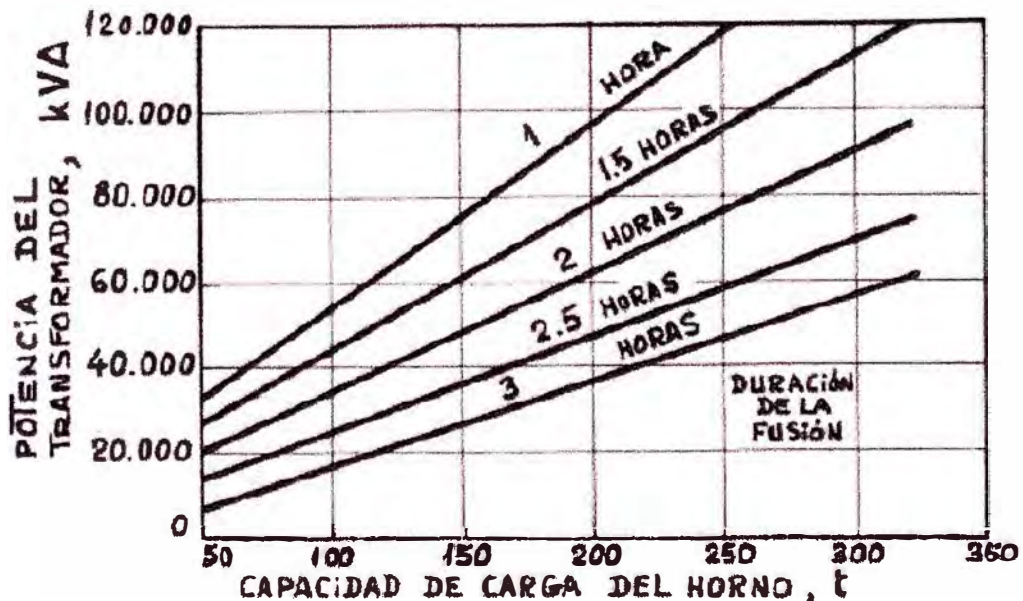
Es una parte fundamental de la instalación ya que debe alimentar adecuadamente al horno adaptándose a las variaciones que puedan producirse. Estos transformadores tienen varias tomas de corriente a diferentes tensiones para que se pueda trabajar en el

horno con potencias que correspondan a las fases específicas de cada momento de operación. Durante el principio de la operación se emplean potencias mayores y luego, durante el afino se conectan potencias menores. Por lo tanto, los transformadores deben estar muy bien dimensionados para que no haya calentamientos que disminuyan la intensidad admisible.

Estos transformadores tienen sistemas de enfriamiento de aceite así como también sistemas de filtrado y deshidratación del aceite.

En el transformador entran unos 20000V (por ejemplo) y a la salida hay varias tomas (taps) en tensiones que van desde los 80V hasta los 500V (por ejemplo). En la actualidad el cambio de estos taps se realiza desde la sala de control. Esta disminución de tensión y consiguiente aumento de la intensidad se hace para explotar el efecto Joule en el calentamiento y la fusión de la carga metálica ( $I^2Rt$ ). Las potencias de estos transformadores varían entre 1000 y 130000kVA, según sea la capacidad de los hornos.

En la Fig.2.5, a manera de información, se puede observar la relación entre la potencia del transformador del horno, la capacidad del horno y el tiempo que dura la fusión.



**Fig.2.5 Relación entre la potencia del transformador, capacidad y duración del arco eléctrico. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España]**

#### Transformadores de señal

La medida de la potencia consumida se hace normalmente en la línea que alimenta al primario del transformador, empleándose dos transformadores de medida de tensión y dos de medida de intensidad, con el objeto de transformar las características de tensión e

intensidad de la corriente, adaptándose a los instrumentos de medida ubicados en la sala de control.

La corriente llega a los electrodos en alta intensidad y baja tensión. Para la medida de la intensidad por electrodo hay tres transformadores de intensidad (uno por cada electrodo) de construcción especial cuyo primario lo forman las misma barras, pletinas o tubos de cobre que llevan la corriente desde el transformador hasta los cables flexibles de los brazos porta-electrodos. Los transformadores de tensión se conectan entre los electrodos y el baño.

Los tres transformadores de intensidad y tensión tienen una doble misión. En primer lugar alimentan los amperímetros y voltímetros que indican al operador las variaciones de la corriente que llega al horno. En segundo lugar actúan sobre la regulación de electrodos para responder y corregir esas variaciones de corriente.

#### Regulación de electrodos

La distancia entre electrodo y baño, es decir la longitud del arco eléctrico, determina la impedancia del mismo y, en consecuencia, el resto de parámetros eléctricos de la operación. Se trabaja de forma que se extraiga el arco de la mayor potencia posible. A modo de historia, hasta mediados del siglo XX el mando de subida y bajada de los electrodos se hacía a mano por el operador, respondiendo a las lecturas instantáneas de las señales de los amperímetros, voltímetros y lámparas indicadoras. Después se han desarrollado regulaciones automáticas que comandan los equipos de subida y bajada en función a las señales enviadas por los transformadores de corriente y tensión.

El movimiento de ascenso y descenso de los electrodos y en consecuencia su regulación, puede ser mediante mecanismos hidráulicos o eléctricos.

En las regulaciones hidráulicas el movimiento vertical de los electrodos se realiza haciendo solidarias las columnas porta-electrodos con el vástago del pistón de un cilindro hidráulico. El accionamiento puede hacerse manualmente (llave de tres vías) o con servomecanismos que responden a las características de corriente del arco eléctrico (regulación automática).

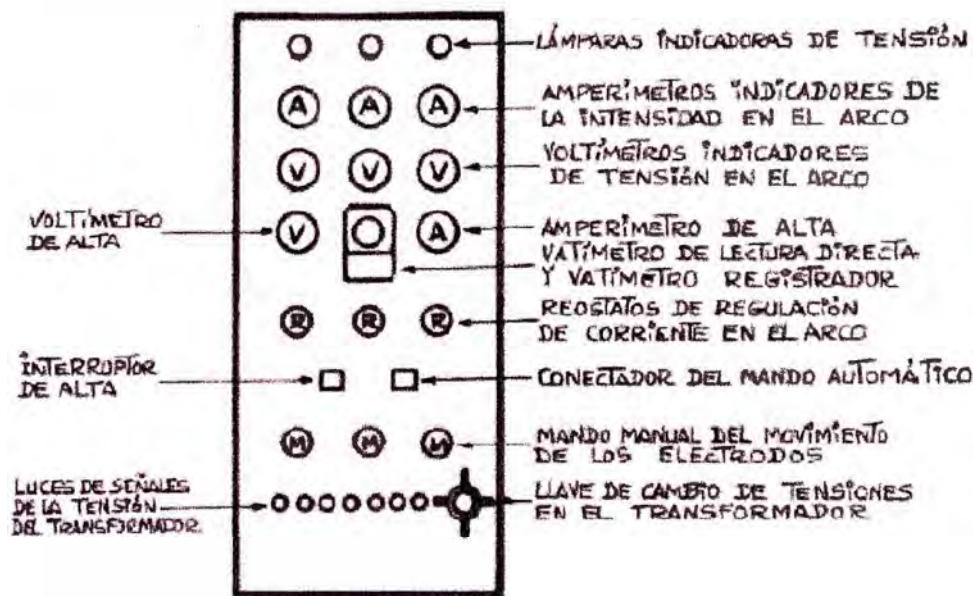
En las regulaciones eléctricas hay un motor de corriente continua que al girar en un sentido o en el contrario mueve un torno en el que arrolla el cable que hace subir o bajar la columna de electrodos. El movimiento del motor se controla mediante unos contactores accionados a mano (regulación manual) o por sensores que responden a las variaciones de la corriente en el arco eléctrico (regulación automática).

#### Cabina de control y mando

Los controles que existen actualmente en un horno de arco eléctrico son:

- El cuadro de mando en el que se ubican las señales visuales de todos los aparatos eléctricos y de protección
- Tres lámparas para indicación visual de la tensión en el arco.
- Un voltímetro para la tensión en el lado de alta.
- Un voltímetro con dos conmutadores para la tensión en baja.
- Un vatímetro para indicación de potencia.
- Un contador de kilovatios-hora.
- Tres amperímetros para medida de la intensidad en los electrodos.
- Tres voltímetros para medida de la tensión en los electrodos.

En la Fig.2.6 se puede observar un panel de control típico del horno de arco eléctrico



**Fig.2.6 Panel de control de horno de arco eléctrico. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España]**

Para el mando del horno se tiene:

- Un mando eléctrico o mecánico del interruptor principal.
- Un mando eléctrico o mecánico del cambiador de tensiones.
- Un mando eléctrico o mecánico del eliminador de reactancia.
- Un enclavamiento eléctrico o mecánico entre los accionamientos del interruptor y cambiador.
- Un conmutador de mando simultáneo de los tres electrodos que funciona tanto en marcha manual como automática.
- Tres conmutadores manual-automáticos, uno por electrodo.

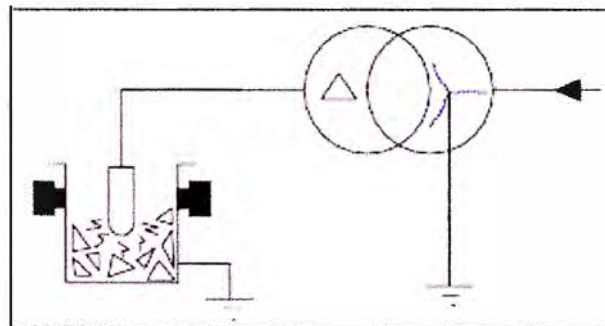
- Tres reóstatos (uno por electrodo) de ajuste de la intensidad o potencia en marcha automática.
- Linternas de señalización del cambiador de tensiones y del interruptor principal.

Actualmente las magnitudes que se miden o sobre las que se acciona, siguen siendo las mismas. Sin embargo ha cambiado la forma, ya que en lugar de relojes hay pantallas táctiles y lectores digitales.

### 2.3 Introducción a las perturbaciones eléctricas generadas por los hornos de arco eléctrico

El horno de arco eléctrico, por ser una carga eléctrica de características no lineales, es una fuente de generación de corrientes armónicas en forma aleatoria. [7]

En la Fig. 2.7 se muestra una configuración típica de horno de arco eléctrico. En este caso se producen armónicos por las variaciones aleatorias en los instantes del establecimiento del arco.



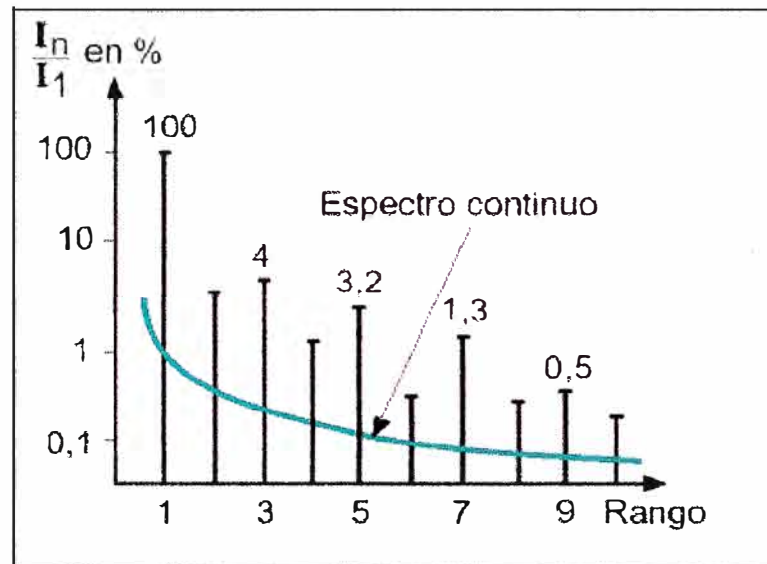
**Fig.2.7 Configuración típica de horno de arco eléctrico [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Adicionalmente, las fluctuaciones de voltaje debida a variaciones rápidas de la longitud del arco producen una gama de frecuencias, predominantemente en el intervalo de 0,1 a 30 Hz a cada lado de los armónicos característicos, a estos armónicos que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental se les denomina inter-armónicos.

Este efecto es mayormente causado durante el proceso de fusión debido al movimiento continuo de la chatarra y a la interacción de las fuerzas electromagnéticas producidas por los arcos.

Durante el proceso de refinado el arco es más estable aunque todavía existe una modulación de su longitud por las ondulaciones que se producen en las superficies del metal fundido.

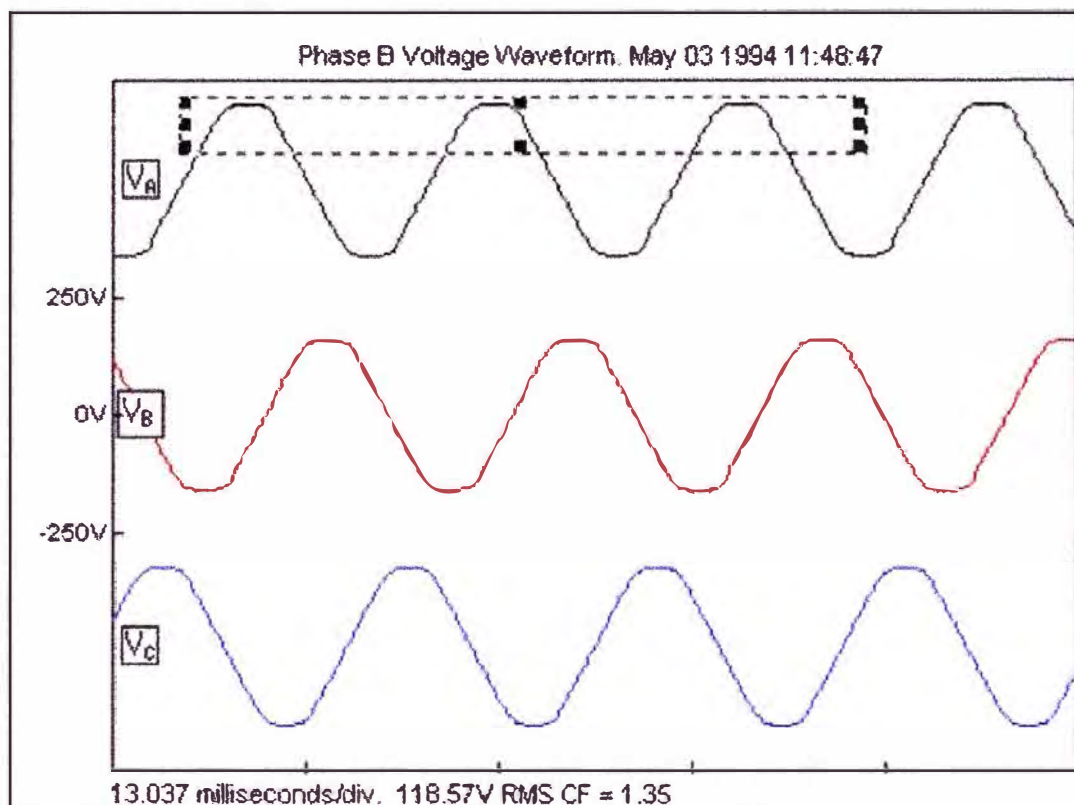
En la Fig. 2.8 se puede observar un ejemplo del espectro de corriente que toma un horno de arco eléctrico.



**Fig.2.8 Espectro de corriente que alimenta un horno en corriente alterna [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Debido a que el arco es no lineal, asimétrico e inestable, induce espectros que contienen bandas impares, pares y una componente continua (ruidos de fondo a frecuencia cualesquiera). El nivel espectral, es función del tipo de horno, de su potencia, de su periodo de funcionamiento considerado: fusión, afinado, etc. En éstos casos sólo la medida experimental permite determinar el espectro de manera precisa.

Cuando la instalación eléctrica tiene una gran cantidad de armónicos de corriente, éstas pueden provocar una deformación de la forma de onda de voltaje, llegando a presentar achatamientos o aplanamiento en la parte superior e inferior de la onda (Ver Fig.2.9). Este aplanamiento hace que la señal no alcance el valor pico adecuado, provocando el mal funcionamiento de los puentes de diodos, que se encuentran en fuentes de alimentación o convertidores de frecuencia, que consumen corriente cuando la señal de voltaje alcanza su valor máximo.



**Fig.2.9 Forma de onda achatada por efecto de armónicos. [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Esto hace que los diodos no trabajen en condiciones de operación nominales teniendo como consecuencia reducción del tiempo de vida o provocando paradas intempestivas en los variadores de velocidad, discos duros quemados o reinicializaciones de las computadoras, parpadeo de la iluminación (flicker), etc.



## **CAPITULO III**

### **PERTURBACIONES ELECTRICAS OCASIONADAS POR LA OPERACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELECTRICO**

#### **3.1 Introducción**

El capítulo anterior se enfocó en describir cómo funciona un horno de arco eléctrico y cómo por a la naturaleza de su funcionamiento ocasiona fenómenos eléctricos como armónicos, distorsión de onda, flickers, etc.

En este capítulo se explica en qué consisten los fenómenos eléctricos provocados por la operación de un horno de arco eléctrico y como mediante el uso del SVC Light se puede mitigar este impacto llevándolo prácticamente a pasar desapercibido en la red.

#### **3.2 Descripción de fenómenos eléctricos ocasionados por la operación del horno de arco eléctrico.**

Las características ideales (amplitud, forma, frecuencia y simetría) de la forma de onda del voltaje pueden verse alteradas por diversas causas, a estas desviaciones de algunos de los parámetros de la onda senoidal se conocen como perturbaciones eléctricas. Las perturbaciones eléctricas pueden ser generadas por varias causas, una de las cuales es la conexión a la red de energía eléctrica de ciertos tipos de cargas perturbadoras (hornos de arco eléctrico, variadores de velocidad, rectificadores, etc).

A continuación se describe en que consiste cada una de las perturbaciones eléctricas asociadas al funcionamiento del horno de arco eléctrico.

##### **3.2.1 Transitorios**

El término transitorio ha sido usado para el análisis de variaciones en el sistema de potencia y para denotar un evento que es indeseado. [7]

Los efectos de los transitorios son los siguientes:

- Ocasionan daños inmediatos o lentos a los microprocesadores digitales.
- Deterioran el aislamiento de los conductores y bobinas de los transformadores.
- Ocasionan daños en los sistemas de iluminación electrónicas.
- Constantemente existen desconexiones de equipos sensibles.

Los transitorios pueden ser clasificados en dos categorías:

- Transitorios Impulsivos

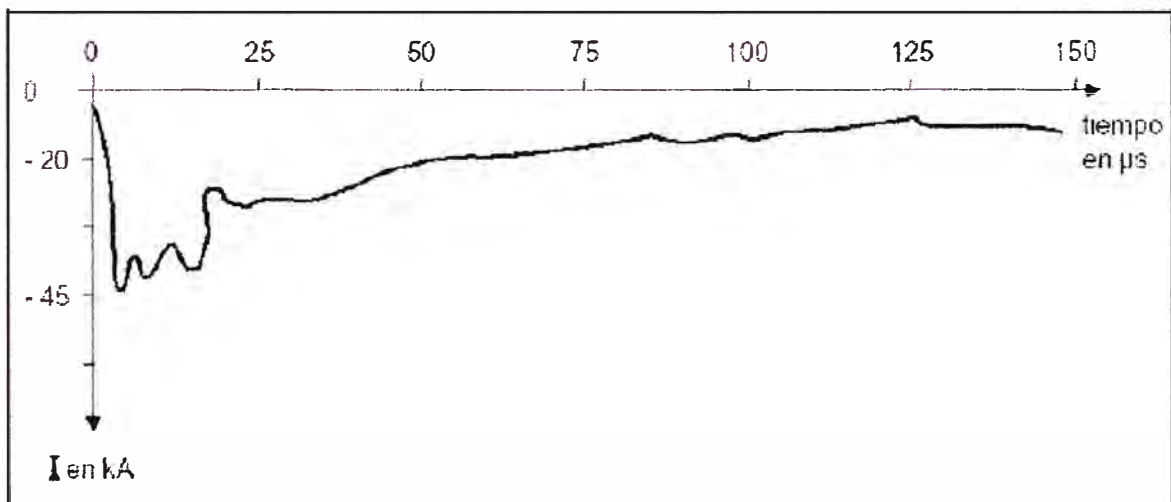
Un transitorio impulsivo es una variación súbita de tensión o corriente a una frecuencia distinta de la fundamental, es unidireccional en su polaridad (puede ser positiva o negativa). Estos transitorios son causados por las siguientes causas:

- Fallas en las conexiones a tierra de los circuitos de potencia, líneas y circuitos de señal.
- Conmutación en el arranque de motores o cargas grandes.
- Falsos contactos en instalaciones eléctricas.

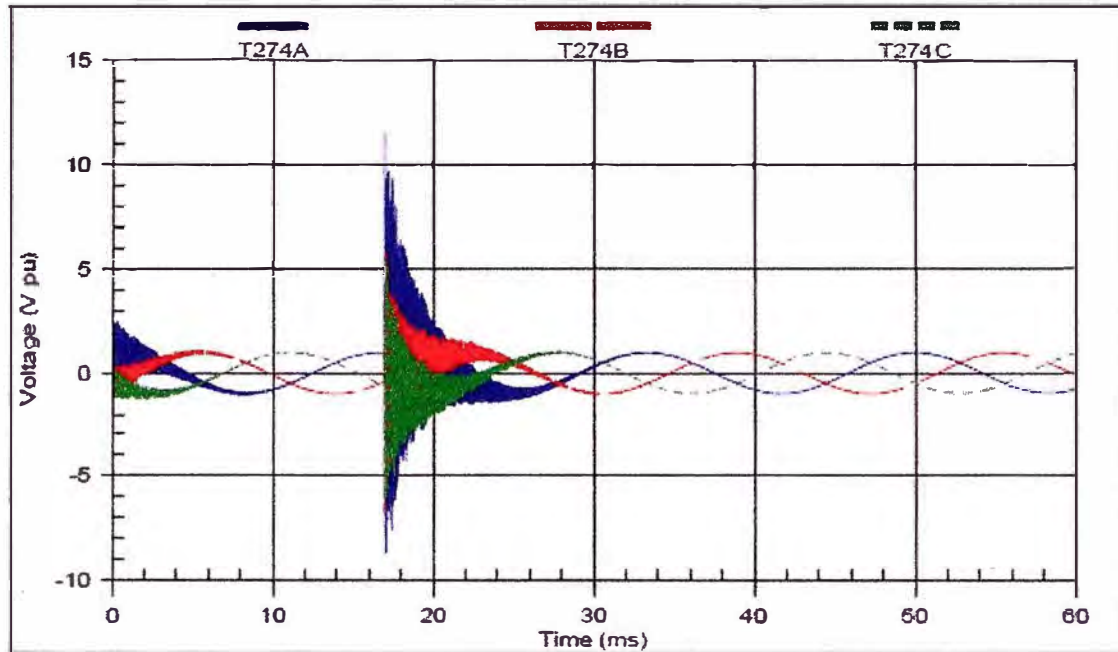
- Transitorios Oscilatorios

Es una variación súbita de voltaje o corriente o ambos, puede ser positivo y negativo (oscilatorio). Estos transitorios son causados por las siguientes causas:

- Conexión y desconexión de bancos de condensadores.
- Conexión y desconexión de cargas de electrónica de potencia.
- Descargas atmosféricas (rayos, relámpagos) en los circuitos de potencia.



**Fig.3.1 Oscilograma de una corriente de rayo [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**



**Fig.3.2 Sobrevoltaje debido a un impulso de voltaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.2 Sobrevoltaje

Esta perturbación sucede cuando existen incrementos en el valor rms del voltaje en más de 5% de la tensión nominal, con una duración mayor a 1 minuto. [7]

Causas que generan los sobrevoltajes:

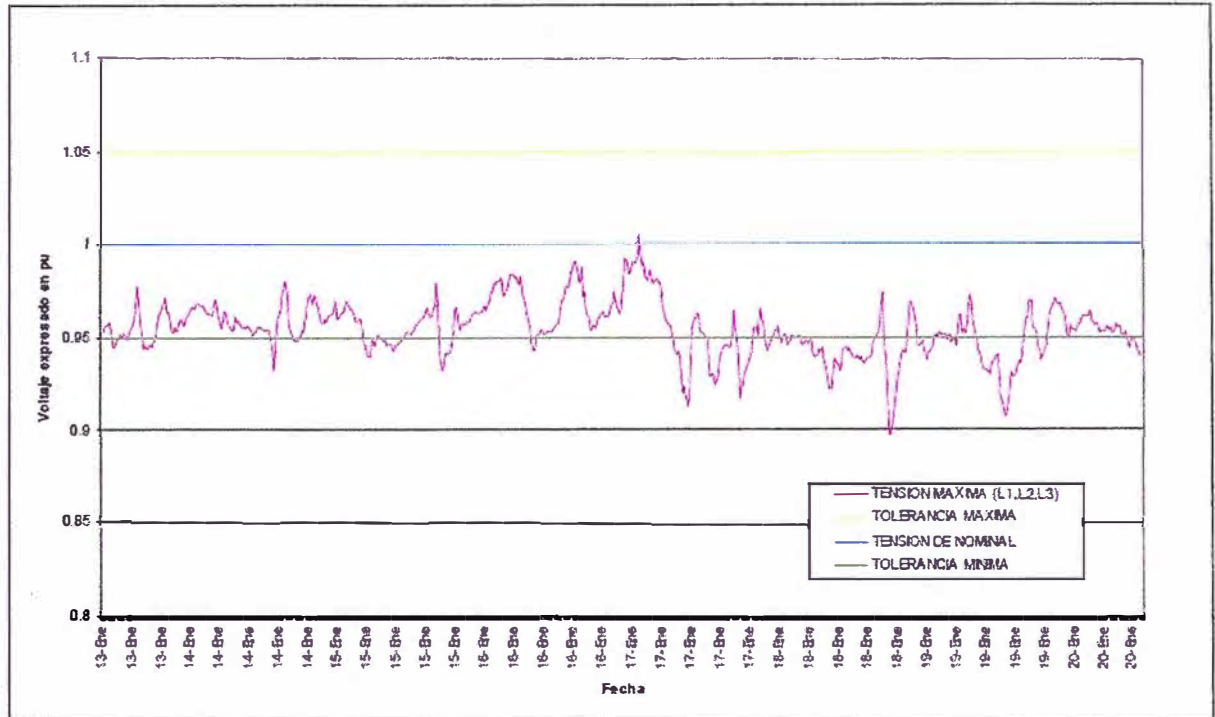
- Desconexión de grandes cargas de la red eléctrica.
- Energización de bancos de condensadores.
- Un inadecuado control de regulación de voltaje.
- Mala posición de los taps de los transformadores.

### 3.2.3 Subvoltaje

Esta perturbación sucede cuando existe un decremento en el valor del voltaje rms en -5% de la tensión nominal, con una duración mayor a 1 minuto. [7]

Causas que generan los subvoltajes:

- Arranque de motores o cargas grandes.
- Desconexión de bancos de capacitores.
- Tener circuitos eléctricos sobrecargados.



**Fig.3.3 Ejemplo de subtensión (niveles de voltaje, registro de 1 semana) [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.4 Variaciones de voltaje de corta duración

Las variaciones de voltaje de corta duración comprenden las bajadas y subidas de voltaje e interrupciones cortas, cada uno de estos fenómenos eléctricos puede ser designado como instantáneo, momentáneo y temporario, dependiendo de la duración. [9]

Ver Fig. 3.4.

<b>CATEGORÍAS Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE POTENCIA (IEEE std. 1159-1995)</b>		
<b>Variaciones de corta duración</b>	<b>Duración Típica</b>	<b>Magnitud típica del voltaje</b>
<b>Instantáneas</b>		
Interrupción	0,5 – 30 ciclos	< 0,1pu
Hundimientos	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9pu
Subidas	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8pu
<b>Momentáneas</b>		
Interrupción	30 ciclos – 3seg	< 0,1pu
Hundimientos	30 ciclos – 3seg	0,1 – 0,9pu
Subidas	30 ciclos – 3seg	1,1 – 1,4pu
<b>Temporarias</b>		
Interrupción	3seg – 1 minuto	< 0,1pu
Hundimientos	3seg – 1 minuto	0,1 – 0,9pu
Subidas	3seg – 1 minuto	1,1 – 1,2pu

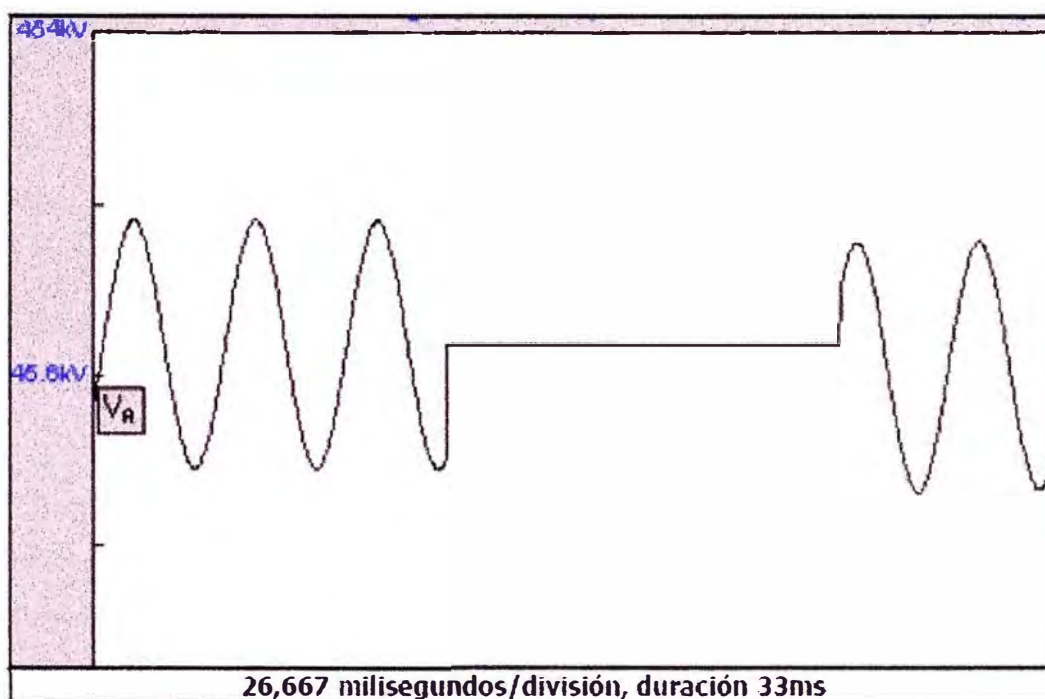
**Fig.3.4 Clasificación de variaciones de voltaje de corta duración según IEEE std. 1159-1995 [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Las variaciones de corta duración son ocasionadas por fallas eléctricas, energización de cargas de gran potencia (los cuales requieren de grandes corrientes de arranque) o falsos contactos.

### 3.2.5 Interrupciones de corta duración

Una interrupción es considerada de corta duración cuando el voltaje o la corriente de carga decrece en un valor menor que el 10% de la tensión nominal, por periodos de tiempo no mayor a 1 minuto. [7]

Las interrupciones son causadas por fallas en el sistema eléctrico, mal funcionamiento de los equipos de protección energización de grandes cargas o desconexiones momentáneas del cableado. Cuando el suministro es restaurado automáticamente a este resultado se le denomina interrupciones de corta duración. Las interrupciones de larga duración resultan cuando la restauración del suministro es manual.



**Fig.3.5 Interrupción de corta duración [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

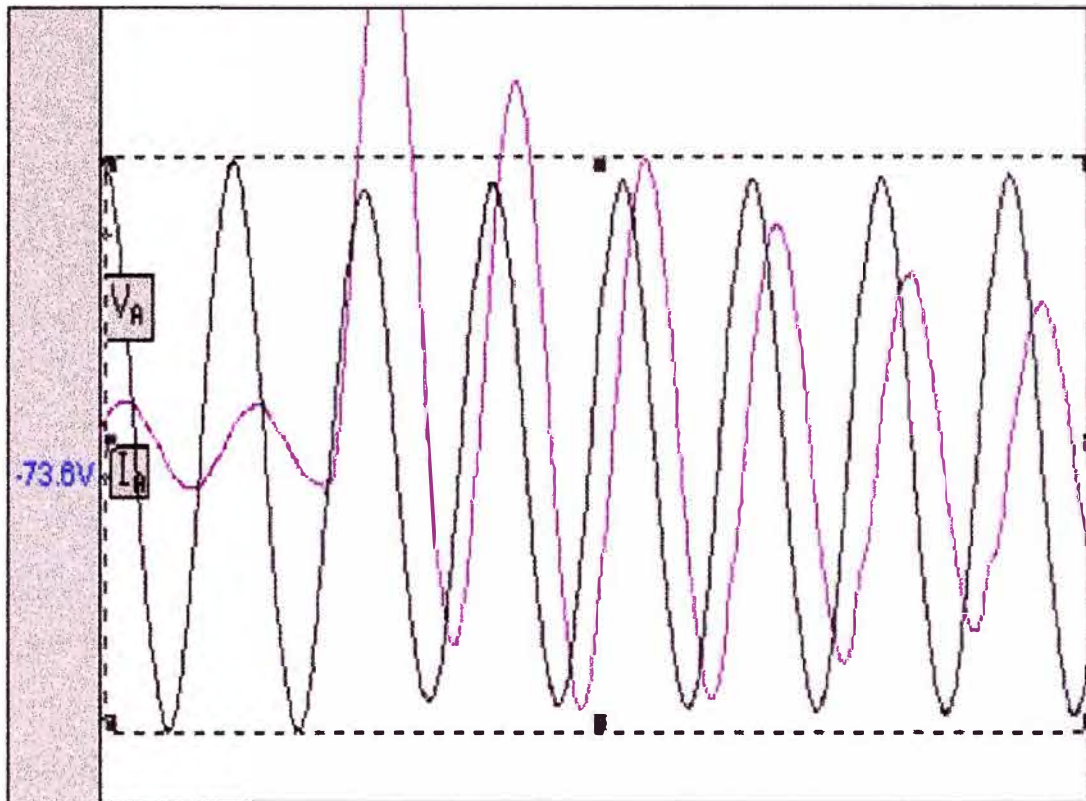
### 3.2.6 Hundimientos de voltaje (sags)

Los hundimientos de voltaje son reducciones súbitas del voltaje de alimentación en valores comprendidos entre 10% y 90% del valor del voltaje rms o corriente, con un tiempo de duración de 0.5 ciclos a 1 minuto. [7]

Las normas europeas definen a los hundimientos de voltaje como “voltajes sags”

Los hundimientos de voltaje son causados por fallas en el sistema eléctrico, pero también pueden ser causados por corrientes de arranque de cargas de gran potencia. La figura

3.6 muestra la variación de la onda de voltaje y corriente al entrar en operación una carga de gran potencia.



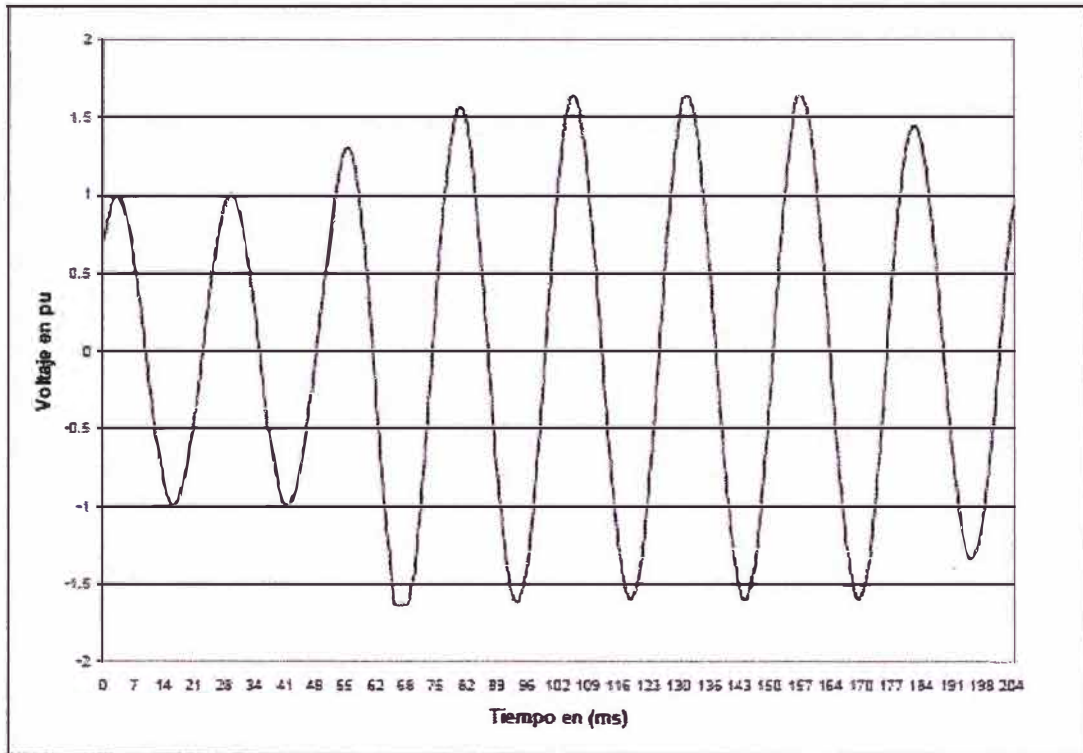
**Fig.3.6 Corriente de arranque vs. Variaciones de voltaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.7 Subidas de voltaje (swells)

Las subidas de voltaje son incrementos súbitos del voltaje de alimentación en valores comprendidos entre 110% y 180% del voltaje rms o corriente, con un tiempo de duración de 0.5 ciclos a 1 minuto. [7]

Al igual que los hundimientos, las subidas de voltaje son usualmente asociados con fallas en el sistema eléctrico como fallas en los circuitos de iluminación, motores equipos de electrónica de potencia, etc.

Las normas europeas definen a las subidas de voltaje como voltajes swells.

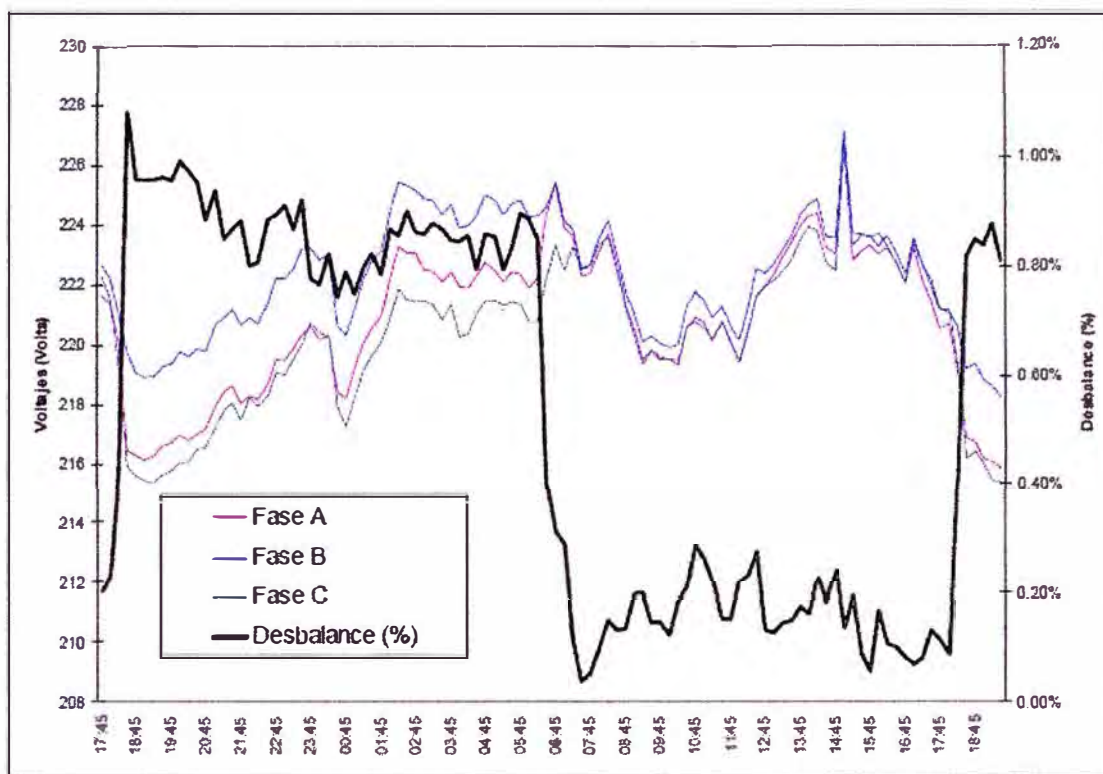


**Fig.3.7 Subida de voltaje o voltaje swell [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.8 Desbalance

El desbalance de voltaje es un fenómeno que sucede en un sistema trifásico en la que se observa que los valores eficaces de las tensiones de fase o los ángulos entre fases consecutivas no son iguales. [7]

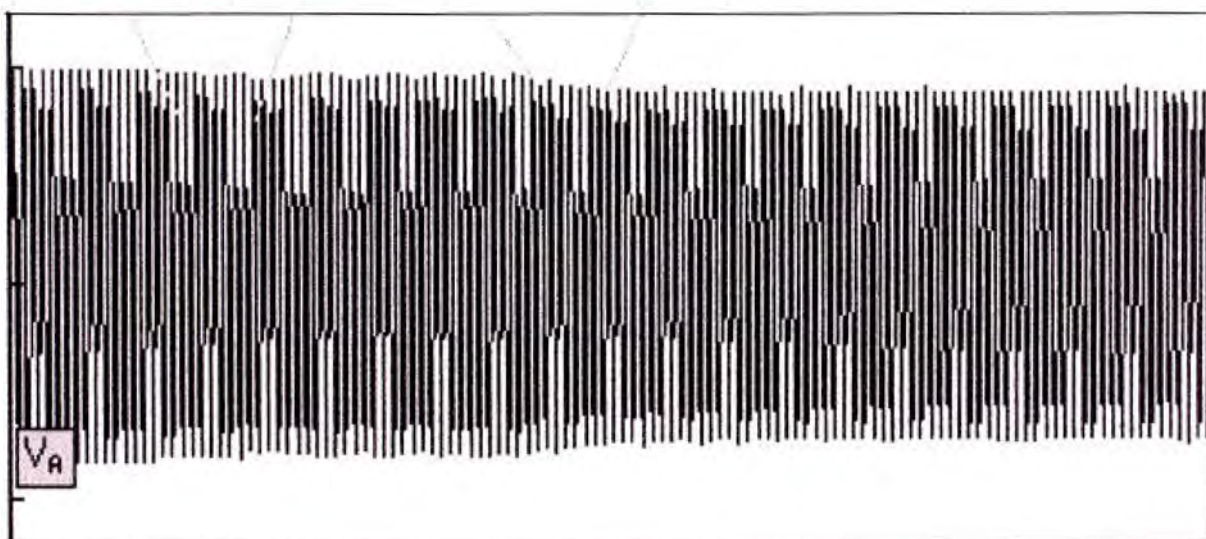
El desbalance del voltaje es definido algunas veces como la desviación máxima del voltaje promedio de las tres fases de voltaje o corriente expresado en porcentaje.



**Fig.3.8 Nivel de voltaje vs desbalance expresado en porcentaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.9 Fluctuaciones de voltaje

Cuando se analizan las fluctuaciones de voltaje se refieren al cambio de la envolvente de la onda de voltaje del sistema (Ver Fig. 3.9) [7]



**Fig.3.9 Ondulamiento de la onda de voltaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Se dice que hay fluctuaciones de voltaje cuando se producen variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en el voltaje del sistema eléctrico.

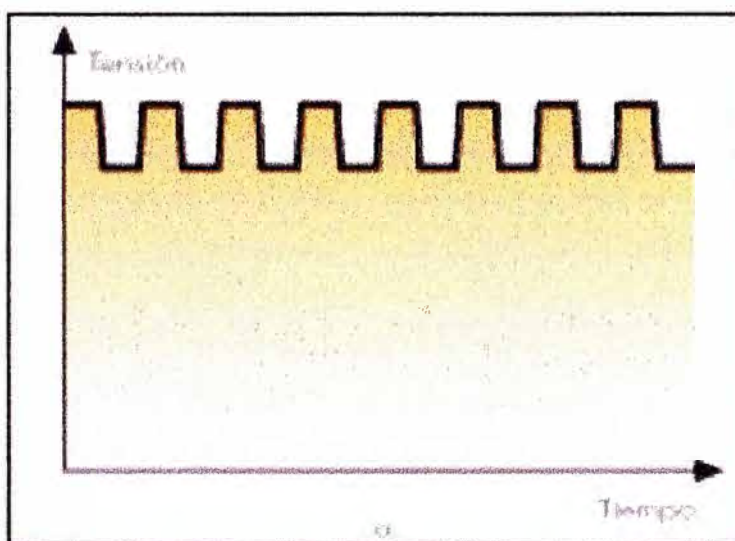


A su vez las variaciones de voltaje se definen como las variaciones del valor eficaz o valor pico de la onda de voltaje entre dos niveles consecutivos que se mantienen durante un tiempo finito no especificado.

Su duración va desde varios milisegundos hasta unos 10 segundos y con una amplitud que no supera el 10%(+/-) del valor nominal.

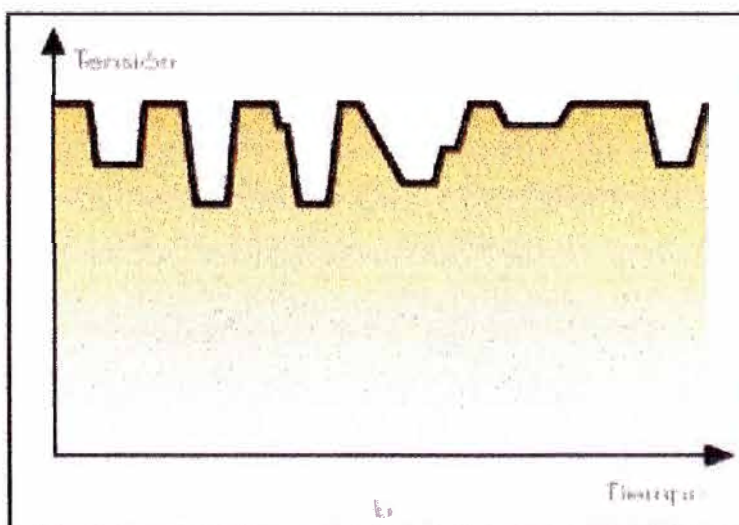
La comisión electrotécnica internacional (CIE) o (IEC) clasifica las fluctuaciones de voltaje en 04 tipos.

Tipo a: Variaciones rectangulares de voltaje de periodo constante. Por ejemplo las ocasionadas por interrupciones de cargas resistivas.



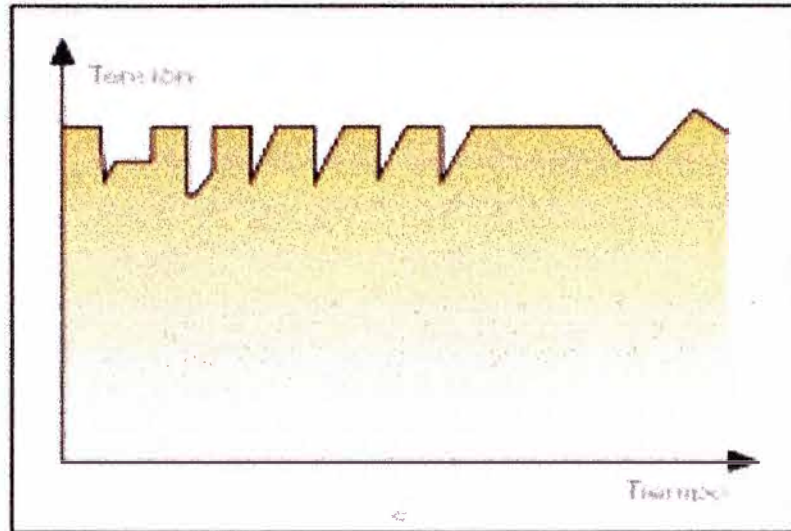
**Fig.3.10 Fluctuación de voltaje tipo a [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Tipo b: Escalones de voltaje que se presentan de forma irregular en el tiempo y cuya magnitud varía tanto en el sentido positivo y negativo.



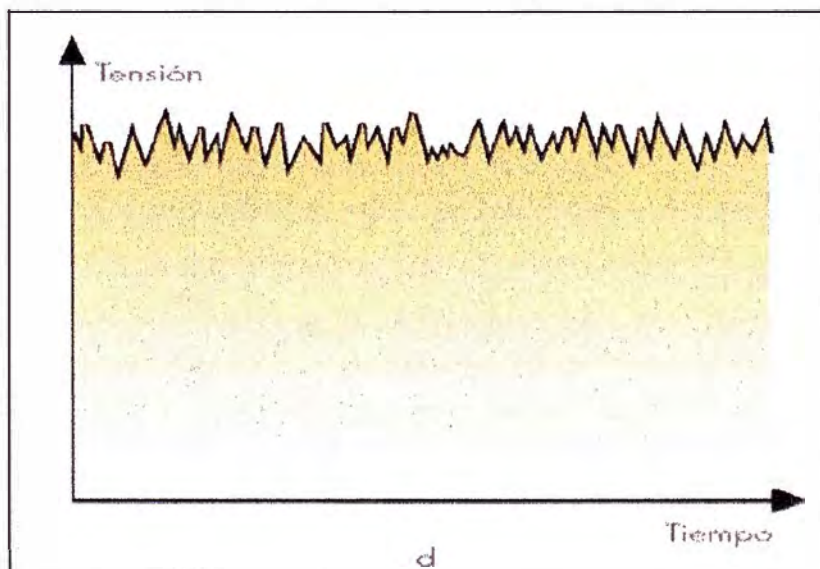
**Fig.3.11 Fluctuación de voltaje tipo b [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Tipo c: Cambios en el voltaje claramente separados que siempre llevan aparejados escalones de voltaje. Por ejemplo las originadas por acoplamientos de cargas no resistivas.



**Fig.3.12 Fluctuación de voltaje tipo c [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Tipo d: Series de fluctuaciones esporádicas o repentinas. Por ejemplo las producidas por cambios cíclicos o aleatorios de cargas.

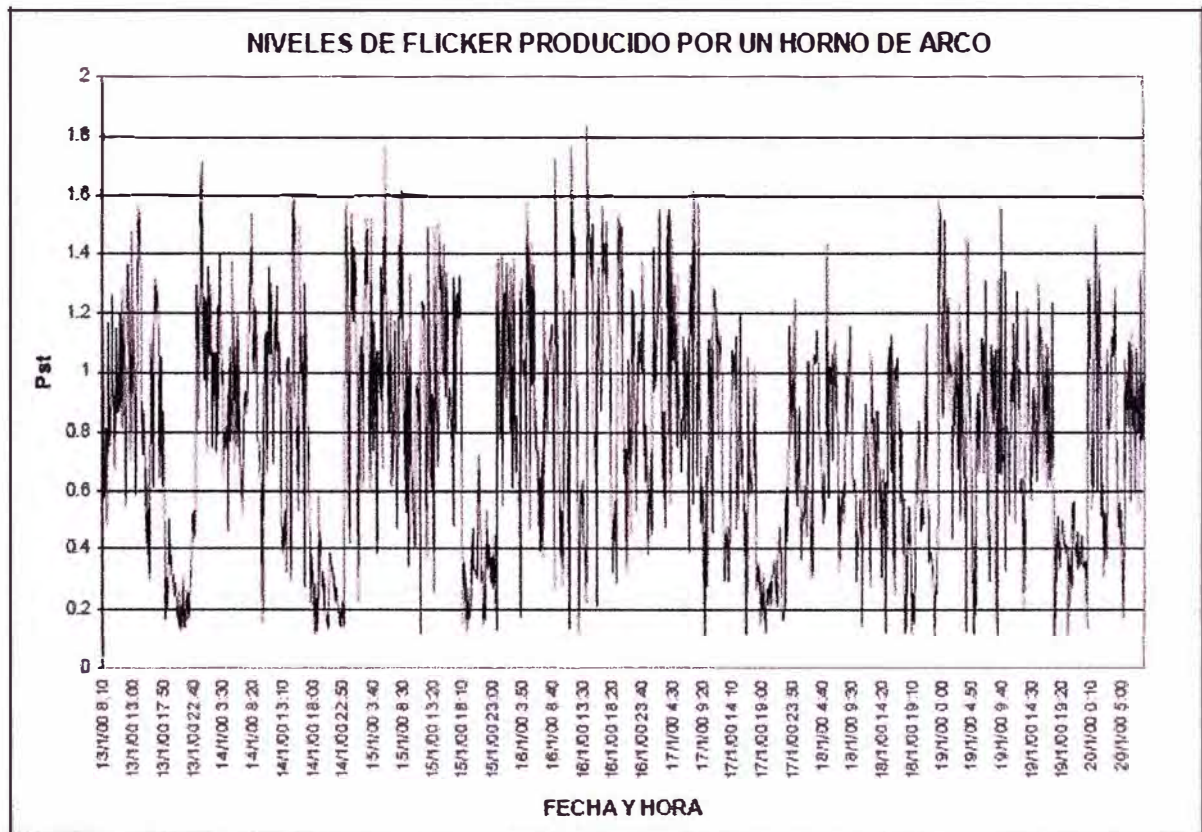


**Fig.3.13 Fluctuación de voltaje tipo d [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.10 Flicker

El flicker es la percepción de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por fluctuaciones de voltaje en la red de alimentación eléctrica. Origina en quien lo percibe una sensación desagradable. [7]

El flicker depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de voltaje que lo originan. Estas oscilan en 0.5Hz y los 30Hz de frecuencia. El cambio de la magnitud del voltaje puede ocurrir periódica o aleatoriamente dependiendo de la fuente. Usualmente la presencia de este tipo de fenómeno puede ser detectada por observación directa del centello o parpadeo de los sistemas de iluminación en usuarios industriales, comerciales e inclusive residenciales. [10]

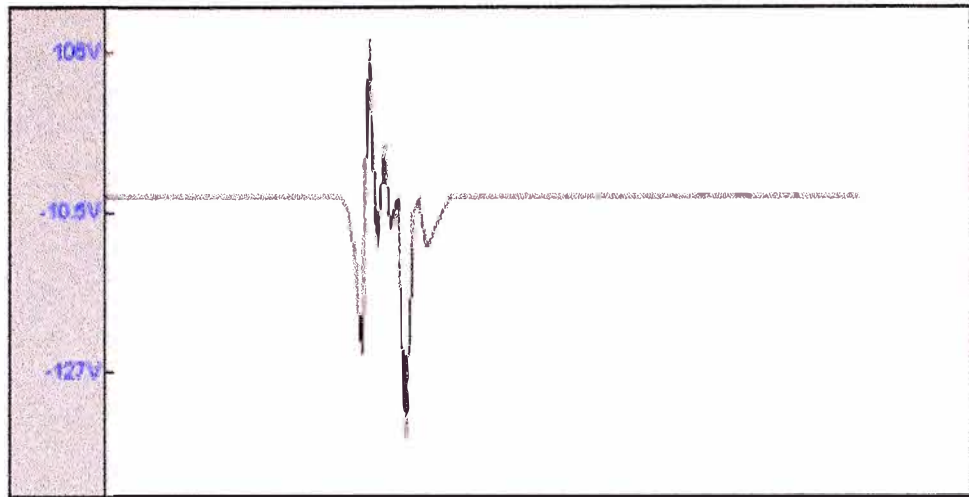


**Fig.3.14 Niveles de flicker producidos por un horno de arco eléctrico [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.11 Impulsos

Los impulsos son elevaciones bruscas del valor instantáneo del voltaje con duraciones inferiores a algunos milisegundos.

Son provocadas por maniobras de red de alimentación, conexión de baterías de condensadores, etc.



tiempo de duración 6 microsegundos

**Fig.3.15 Impulso de voltaje de 6 microsegundos de duración [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.2.12 Distorsiones y perturbaciones de la forma de onda

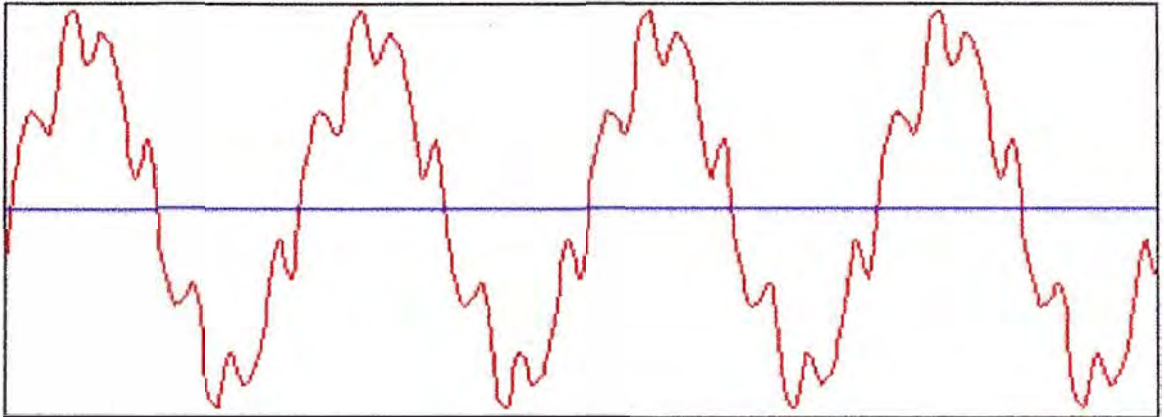
Una señal eléctrica se caracteriza por lo siguiente:

- Frecuencia.
- Voltaje.
- Intensidad.

Toda variación a estas características ocasionará distorsiones en la forma de onda de voltaje o corriente.

#### Armónicos

Las cargas no lineales de cierta potencia (rectificadores, onduladores, reguladores de corriente alterna, etc.) absorben del sistema eléctrico corrientes eléctricas no senoidales. Estas corrientes están formadas por una componente fundamental (60Hz) más una serie de frecuencias múltiples de la fundamental a la que llamaremos armónicos. La presencia de dichos armónicos en un sistema ocasiona una serie de inconvenientes, tales como: sobrecarga en condensadores, mal aprovechamiento de la instalación, y aumento de pérdidas de la misma, disparo intempestivo de los dispositivos de protección, parpadeo del alumbrado y sobre todo averías frecuentes y mal funcionamiento de equipos electrónicos. [8]

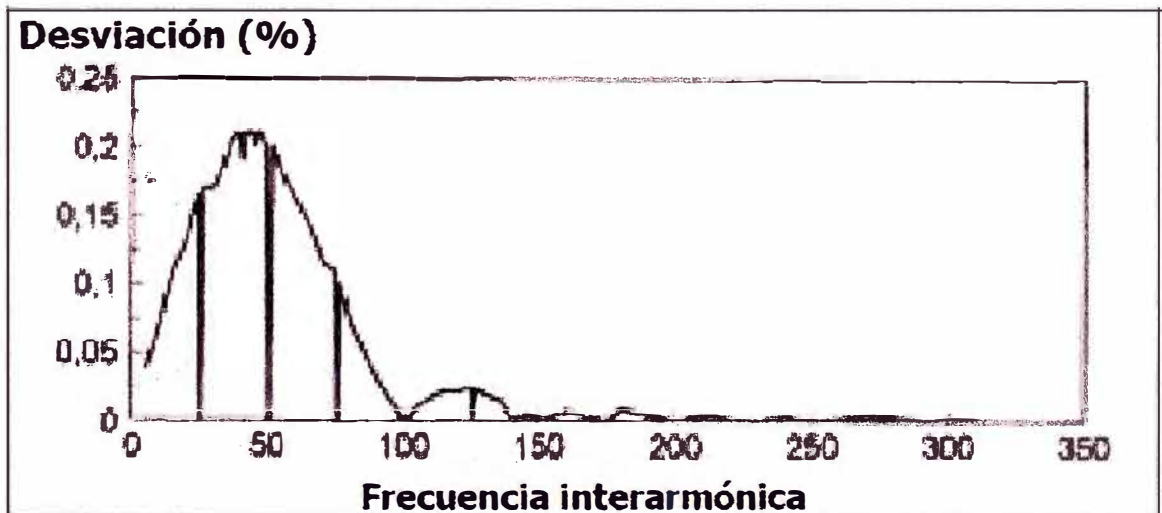


**Fig.3.16 Forma de onda generada por un convertidor de 6 pulsos [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

- Interarmónicos

Son fenómenos eléctricos que a diferencia de los armónicos de voltaje y corriente tienen frecuencias que no son múltiplos de la frecuencia fundamental. Estos pueden presentarse como espectros de ancho de banda. [8]

Las principales fuentes de interarmónicos son los cicloconvertidores, convertidores estáticos de frecuencia, motores de inducción y dispositivos de arco.

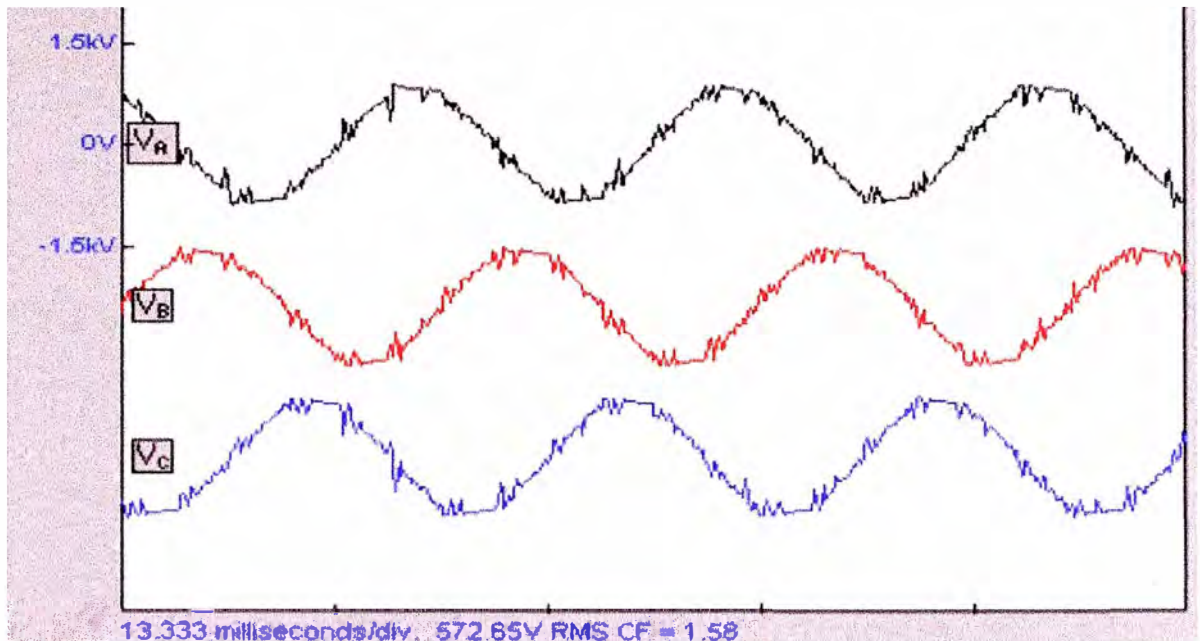


**Fig.3.17 Ejemplo de ancho de banda de interarmónicos [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

Notching

Es un disturbio de voltaje periódico ocasionado por una operación normal de un dispositivo electrónico de potencia. Una operación normal es comúnmente cuando el dispositivo electrónico conmuta corriente de una fase a otra provocando, entre fases, un cortocircuito. Desde que constantemente ocurren los notching, estos pueden ser

caracterizados a través del espectro armónico. La frecuencia de los componentes asociados con los notching pueden ser totalmente altas y no pueden ser registrados con facilidad por los equipos de medida que son usados para el análisis de armónicos. [7]



**Fig.3.18 Voltaje notching generado por un variador de velocidad [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### Ruidos

Es definido como una señal eléctrica no deseada con un ancho de banda espectral que contiene altas frecuencias superpuestas por encima de la frecuencia del sistema eléctrico.

Son causados por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, cargas con rectificadores de estado sólido, y conmutaciones en suministros eléctricos.




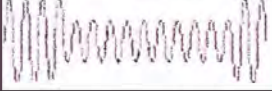


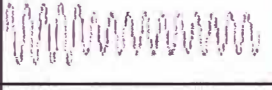




Básicamente los ruidos consisten de una distorsión no deseada en la señal de potencia que no puede ser clasificada como una distorsión armónica o un transitorio.

Los ruidos perturban a los dispositivos electrónicos como microprocesadores y controladores programables. El problema puede ser mitigado usando transformadores de aislamiento, filtros y condiciones lineales.

Es transmitido por aparatos eléctricos cercanos tales como reactores de iluminación fluorescente, motores eléctricos impresoras, fotocopiadoras y hasta otras computadoras.

Con el tiempo, y en conexión con los impulsos de voltaje, el ruido puede desgastar componentes eléctricos y causar que fallen sin alguna razón aparente.

La Fig.3.19 resume las perturbaciones analizadas que guardan relación con la operación de un horno de arco eléctrico.

CATEGORÍA	DURACIÓN	MAGNITUD	FORMA DE ONDA DISTORSIONADA	
<b>Transitorios</b> Impulsivos	<50ns>1ms	0 ~ 10pu		
	Oscilatorios	<1us>50ms	0 ~ 6pu	
<b>Variaciones de voltaje de corta duración</b> Interrupción	10ms a 3s	100% (colapso de voltaje)		
	Hundimientos de voltaje	0,5 a 50ciclos	0,1 a 0,9pu	
	Subidas de Voltaje	0,5 a 50ciclos	1,1 a 1,8pu	
<b>Variaciones de voltaje de larga duración</b> Interrupción	3s a 1min	100% (colapso de voltaje)		
	Sub voltaje	>1min	0,8 a 0,9pu	
	Sobre voltaje	>1min	1,1 a 1,2pu	
<b>Distorsión de onda</b> Armónicos	Continua	0 ~ 25%		
	Notching	Continua	0 ~ 10%	
	Desbalance de voltaje	Continua	<3%	

**Fig.3.19 Resumen de perturbaciones eléctricas asociadas a la operación del horno de arco eléctrico (punto de vista de calidad de la energía) [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú]**

### 3.3 Impacto en la red de alimentación del horno de arco eléctrico

El impacto del horno de arco eléctrico en la red de alimentación está caracterizado principalmente por los siguientes puntos:

- Gran consumo aleatorio de potencia reactiva con bajo factor de potencia.
- Fuerte generación de armónicos pares, impares e interarmónicos.
- Severo desbalance de fases

#### 3.3.1 Consumo de potencia reactiva

Se puede observar un diagrama de carga típico en la figura 3.20. De la figura se aprecia que la variación de la potencia reactiva  $\Delta Q$  es mucho más grande que la variación de potencia activa  $\Delta P$ . Ese consumo grande y variable de potencia reactiva trae como consecuencia una caída de tensión y fluctuaciones en el nivel de tensión de la barra del horno de arco eléctrico.

Estas fluctuaciones de voltaje dentro de la banda de frecuencias en las que el ojo humano es particularmente sensible, típicamente 0,1Hz a 25 Hz, trae consigo el denominado efecto flicker.

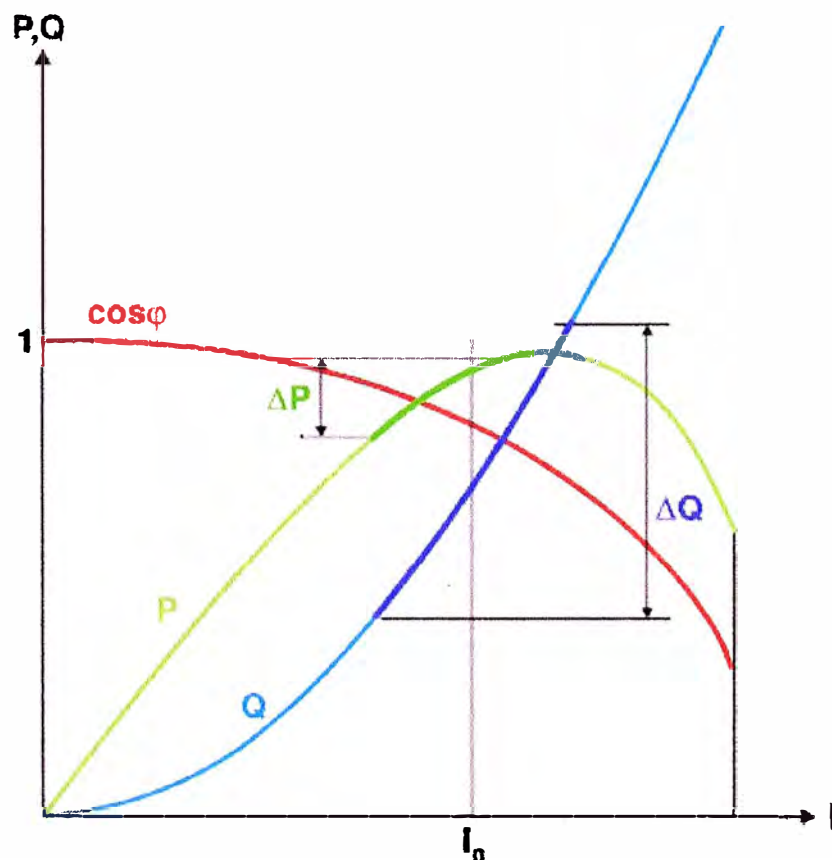


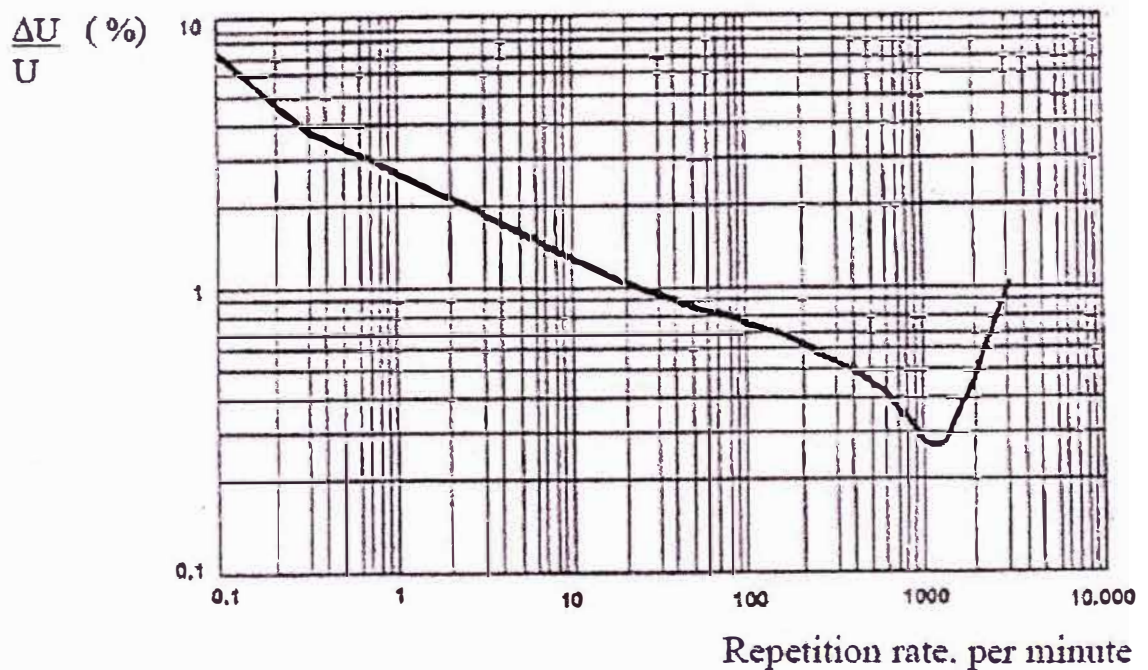
Fig.3.20 Diagrama de carga de un horno de arco eléctrico [Fuente: ABB]



### 3.3.2 Flicker

El flicker se expresa mediante el índice de severidad de flicker  $P_{st}$ , el cual, expresa directamente el límite de irritabilidad al ojo humano con  $P_{st}=1$ . [10]

La curva de umbrales de flicker de acuerdo a la IEC (Figura 3.21) muestra las máximas fluctuaciones de voltaje permitidas como una función del espectro de frecuencias del flicker para el caso límite de  $P_{st}=1$ . La parte más crítica del espectro de frecuencia está alrededor de los 8Hz, en el cual el ojo humano es más sensible a fluctuaciones de luz.



**Fig.3.21 Curva de umbrales de flicker Fuente: ABB]**

El estándar básico para hacer las mediciones de flicker es la IEC 1000-4-15. El intervalo de medición es cada 10 minutos (valores  $P_{st}$ ), así como también se puede considerar un intervalo más largo de hasta 2 horas ( $P_{lt}$ ). El límite  $P_{st}=1$  puede ser ocasionalmente mayor siendo que el intervalo que dura este valor sea lo suficientemente pequeño (usualmente menor a 1%). Luego el intervalo  $P_{st}$  (99%) puede ser considerado un valor más concreto.

Una manera cualitativa de medir la cantidad de flicker que puede ser generado por un horno de arco eléctrico con relación entre el tamaño de la carga y la potencia de cortocircuito de la red puede ser obtenida con la siguiente expresión:

$$P_{st}(99\%) \approx K_{st} \times \frac{S_{sc\text{ef}}}{S_{scn}} \quad (3.1)$$

Donde:

$P_{st}(99\%)$  : Índice de severidad de flicker de corto tiempo en el punto de conexión común no excedido durante el 99% del periodo de medición.

$K_{st}$  : Coeficiente de severidad de flicker del horno de arco eléctrico.

$S_{ceaf}$  : Potencia de cortocircuito del horno de arco eléctrico.

$S_{scn}$  : Potencia de cortocircuito en el punto de conexión común.

El coeficiente de severidad de flicker,  $K_{st}$ , depende de las condiciones de operación del horno de arco eléctrico y usualmente varía entre 50 y 75.

$K_{st}=50$  corresponde a un horno de arco eléctrico caliente cuyo material de fundición ya se encuentra en proceso de fundición.

$K_{st}=75$  corresponde al peor escenario, es decir, un horno de arco eléctrico frío que recién inicia el proceso.

$S_{CEAF}$ , la potencia de cortocircuito del horno de arco eléctrico es calculada con todas las reactancias en el circuito hasta el punto de conexión común tomado en consideración. Es usualmente un factor de  $\sqrt{2}$  a 2 veces la potencia del transformador que alimenta al horno.

### 3.3.3 Armónicas

La fuerte característica no lineal de un horno de arco eléctrico como una carga en el sistema eléctrico trae consigo un amplio espectro de armónicos. Esto se agrava con posibles resonancias mecánicas dentro de la estructura del horno las cuales son transmitidas hacia el arco a través de los electrodos y el tanque de fundición. Este fenómeno consecuentemente se suma a la corriente de arco eléctrico contribuyendo al espectro de armónicos del horno eléctrico.

El espectro de armónicos finalmente contiene armónicos pares, impares e interarmónicos. Para el caso particular de los interarmónicos por debajo de  $2f_0$  (donde  $f_0$  es la frecuencia fundamental), se tiene que estos producen el efecto flicker.

### 3.3.4 Desbalance de fases

Cada electrodo del horno de arco eléctrico representa una fase. El arco eléctrico que corre entre dos electrodos cualesquiera puede diferir del arco que corre entre otros dos electrodos en un instante dado provocando un desbalance de fases.

Adicionalmente a esto, en la primera etapa de fundición, cuando el material está empezando a derretirse, los arcos se forman y se extinguen de manera errática en los electrodos mientras el material comienza a moverse por las fuerzas electromagnéticas. El resultado final es un desbalance bien marcado entre fases, con casos extremos de cero corriente en alguna de las fases en un instante dado.

Desbalances de voltaje mayores a 1 – 2 % no son permitidos usualmente en las redes de potencia, en el caso de la instalación de un horno de arco eléctrico en una red no tan fuerte estos valores son ampliamente excedidos. Esto significa que un balance dinámico de carga es requerido en la mayoría de los casos como parte de una asesoría de calidad de la energía.

## **CAPITULO IV**

### **EL SVC LIGHT**

#### **4.1 Introducción**

En el punto anterior se detallaron todos los fenómenos eléctricos asociados a la operación de un horno de arco eléctrico, a grandes rasgos todas las perturbaciones anteriores están ligadas a la forma de onda de voltaje y/o corriente que se distorsiona por la característica aleatoria de la carga como es en el caso de un horno de arco eléctrico. Si se logra mitigar las perturbaciones que originan la variación en la forma de onda entonces se mitigarán también todas las demás perturbaciones eléctricas.

El SVC Light es un FACTS (Flexible AC Transmission System) de la marca ABB que ha sido diseñado exclusivamente para solucionar los problemas que acarrea trabajar con cargas tan variables como lo son los horno de arco eléctrico. En el presente punto se describe cómo funciona el SVC Light para lograr este objetivo.

#### **4.2 Principio de funcionamiento**

Para minimizar el impacto negativo tanto eléctrico como ambiental que tiene el funcionamiento de un horno de arco eléctrico, se recurre a la compensación dinámica como una solución ya probada exitosamente durante varios años. Mediante el uso de un SVC tradicional la calidad de la energía en el punto de acoplamiento común se ve mejorada tanto para la red de alimentación como para la misma planta industrial.

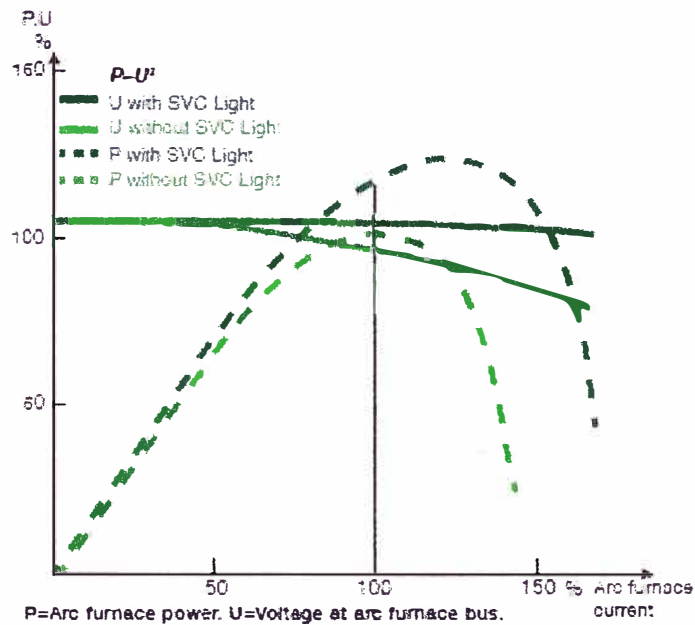
Ahora este concepto se ve superado con el uso del SVC Light el cual tiene una respuesta dinámica mucho más rápida y un diseño más compacto. Esto gracias a que usa la tecnología VSC (Voltage Source Converter) con IGBTs de suficiente tensión y corrientes que hacen de ésta tecnología la ideal para compensación reactiva en hornos de arco eléctrico. Con esto se logra agregar valor en la mejora de calidad de energía en dos aspectos: Mitigación del flicker y filtrado activo de armónicos. [4]

El SVC Light es básicamente un compensador dinámico con tecnología VSC, modulación PWM y que utiliza IGBTs como dispositivos de conmutación. La frecuencia de conmutación excede los 1600Hz haciendo del SVC Light útil para trabajar como un filtro activo de armónicos. [6]

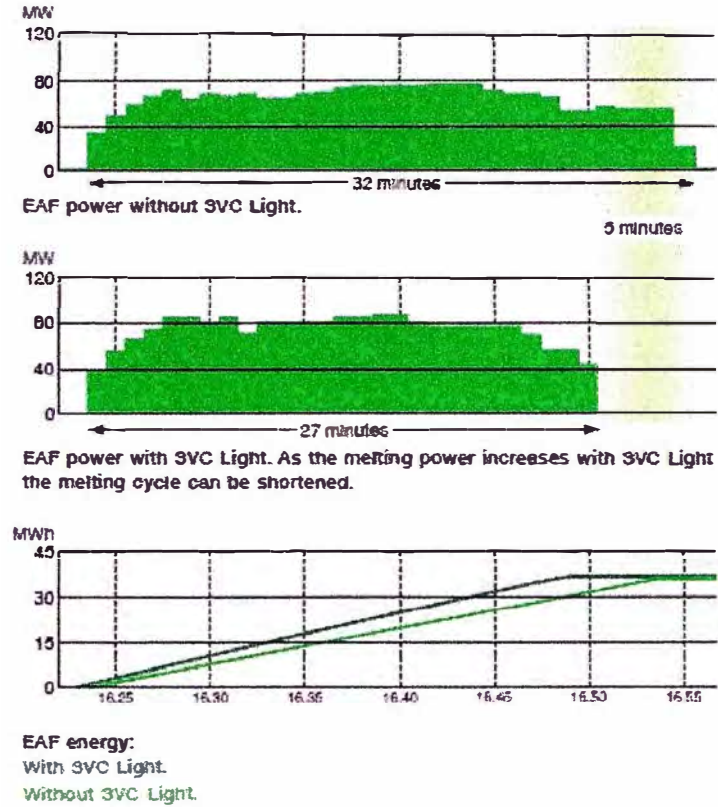
El SVC Light es un dispositivo para mitigar el problema del flicker y ataca al problema de raíz, es decir, en el flujo irregular de potencia reactiva por la red de suministro hasta el

horno. El sistema resuelve el problema midiendo el consumo de potencia reactiva e inyectando en el sistema la correspondiente cantidad de corriente, reduciendo así al mínimo absoluto el flujo total de potencia reactiva. La consecuencia inmediata es que también se minimiza el flicker,

Otras ventajas del sistema son que el factor de potencia es alto y constante, independientemente de las fluctuaciones de carga de los ciclos del horno, lo mismo que la tensión efectiva en los juegos de barras. Estas ventajas se traducen en un aumento de productividad del horno y en una reducción de costes de funcionamiento, ya que baja el consumo específico de energía, de electrodos y se reduce el desgaste de los revestimientos refractarios.



**Fig.4.1 Potencia y tensión del horno de arco eléctrico con y sin SVC Light [Fuente: ABB]**



**Fig.4.2 Diagrama de carga con y sin SVC Light [Fuente: ABB]**

### VSC (Voltage Source Converter)

Para equilibrar el consumo de potencia reactiva que varía rápidamente se necesita un dispositivo de compensación igual de rápido, esto se consigue utilizando componentes avanzados con tecnología IGBT capaces de dominar potencias elevadas. El VSC tiene la función de proporcionar una fuente de tensión totalmente controlable, que corresponde en fase y frecuencia a la tensión de las barras, con una amplitud controlable de forma continua y rápida.

Al controlar la fuente de tensión de las barras, el VSC actúa como generador o absorbedor de potencia reactiva, dependiendo de la relación de las tensiones. En el sistema el VSC es conectado al horno de arco eléctrico a través de un pequeño reactor. Con el voltaje VSC denotado por  $V_1$  y el voltaje de la barra del horno denotado por  $V_2$ , las ecuaciones de potencia del VSC se muestran a continuación [6]:

$$P = \frac{V_1 \times V_2}{X} \sin \delta \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{V_1 \times V_2}{X} \cos \delta - \frac{V_2^2}{X} \quad (4.2)$$

Donde:

- P : Potencia activa del VSC
- Q : Potencia reactiva del VSC
- V1 : Nivel de tensión del VSC
- V2 : Nivel de tensión en la barra del horno
- $\Delta$  : Angulo de desfase entre tensiones V1 y V2
- X : Reactancia del reactor de acoplamiento

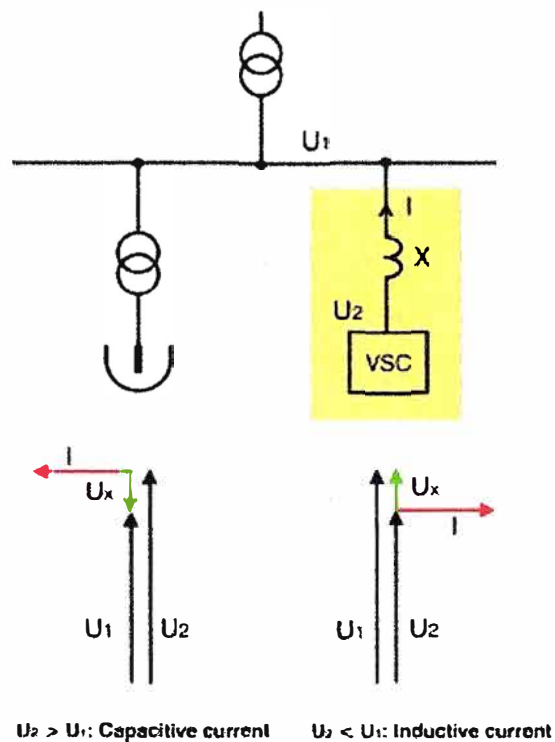
De las ecuaciones 4.1 y 4.2 podemos observar lo siguiente:

Escogiendo un desfase angular de  $0^\circ$  ( $\delta = 0^\circ$ ) el VSC actuará como un elemento resistivo. (En la realidad, habrá un pequeño desfase angular que denote las pérdidas internas del VSC).

Si  $V1 > V2$ , el VSC actuará como un generador de potencia reactiva, es decir, tendrá una característica capacitiva.

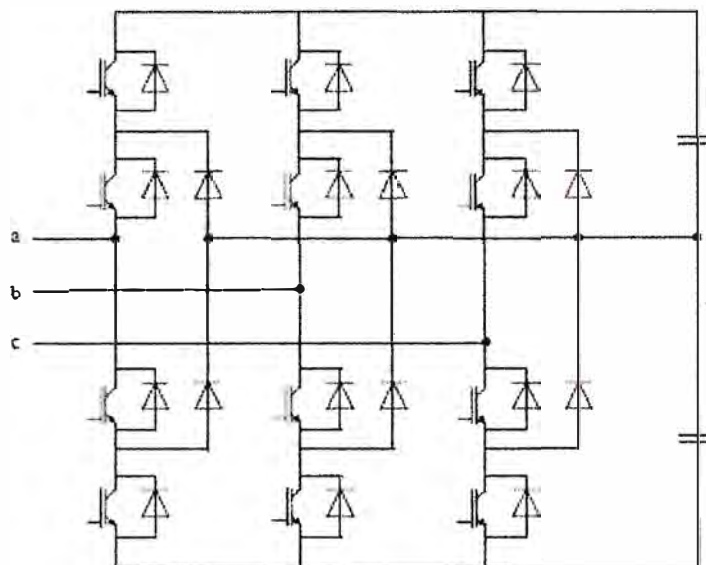
Si  $V1 < V2$ , el VSC actuará como un absorbedor de potencia reactiva, es decir, tendrá una característica inductiva.

En la Fig. 4.3 se muestra el esquema típico de un VSC.



**Fig.4.3 Esquema del VSC (Voltage Source Converter) [Fuente: ABB]**

El VSC usa una configuración de tres niveles con IGBT y diodos para la conmutación a altas frecuencias (Ver Fig. 4.4). Un lado del VSC es conectado a un banco de capacitores, el cual actúa como fuente de tensión DC. El convertidor produce la onda de tensión AC a la salida por medio de la conexión y desconexión programada y ordenada de los IGBT en los polos positivo, negativo y cero de la fuente DC.



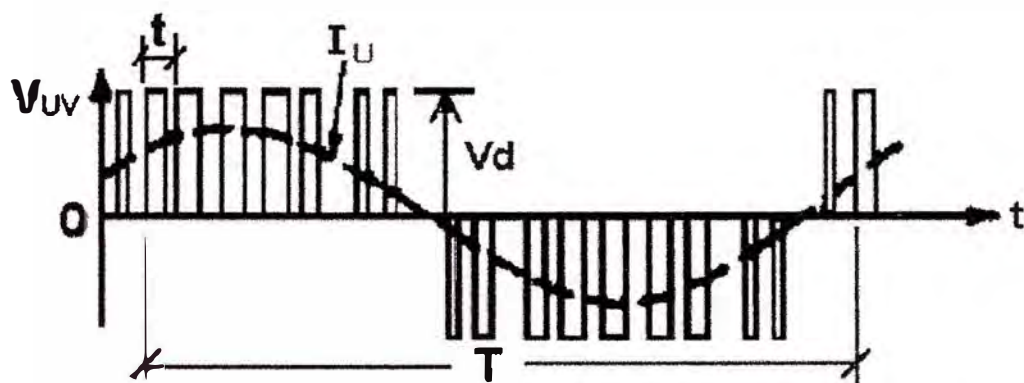
**Fig.4.4 Convertidor de 3 niveles [Fuente: ABB]**

El SVC Light utiliza la modulación PWM (Pulse width modulation), con esto logra producir una onda de voltaje casi sinusoidal y sin necesidad de un filtro de armónicos especial. Esto contribuye a un diseño compacto y muy bueno respecto del punto de vista de los armónicos.

Básicamente la modulación PWM funciona de la siguiente manera:

El convertidor genera pulsos de diversos anchos a alta frecuencia, activando y desactivando ciertas válvulas IGBT del SVC Light. Estos pulsos pueden ser positivos, negativos o cero. En la Fig. 4.5 se observa cómo es que la generación de estos pulsos da lugar a una onda equivalente casi senoidal. El promedio del voltaje eficaz  $V$  depende del ancho de los pulsos y la frecuencia efectiva vista desde el exterior es  $1/T$ . La velocidad de conmutación de los IGBT es  $1/t$  y es denominada frecuencia portadora.

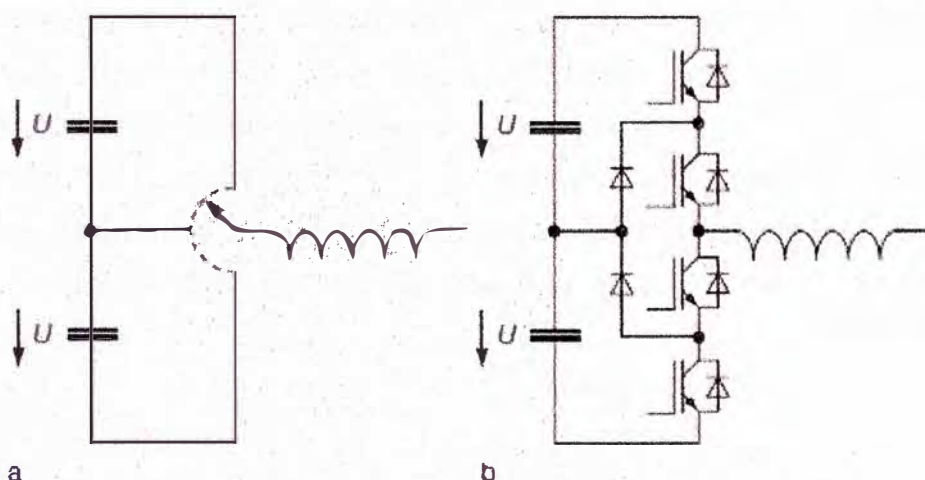




**Fig.4.5 Modulación PWM [Fuente: ABB]**

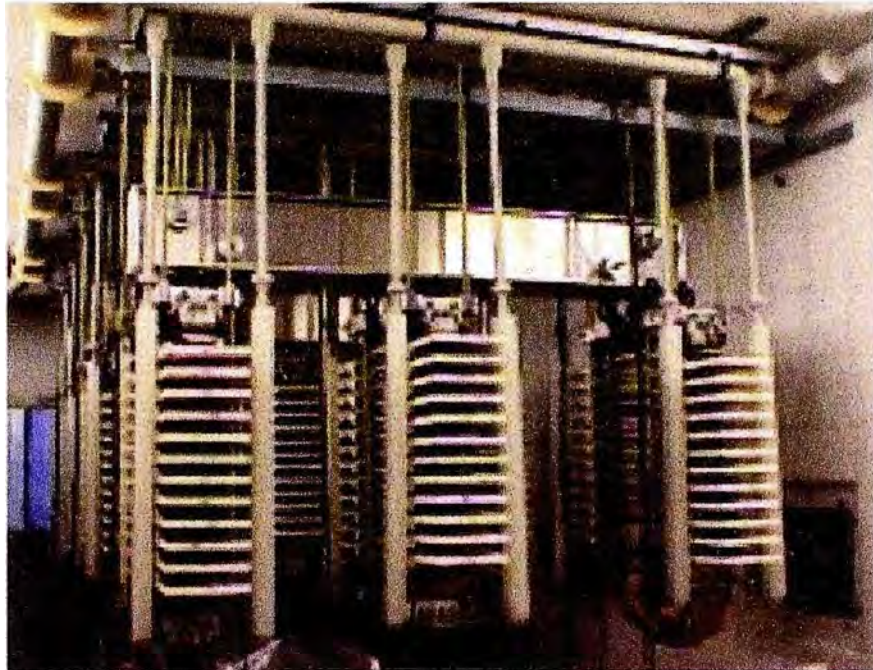
### Válvulas IGBT

El convertidor de 3 niveles usa la configuración NPC (Neutral Point Clamped), es decir, el lado de corriente continua del condensador es flotante o aislado de tierra. Esta configuración incluye cuatro (04) válvulas IGBT y dos (02) válvulas tipo diodo para cada fase. El condensador de corriente continua está dividido en este caso en dos condensadores conectados en serie. Cada válvula IGBT/diodo tiene que soportar la tensión que existe en uno de los condensadores. Las válvulas se han construido apilando los dispositivos (con refrigerados interpuestos) y aplicando una presión externa al grupo apilado. [4]



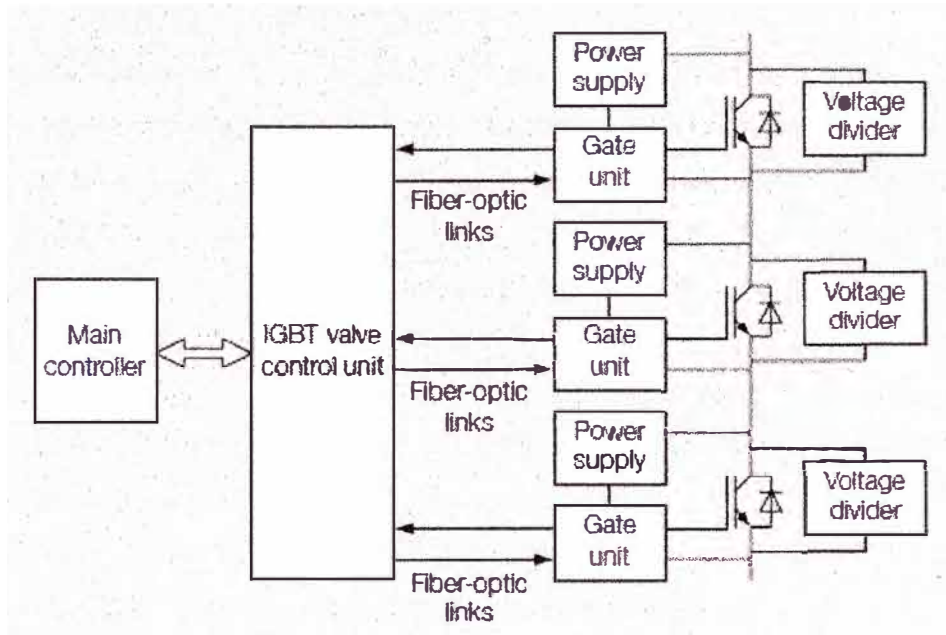
**Fig. 4.6 (a) Principio del convertidor de 3 niveles y (b) configuración del convertidor con conexión NPC, en punto neutro, una fase [Fuente: ABB]**

Las válvulas IGBT están refrigeradas con agua des ionizada. La refrigeración con agua permite diseñar un convertidor muy compacto y con gran capacidad de transporte de corriente. Su forma compacta, además de ocupar poco espacio en planta, tiene la ventaja de que la inductancia de bucle entre las válvulas IGBT y los condensadores de corriente continua se puede mantener en un nivel bajo, lo cual ayuda a reducir las pérdidas.



**Fig.4.7 Vista interna de las válvulas del SVC Light [Fuente: ABB]**

Para el SVC Light, el fabricante escogió como dispositivo conmutador a los IGBT pues permite su conexión en serie, gracias a la rápida respuesta de conmutación. Esta conexión en serie permite al SVC Light conectarse directamente a la barra del horno en el orden de las decenas de kV, además el IGBT presenta pequeñas pérdidas de conmutación y puede ser usado para conmutación a altas frecuencias. Con el tiempo se ha logrado desarrollar esta tecnología para manejar grandes potencias y con un alto grado de confiabilidad, haciéndolos perfectos para su uso en convertidores de potencia.



**Fig.4.8 Esquema de válvulas IGBT conectados en serie y conmutados al mismo tiempo [Fuente: ABB]**

Otra ventaja de los IGBT es que no necesitan bobinas de inductancia para limitar la  $di/dt$  ni condensadores de circuito de protección. Por el contrario el control de los parámetros  $di/dt$  y  $du/dt$  se puede realizar por medio del mando de puerta.

El IGBT es un transistor bipolar con una puerta MOS (Metal Oxide Semiconductor) a la que se aplica una tensión de mando positiva o negativa. Dado que el control del IGBT necesita muy poca energía, esta se puede obtener de la alimentación principal.

En el SVC Light se utiliza los IGBT Presspack, que es un nuevo dispositivo que se ha desarrollado para satisfacer las exigencias de flexibilidad más estrictas y que actualmente se utiliza también en los trenes de alta velocidad más modernos, brindando así una elevada potencia y gran disponibilidad.

El IGBT Presspack está alojado en una carcasa semejante a la de un tiristor convencional de alta potencia. En la carcasa los elementos IGBT y de diodo antiparalelo están conectados en paralelo, con contactos de presión que proporcionan normalmente el contacto eléctrico con el exterior. Este tipo de dispositivo cuenta con un modo de fallo de cortocircuito muy útil en un convertidor con dispositivos conectados en serie, cualquier dispositivo que falle se comportará como un cortocircuito. Dado que la redundancia es una característica estándar del SVC Light el fallo de uno de los componentes no tendrá efectos sobre el convertidor, que podrá continuar operando a plena potencia. El fallo se mantiene vigilado y se puede sustituir el componente defectuoso en el momento más adecuado, es decir, el que menos afecte al proceso.

### Conexión en serie de los IGBT

Cuando se conectan en serie los IGBT es muy importante repartir correctamente la tensión. Es esencial que los dispositivos conectados en serie se enciendan/apaguen a la vez. En el SVC Light, las señales de encendido y de apagado se transmiten a cada uno de los IGBT con un sistema de fibra óptica de gran ancho de banda. Los IGBT disponen también de un tipo especial de puerta o gate que enciende y apaga al IGBT con un ligero retardo y con  $du/dt$  controlada. Al apagado de una válvula IGBT o de una válvula de diodo le sigue un pequeño cambio de la tensión entre las distintas posiciones del IGBT. Esta diferencia se controla por medio de un adecuado diseño de los divisores de tensión de resistencia y capacidad.

Además todos los IGBT cuentan con sus propios sistemas de vigilancia de la sobretensión para detectar anomalías de comportamiento.

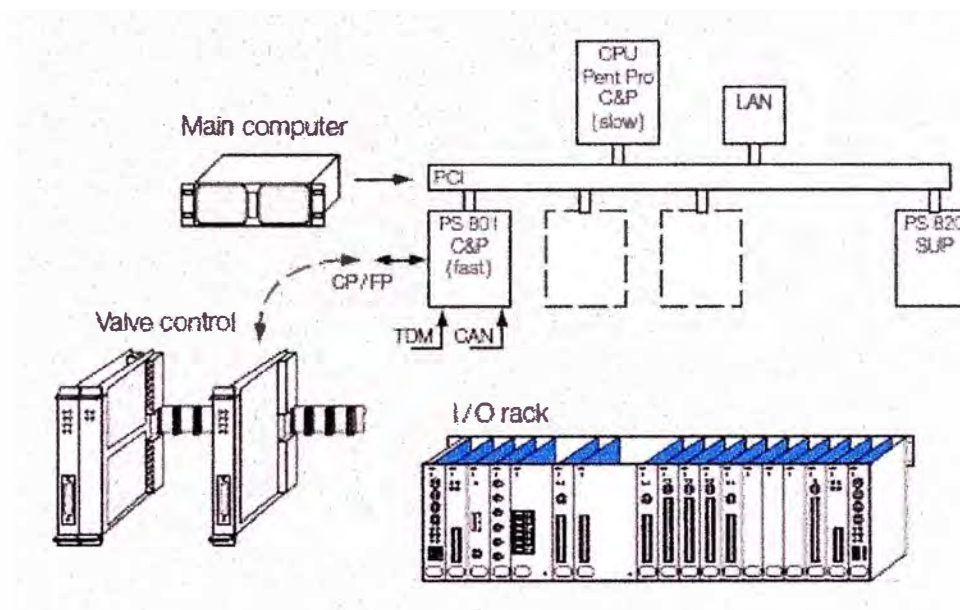
### Sistema de regulación y protección MACH2

Este sistema garantiza un procesamiento de datos rápido y extensivo y se basa en un hardware industrial estándar de ordenador personal (con Windows NT) que ofrece un sistema abierto, fácilmente integrable en los sistemas disponibles de acerías y al que se puede acceder desde el exterior por medio del sistema RAS (Remote Access services).

La estrategia de basar el sistema de regulación y protección en interfaces abiertas garantiza que se puedan aprovechar los avances que pueden producirse en un sector tan en evolución como es la electrónica.

Básicamente, el sistema está compuesto por tres unidades: el ordenador central, la unidad de entradas y salidas y la unidad de control de válvulas. La comunicación entre las unidades tiene lugar por medio de buses industriales estándar.

El servicio del sistema tiene lugar desde la estación de trabajo del operador, que puede ser un ordenador estándar. La comunicación hombre-máquina se realiza con In-Touch para Windows NT, el paquete de control gráfico más utilizado en el mundo.



**Sistema de regulación y de protección MACH2 para SVC Light**

CAN	Controlador de área de red
CPU	Unidad central de proceso
CP/FP	Impulsos de control / impulsos de disparo
LAN	Red de área local
PCI	Barra de interconexión de los componentes periféricos
SUP	Panel de mando
TDM	Barra multiplex, por reparto de tiempo

**Fig.4.9 Esquema del sistema de regulación y protección MACH2 para SVC Light [Fuente: ABB]**

#### Procedimiento de control para minimizar el retardo

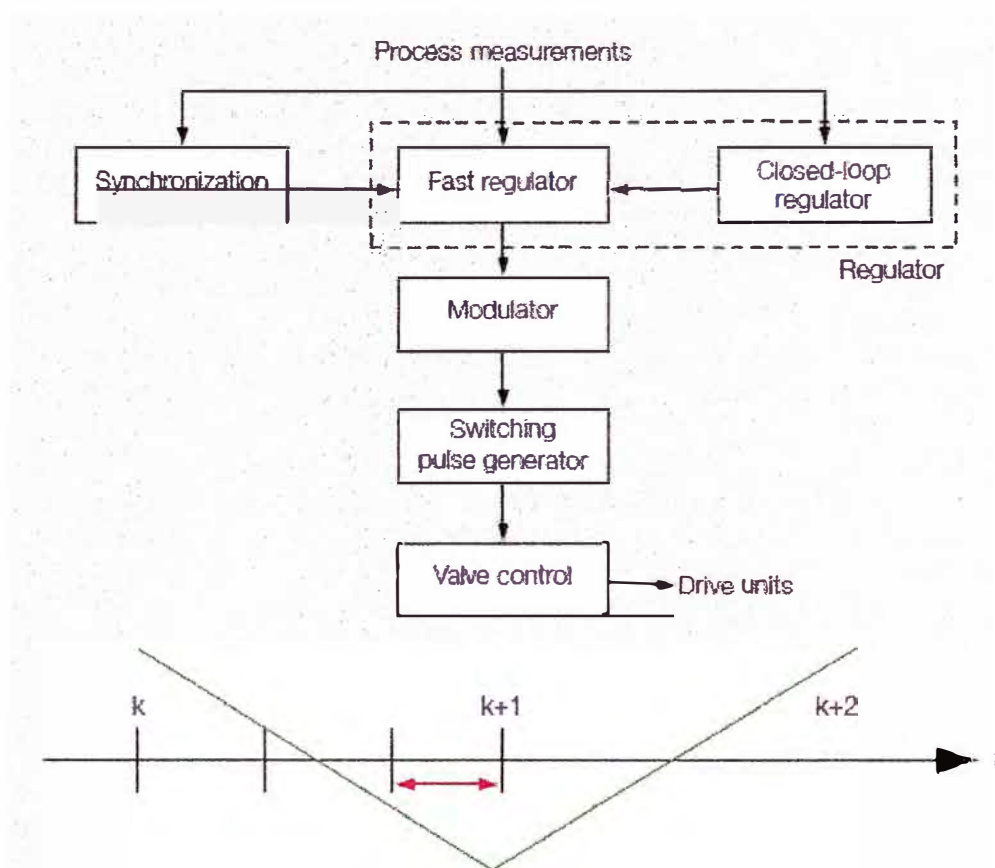
La amortiguación del flicker depende estrechamente tanto de la frecuencia de conmutación como del retardo entre el registro de los valores medidos y la siguiente conexión, y finalmente, de los algoritmos de control aplicados.

La frecuencia de conmutación se logra mediante el uso de los IGBT explicados anteriormente, los cuales tienen frecuencias de conmutación mayores a 1600Hz, que brindan una velocidad de respuesta muy buena.

Para minimizar el retardo entre el muestreo y la orden de conexión el procedimiento consiste en sincronizar las mediciones de los parámetros procesuales con la conmutación del circuito principal, por lo tanto se busca hacer los cálculos del algoritmo de parpadeo (regulador rápido) lo más próximo posible a la operación de conmutación, es decir, con valores medidos lo más tarde posible. La Fig. 4.10 muestra cómo se hacen las mediciones de proceso lo más próximas posibles a la operación de conmutación para reducir el efecto del retardo por tiempo de cálculo.

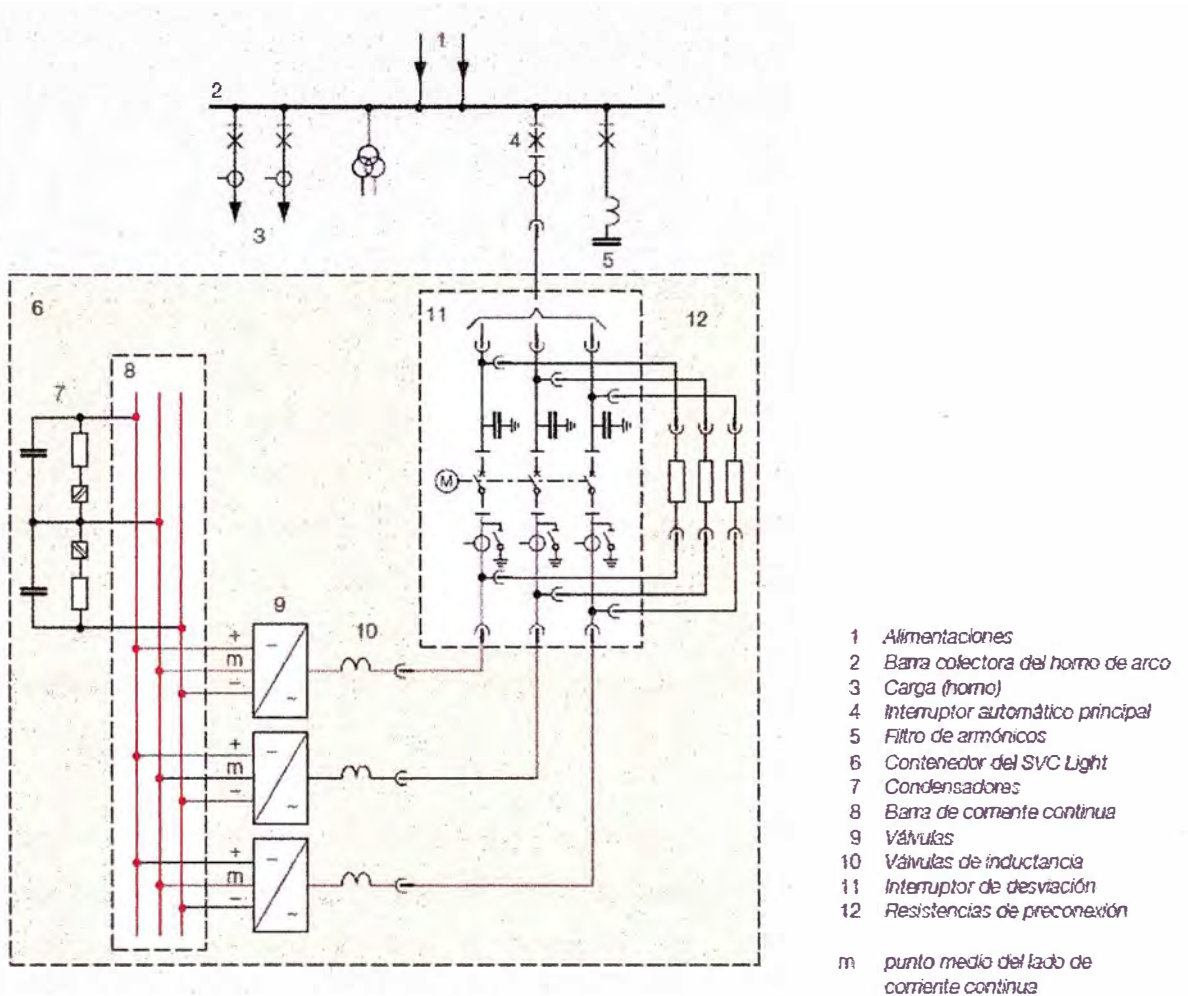
$K$  Número de la muestra  
 $t$  Tiempo

Verde Onda portadora  
 Rojo Retardo de cálculo



**Fig.4.10 Procedimiento de control para minimizar el retardo entre el muestreo de los parámetros de proceso medidos y el siguiente instante de conexión [Fuente: ABB]**

La figura 4.11 sirve para ilustrar los componentes eléctricos internos de un SVC Light ya instalado en una industria con horno de arco eléctrico.



**Fig.4.11 Esquema eléctrico interno y externo de un SVC Light instalado [Fuente: ABB]**

## **CAPITULO V**

### **ANALISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SVC LIGHT EN DIVERSAS PARTES DEL MUNDO**

#### **5.1 Introducción**

En los capítulos previos se han detallado las perturbaciones eléctricas que genera la operación normal de un horno de arco eléctrico y como el SVC logra mitigar estos fenómenos a tal punto de que pasan desapercibidos en el sistema de potencia, en el presente capítulo se expondrá brevemente varios casos donde la instalación del SVC Light permitió la operación del horno de arco eléctrico de manera eficiente y sin perturbaciones a la red de alimentación.

A continuación se presentan los principales casos de éxito en instalaciones con SVC Light a nivel mundial.

#### **5.2 Casos reales con SVC Light**

##### **5.2.1 Acería Uddeholm Tooling AB en Hagfors, Suecia**

La acería Uddeholm Tooling AB es un productor de acero cuyo proceso metalúrgico está basado en derretir la chatarra en un horno de arco eléctrico primario (EAF=Electric arc furnace) y seguidamente refinarla en un horno de arco eléctrico secundario (LF=Ladle furnace). [5]

El horno EAF es de 31.5 MVA con una sobrecarga temporal de 20% mientras que el horno LF es de 6 MVA con un 30% de sobrecarga temporal. Ambos hornos son alimentados de una red en alta tensión de 132 kV, mediante dos transformadores en paralelo que tienen 10.5 kV en el secundario. La red de alimentación es relativamente débil en el punto de conexión común (PCC=Point of common coupling) el cual no excede normalmente los 1000 MVA. Esta potencia de cortocircuito de la red es insuficiente para que la operación de los dos hornos de arco eléctrico mantenga la calidad de la energía en la planta y red de alimentación. Antes de la instalación del SVC Light la planta era fuente de perturbaciones en la red eléctrica y tenía problemas con el distribuidor de energía así como con los usuarios cercanos.

Con el SVC Light en operación, el efecto flicker residual en el punto de conexión común (PCC) fue proyectado para no exceder  $P_{st}(95\%)=1$ . Objetivo que fue alcanzado.

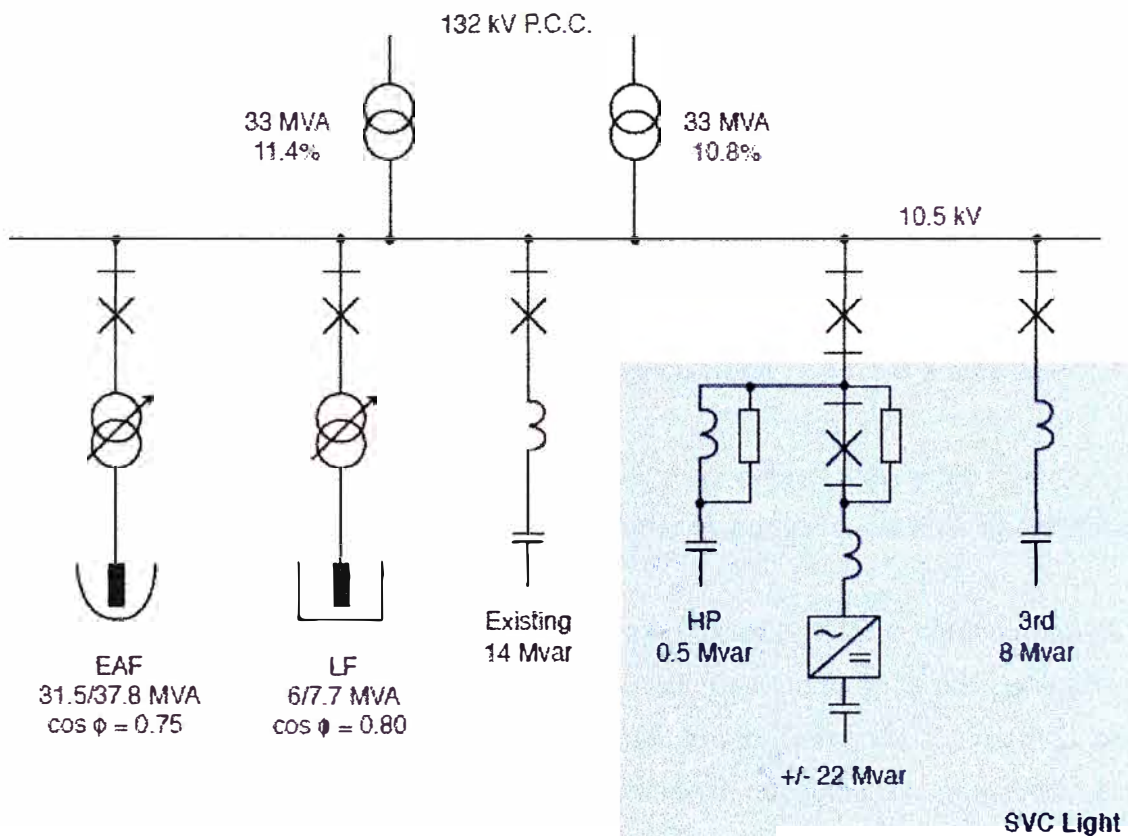


Como beneficios adicionales, el SVC Light ha conseguido una mejor productividad de ambos hornos incrementando la cantidad de material derretido y aminorando el consumo de electrodos.

El SVC Light instalado fue dimensionado en 0 – 44 MVar de potencia reactiva generada (capacitiva), continuamente variable. Este rango dinámico es obtenido usando un VSC (Voltage Source Converter) de 22 MVar en paralelo con dos filtros de armónicos , uno de ellos de 14 MVar existente en la planta y otro nuevo de 8 MVar. El VSC es conectado a la barra de los hornos mediante un pequeño reactor a 10.5 kV.

En la Fig. 5.1 se observa el diagrama unifilar de cómo quedó finalmente la planta de acero Uddeholm Tooling AB con el SVC Light instalado.

Single-line diagram



**Fig.5.1 Diagrama unifilar planta Uddeholm Tooling con SVC Light [Fuente: ABB]**

La figura 5.2 muestra los datos técnicos del SVC Light dimensionado para esta planta, así como también los beneficios en ahorro de energía y menor consumo de electrodos.

<b>Technical data and operational benefits with SVC Light</b>	
Furnace bus voltage	10,5 kV
Rated power, EAF	31,5/37,8 MVA
Rated power, LF	6/7,7 MVA
Dynamic range, SVC Light	0 – 44 Mvar (capacitive)
Flicker reduction factor	-3,5
Attained flicker level at PCC with SVC Light in operation	Pst (95%) = 1
Power factor at PCC	P.F. > 0,95
Productivity increase	4 tonnes/hour
Specific electrode consumption decrease	0,2 kg/tonne
Specific energy consumption decrease	25 kWh/tonne

**Fig.5.2 Datos técnicos y beneficios del SVC Light instalado en Uddeholm Tooling.**  
[Fuente: ABB]

Los resultados fueron los siguientes:

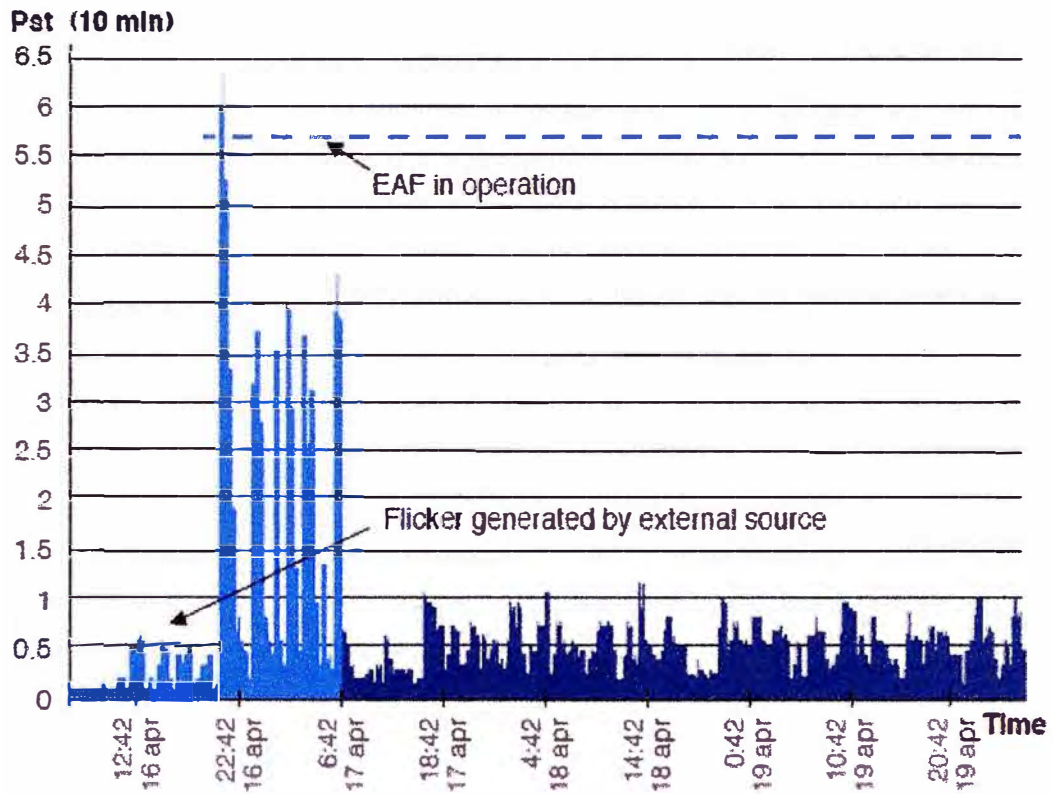
El nivel de flicker en el punto de conexión común Pst(95%) en 132kV no excede el valor de 1. Con un factor de reducción de flicker de 3.5 dado por el SVC Light este valor fue conseguido.

El factor de potencia de la planta fue ajustado en valores mayores a 0.95. debido a que el SVC Light logra compensar la potencia reactiva de manera casi instantánea.

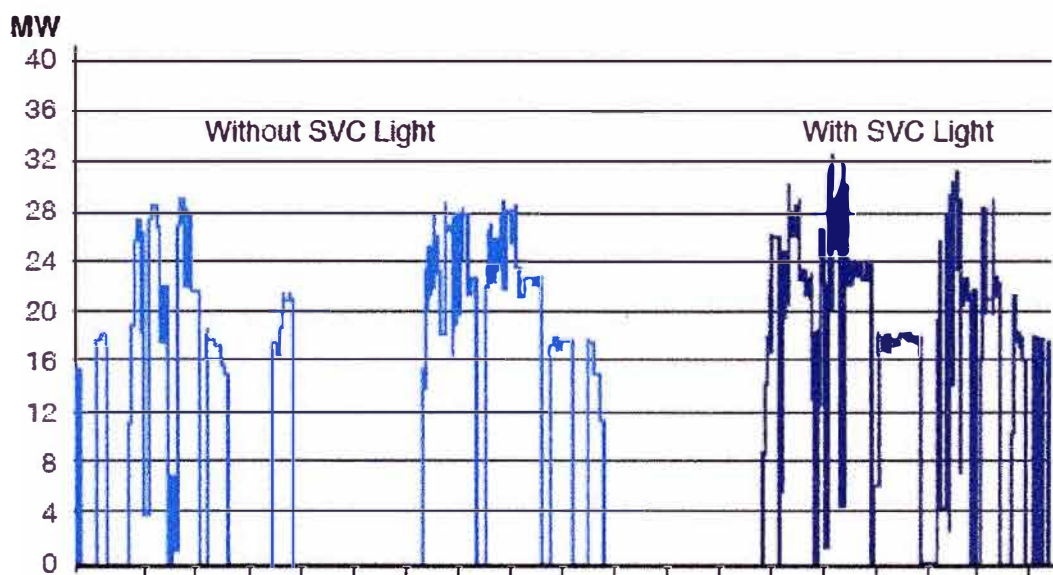
Hubo mediciones de consumo de potencia activa en la planta Uddeholm antes y después de instalar el SVC Light observando que luego de la compensación dinámica de potencia reactiva, la tensión en la barra de los hornos se estabilizó. Esta tensión estabilizada incrementó la capacidad de producción de los hornos. La potencia activa incrementada por el SVC Light en operación arrojó que la producción en los hornos aumentó de 27.5 a 31.4 toneladas/hora. Se puede conseguir una mayor capacidad del horno pues se puede aumentar una tensión estabilizada de la barra de los hornos por encima de 10.5 kV pero se tiene el inconveniente de poder dañar otros equipos instalados en la misma barra.

El incremento de potencia activa de los hornos permite ciclos de trabajo más cortos y por consiguiente un ahorro en energía de consumo y menores pérdidas propias del proceso. Los estudios mostraron cálculo de que el ahorro

de energía logrado es de aproximadamente 25 kWh/tonelada, equivalente a un 4% de ahorro. Por otro lado, se redujo el consumo de electrodos en 0.2 kG/tonelada.



**Fig.5.3 Generación de flicker sin y con SVC Light [Fuente: ABB]**



**Fig.5.4 Potencia activa sin y con SVC Light [Fuente: ABB]**



**Fig.5.5 Vista exterior de la instalación del SVC Light [Fuente: ABB]**

### 5.2.2 Acería Trierer Stahlwerk en Trier, Alemania

La producción en la acería de Trierer Stahlwerk depende de un horno de arco eléctrico (EAF) de 25-30 MVA en 20 kV. El EAF constituye una carga errática y grande para la red que lo alimenta. Estando sin el SVC Light se tenía los problemas usuales en instalaciones de este tipo como fluctuaciones de voltaje, armónicos, desbalance de fases, flicker, etc. Teniendo problemas con su distribuidor (Amprion GmbH) y con los consumidores locales. El SVC Light instalado fue dimensionado en 0 – 39 MVar de potencia reactiva generada (capacitiva), continuamente variable. Este rango dinámico es obtenido usando un VSC (Voltage Source Converter) de 19 MVar en paralelo con dos filtros de armónicos, uno de ellos de 18 MVar y otro de 0.6 MVar. El VSC es conectado a la barra de los hornos mediante un pequeño reactor a 20 kV.

Como en el caso anterior esta acería optó por la instalación del SVC Light y estos fueron los resultados:

## Single-line diagram

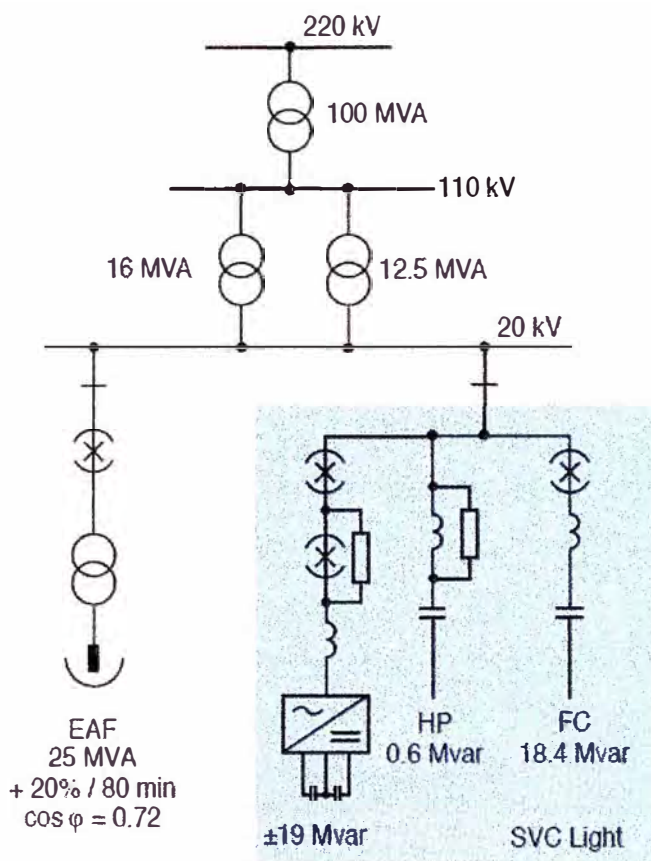


Fig.5.6 Diagrama unifilar planta Trierer Stahlwerk con SVC Light [Fuente: ABB]

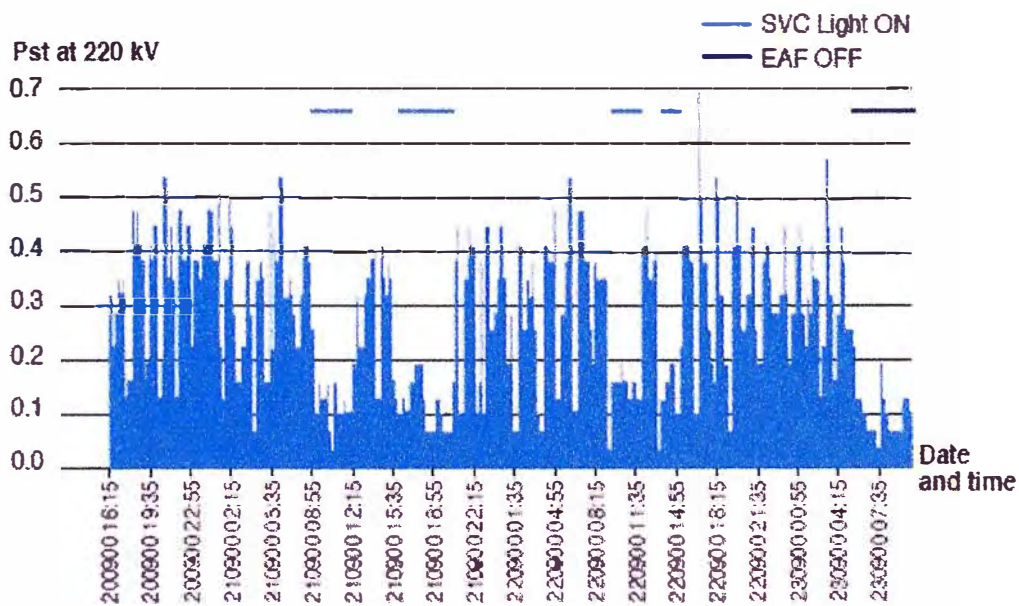
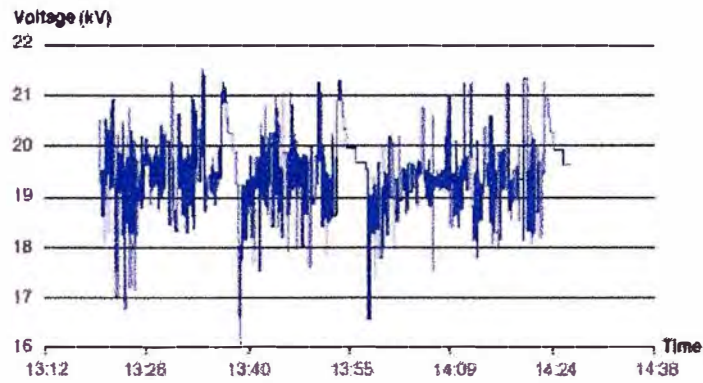


Fig.5.7 Generación de flicker del EAF trabajando con SVC Light y de EAF fuera de servicio [Fuente: ABB]

## SVC Light OFF



## SVC Light ON

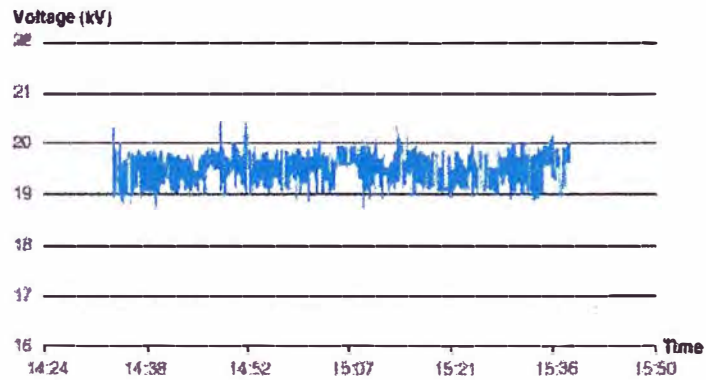
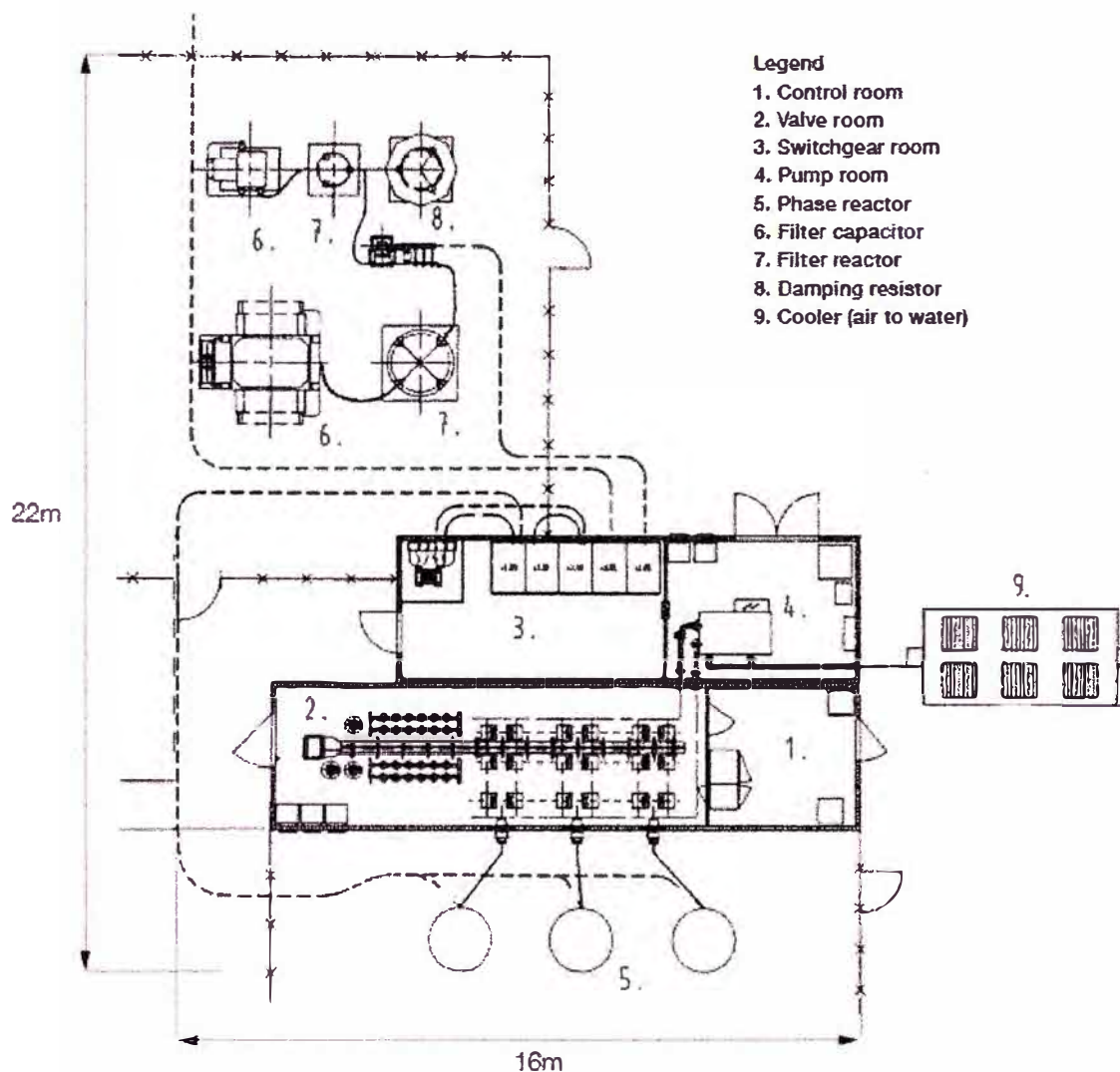


Fig.5.8 Nivel de tensión en la barra del horno con y sin SVC Light [Fuente: ABB]

Technical data	
Rated furnace bus voltage	20 kV
Rated power, EAF	25/30 MVA
Dynamic range, SVC Light	0-38 Mvar (capacitive)
Control modes	Open-loop reactive power control; Closed-loop cos phi control
Flicker reduction factor	$\approx 4$
Flicker level at PCC with SVC Light in operation	$Pst \leq 0,74$

Fig.5.9 Data técnica del SVC Light instalado en Trierer Stahlwerk [Fuente: ABB]

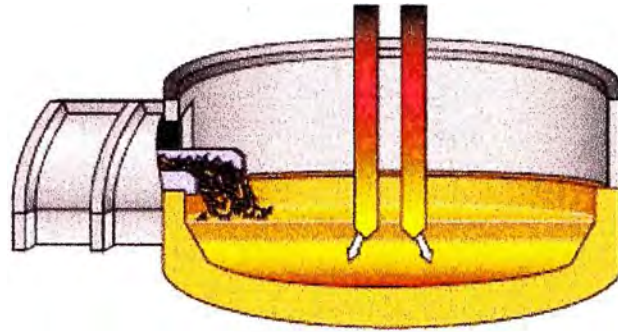
Layout



**Fig.5.10 Layout de la instalación del SVC Light [Fuente: ABB]**

### 5.2.3 Acería Gerdau en Charlotte, USA.

En este ejemplo se toca un caso especial de horno de arco eléctrico en el que el metal líquido dentro del horno se va alimentando continuamente con chatarra proveniente de una faja transportadora, teniéndose un derretido continuo del metal durante todo el proceso. En la figura 5.11 se puede apreciar este esquema de manera básica.



**Fig.5.11 Esquema EAF Gerdau, Charlotte USA [Fuente: ABB]**

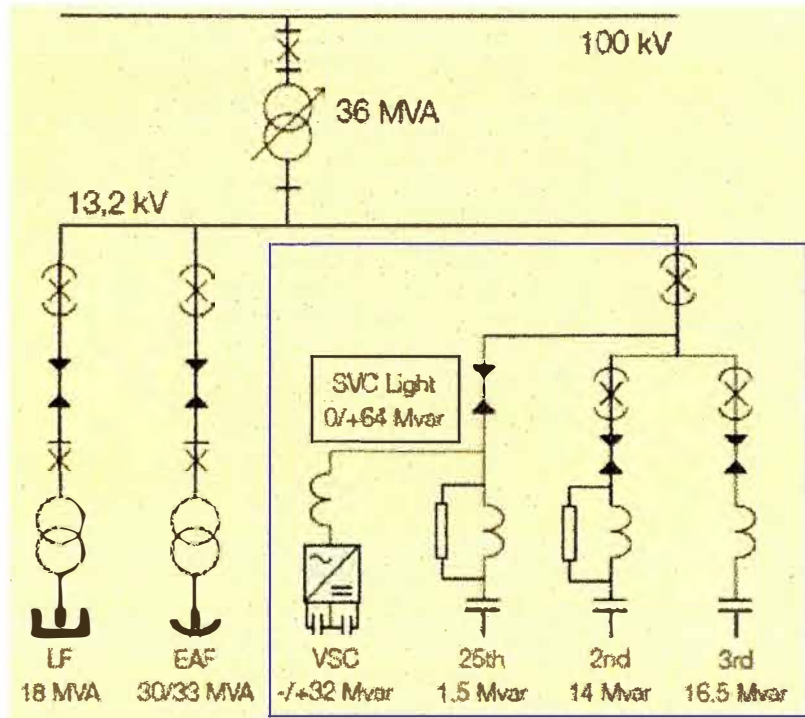
En el caso de esta acería se tiene que durante los últimos años, debido al crecimiento demográfico, los alrededores fueron poblándose por zonas residenciales y diferentes tipos de industrias provocando que tenga que mejorar su calidad de energía.

En el pasado esta acería utilizaba un SVC convencional con tecnología TCR (thyristor controlled reactor). El propósito principal de éste SVC era estabilizar el voltaje en la barra durante la operación del EAF y mantener así la producción. También buscaba mitigar el efecto flicker, sin embargo debido a las nuevas condiciones (zonas residenciales y otras industrias en su zona de influencia), la performance del SVC convencional no fue suficiente, es por este motivo que la acería Gerdau optó por usar el SVC Light.

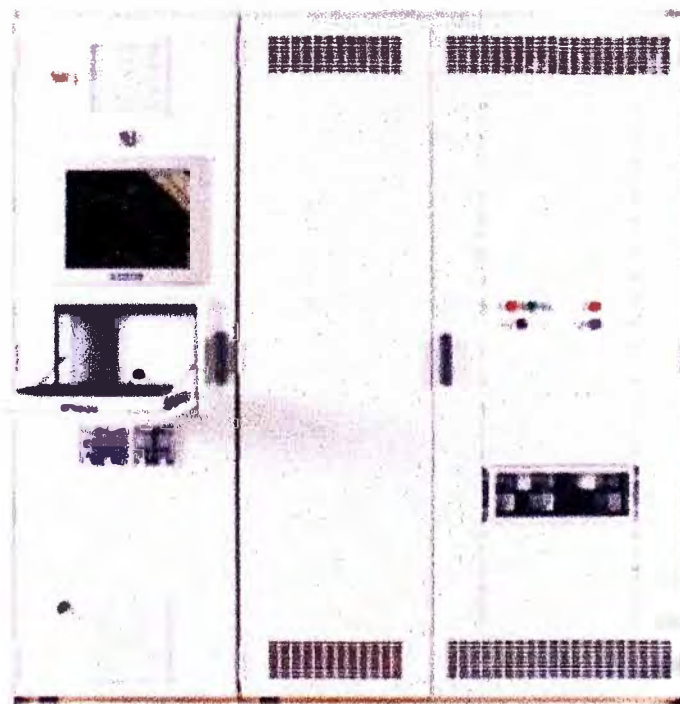
El horno EAF es de 30/33 MVA y el horno LF es de 18 MVA, ambos toman energía de una línea de transmisión en 100kV. El SVC Light instalado se dimensionó en 0 – 64 MVAR (capacitivo). Este rango dinámico es obtenido usando un VSC (Voltage Source Converter) de 32 MVAR en paralelo con tres filtros de armónicos, uno de ellos de 16.5 MVAR, otro de 14 MVAR y el último de 1.5 MVAR. El VSC es conectado a la barra de los hornos mediante un pequeño reactor a 13.2 kV.

A continuación se muestran los resultados de la implementación del SVC Light.





**Fig.5.12 Diagrama unifilar acería Gerdau, Charlotte USA [Fuente: ABB]**



**Fig.5.13 Vista frontal HMI (Human-machine interface) [Fuente: ABB]**

Las cargas asimétricas generan corrientes de secuencia negativa, las cuales causan principalmente fatiga en los motores. El SVC Light logra atenuar estas perturbaciones en los motores ubicados en la planta y zonas cercanas

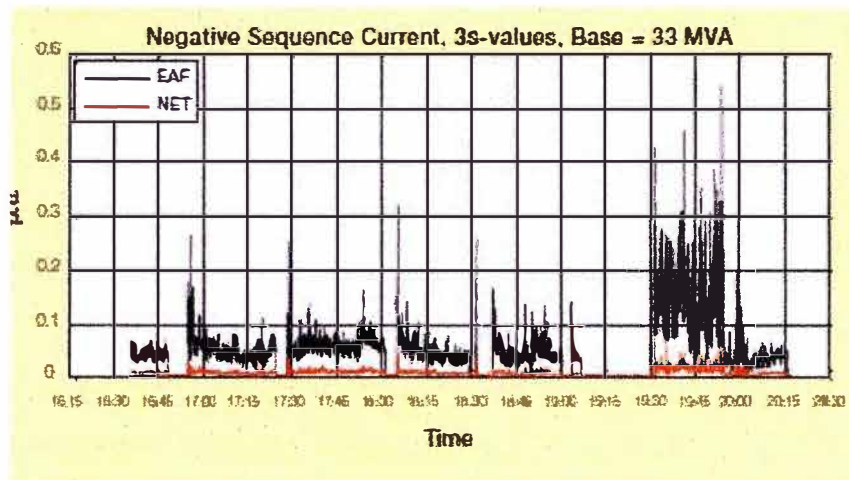


Fig.5.14 Espectro de corrientes de secuencia negativa en el EAF (negro) y corrientes de secuencia negativa en la red (rojo) [Fuente: ABB]

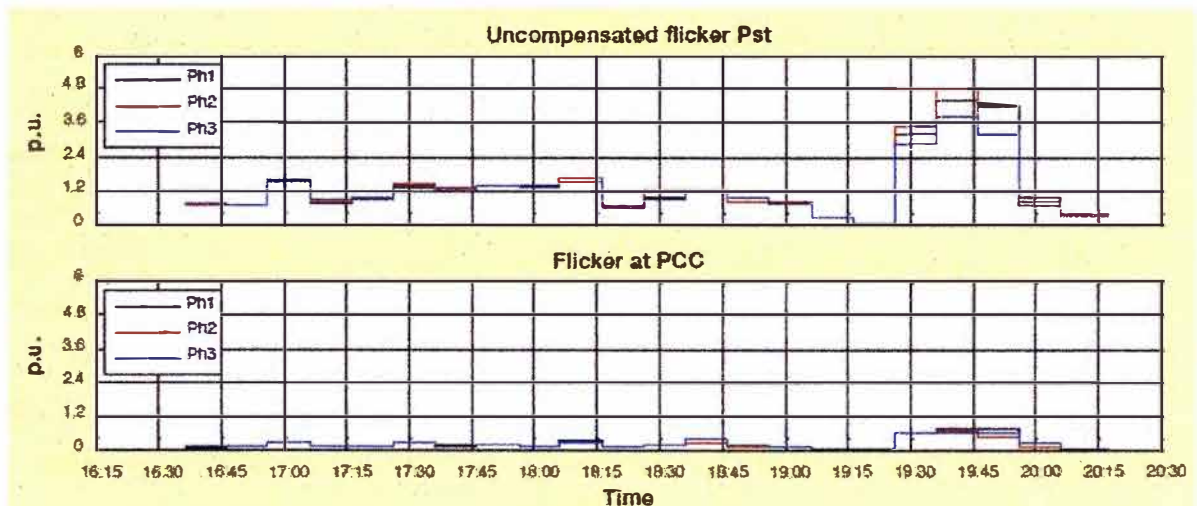


Fig.5.15 Flicker en el punto de conexión común con y sin SVC Light [Fuente: ABB]

### Main technical data

Supply grid voltage	100 kV
Furnace bus voltage	13.2 kV
Rated EAF power	30/33 MVA
Rated LF power	18 MVA
SVC Light rating	13.2 kV, 0-64 Mvar (capacitive)
VSC	32 MVA; Three-level, neutral point clamped converter; IGBT based, pulse width modulated.
Control system	Open-loop, phase-wise dynamic var control, plus closed-loop power factor control
Flicker reduction factor	> 5

Fig.5.16 Data técnica del SVC Light instalado en Gerdau, Charlotte USA [Fuente: ABB]

Performance parameter	Guaranteed value
Power factor	$\geq 0.95$
Flicker reduction factor (99%)	$\geq 4.06$
Total Harmonic Distortion (voltage)	$\leq 2.5\%$
Individual Harmonics (voltage)	$\leq 1.5\%$

**Fig.5.17 Valores alcanzados con SVC Light en Gerdau. Charlotte USA [Fuente: ABB]**

#### 5.2.4 Acería Zhangjiagang Pohang Co, China

La compañía Zhangjiagang Pohang Stainless Steel (ZPSS) posee un EAF de 140 MVA, 35 kV y que consume energía de la red principal en 220 kV. Debido a requerimientos muy estrictos de calidad de energía en el punto de conexión, la planta no podía arrancar ni entrar en operación hasta que se mitiguen las perturbaciones, en especial el flicker.

Inicialmente se consideró usar un SVC convencional con TCR, pero como este equipo no tiene la capacidad para atenuar el flicker a los valores que requería la fábrica, se optó por usar el SVC Light, que es más potente en ese aspecto.

El SVC Light instalado fue dimensionado en 0 – 164 MVAR de potencia reactiva generada (capacitiva), continuamente variable. Este rango dinámico es obtenido usando un VSC (Voltage Source Converter) de 82 MVAR en paralelo con tres filtros de armónicos, uno de ellos de 50 MVAR, otro de 3 MVAR y el último de 2 MVAR. El VSC es conectado a la barra de los hornos mediante un pequeño reactor a 35 kV.

A continuación se muestran los diagramas unifilares y los resultados de la implementación del SVC Light como solución.

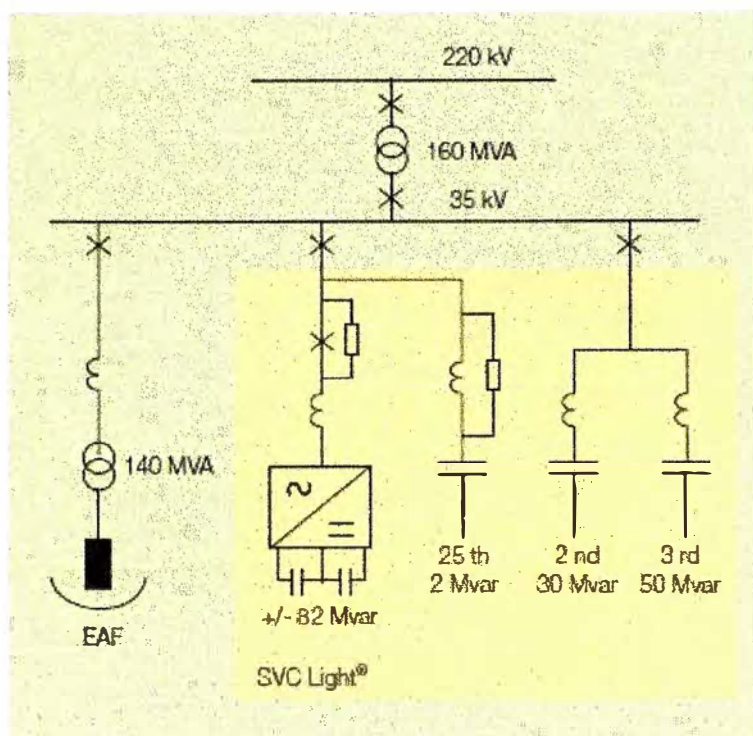


Fig.5.18 Diagrama unifilar EAF con SVC Light – ZPSS, China [Fuente: ABB]

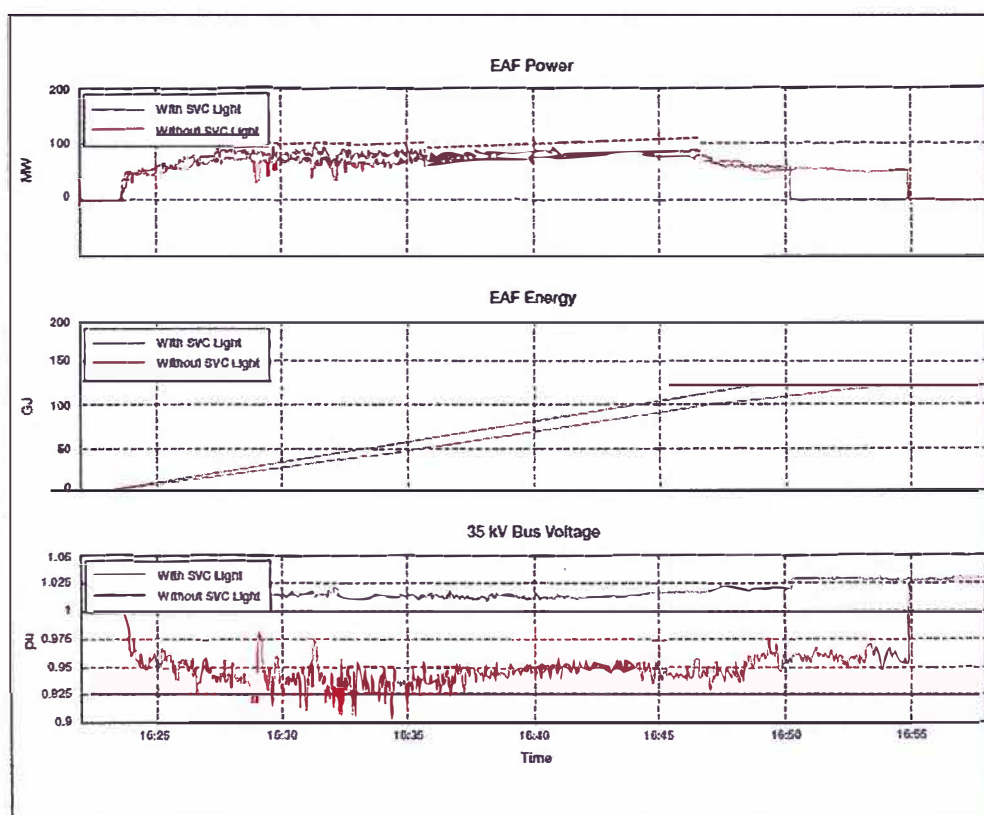


Fig.5.19 Potencia activa, energía consumida y nivel de tensión en barra de EAF [Fuente: ABB]

### Main technical data

Furnace bus voltage	35 kV
Rated EAF power	140 MVA
SVC Light® rating	35 kV, 0-164 Mvar (capacitive)
VSC	82 MVA; three-level, neutral point clamping converter; IGBT-based, pulse width modulated.
Control system	Open-loop, phase-wise dynamic var control, plus closed-loop power factor control.
Flicker reduction factor	> 5
Power factor at 220 kV PCC	> 0.995

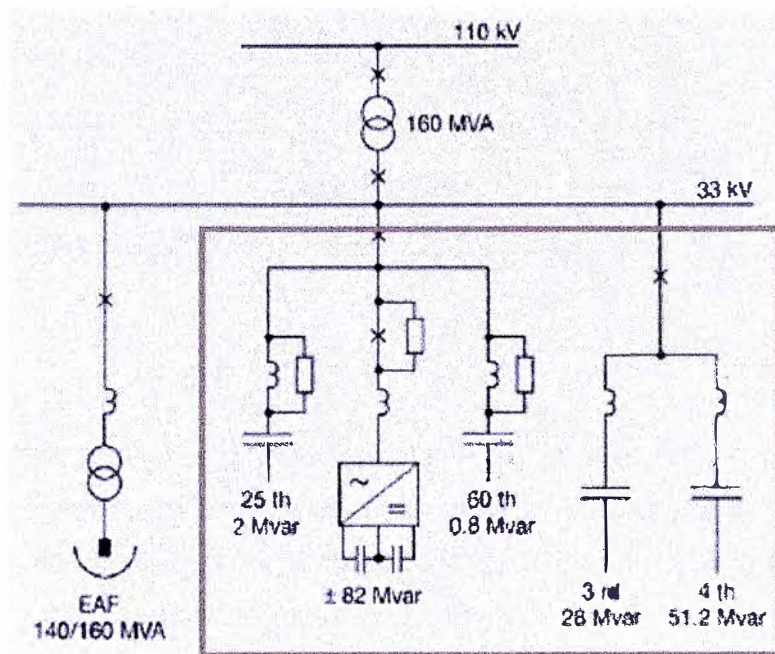
**Fig.5.20 Características técnicas del SVC Light instalado en ZPSS [Fuente: ABB]**

#### 5.2.5 Acería Outokumpu, Finlandia

La compañía Outokumpu Stainless Oy basa su producción en un EAF de 140 MVA, 33 kV, +20% de sobrecarga temporal y que consume energía de la red principal en 110 kV. Debido a que la potencia de cortocircuito es muy baja en el punto de acoplamiento común, el EAF sería una fuente formidable de perturbaciones en la red, por lo que si no fueran mitigados, infectarían a la red perjudicando a los demás usuarios.

La operador del sistema eléctrico de Finlandia, Fingrid, impuso requerimientos estrictos de calidad de energía a todos los clientes, en este caso a la acería Outokumpu, que debían ser cumplidos. En este escenario la acería optó por la instalación del SVC Light, el cual hizo cumplir los requerimientos de calidad de energía impuestos por el estado de Finlandia y que además mejoraron el rendimiento de la planta. A continuación se muestran los resultados.

El SVC Light instalado fue dimensionado en 0 – 164 MVAR de potencia reactiva generada (capacitiva), continuamente variable. Este rango dinámico es obtenido usando un VSC (Voltage Source Converter) de 82 MVAR en paralelo con cuatro filtros de armónicos, el primero de ellos de 51.2 MVAR, el segundo de 28 MVAR, el tercero de 2 MVAR y el último de 0.8 MVAR. El VSC es conectado a la barra de los hornos mediante un pequeño reactor a 33 kV.



**Fig.5.21 Diagrama unifilar EAF con SVC Light – Outokumpu, Finlandia [Fuente: ABB]**

### Technical data

Grid connecting voltage	110 kV
Furnace bus voltage	33 kV
Rated EAF power	140 MVA +20%
SVC Light rating	33 kV, 0-164 Mvar (capacitive)
Flicker reduction factor	> 4.5

**Fig.5.22 Características Técnicas SVC Light – Outokumpu, Finlandia [Fuente: ABB]**

## **CAPITULO VI**

### **EVENTUAL IMPLEMENTACIÓN DEL SVC LIGHT EN EL PERU**

#### **6.1 Introducción**

De acuerdo a lo resumido en capítulos anteriores, se ha mostrado que el SVC Light ofrece una solución contra los problemas de calidad de la energía, así como también regula la tensión y aumenta la productividad de las acerías que tienen hornos de arco eléctrico. Se han visto ejemplos exitosos alrededor del mundo y en este capítulo se propone su eventual uso en el Perú.

No está de más indicar que la implementación del SVC Light al cumplir con mitigar las perturbaciones de una carga tan variable como lo es el horno de arco eléctrico, también podrá mitigar las perturbaciones de otras cargas variables en el sistema, sin embargo se tiene que hacer el análisis técnico económico para cada aplicación específica.

#### **6.2 Cargas variables en el SEIN**

De los informes de operación diaria emitidos por el COES se obtuvieron las siguientes figuras que ilustran a las cargas mas importantes en el Perú. Se ha tomado como muestra 10 días del mes de agosto, viendo que las cargas siguen el mismo patrón de comportamiento eléctrico. A continuación se citan 03 días como ejemplo:

Día: Viernes 01 de agosto, 2014

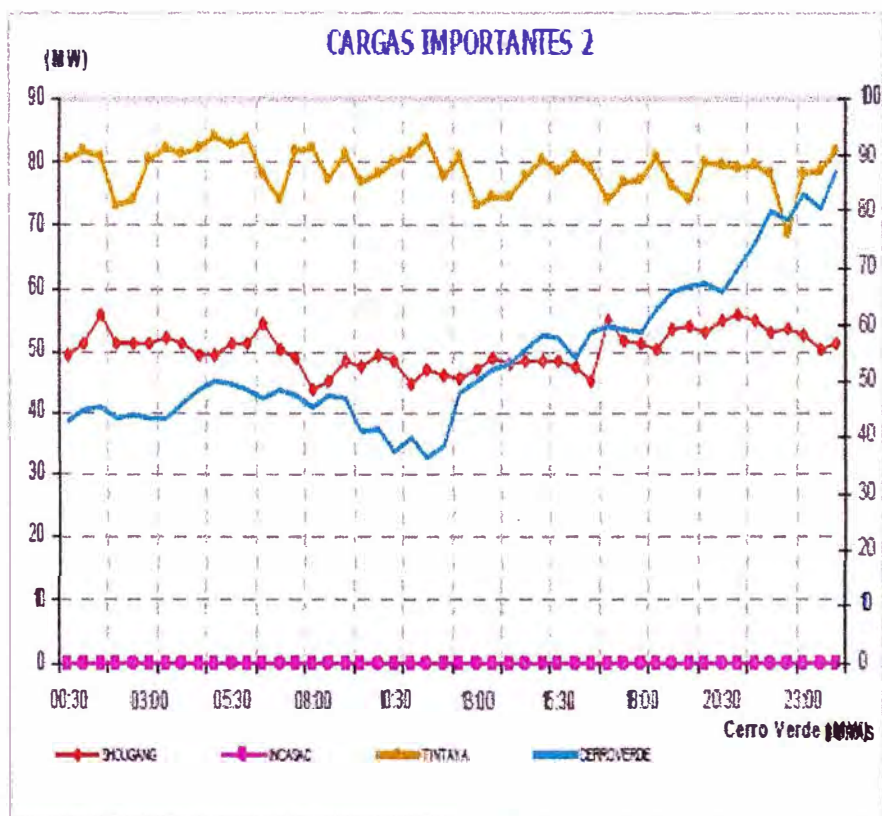
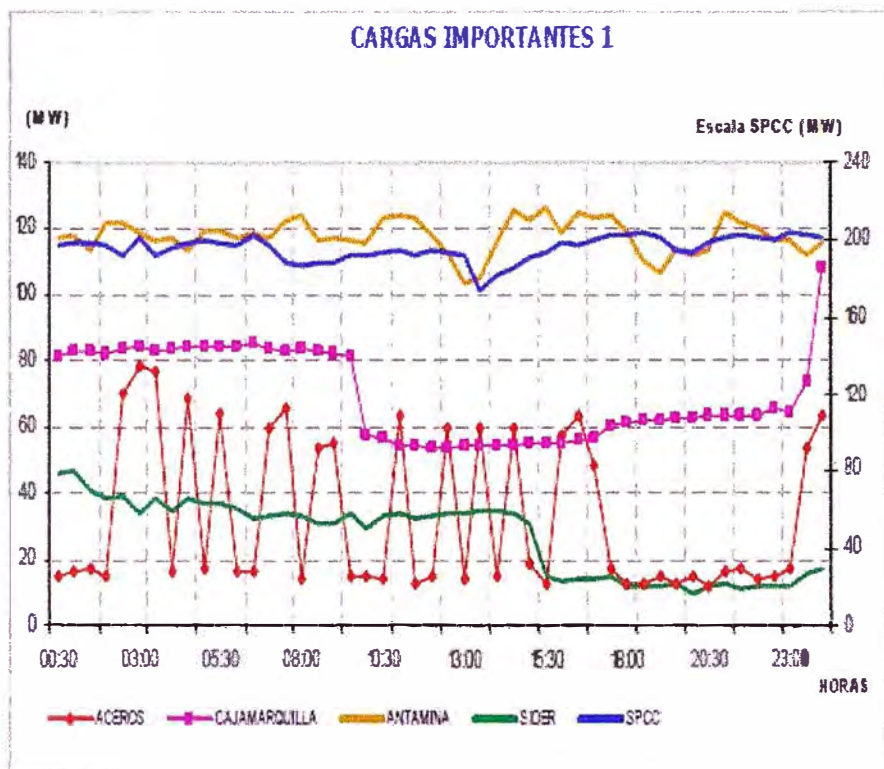


Fig.6.1 Cargas importantes SEIN – Viernes, 01-08-14 [Fuente: COES]



Dia: Domingo 03 de agosto, 2014

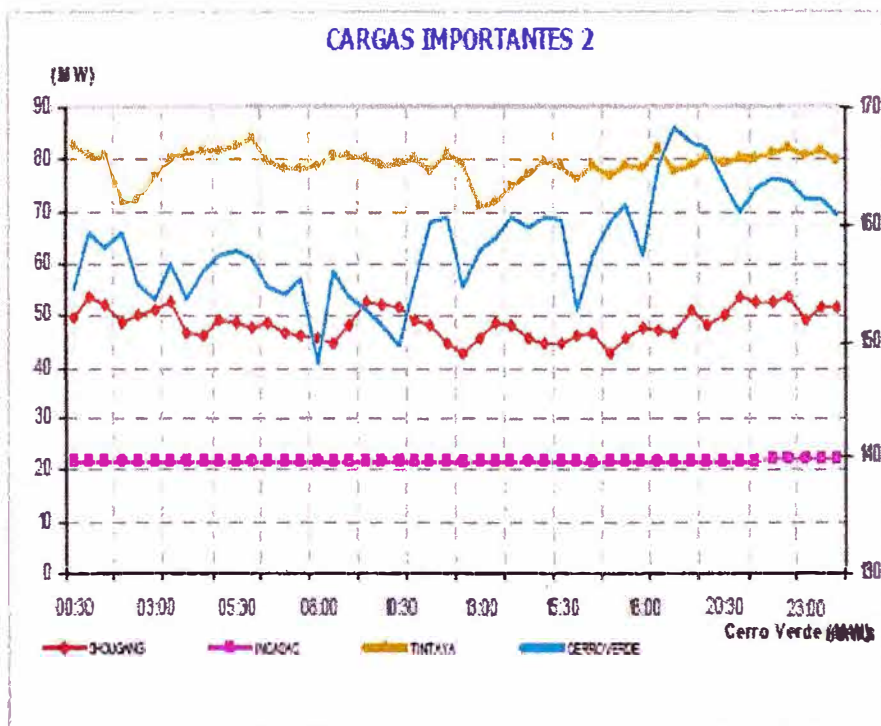
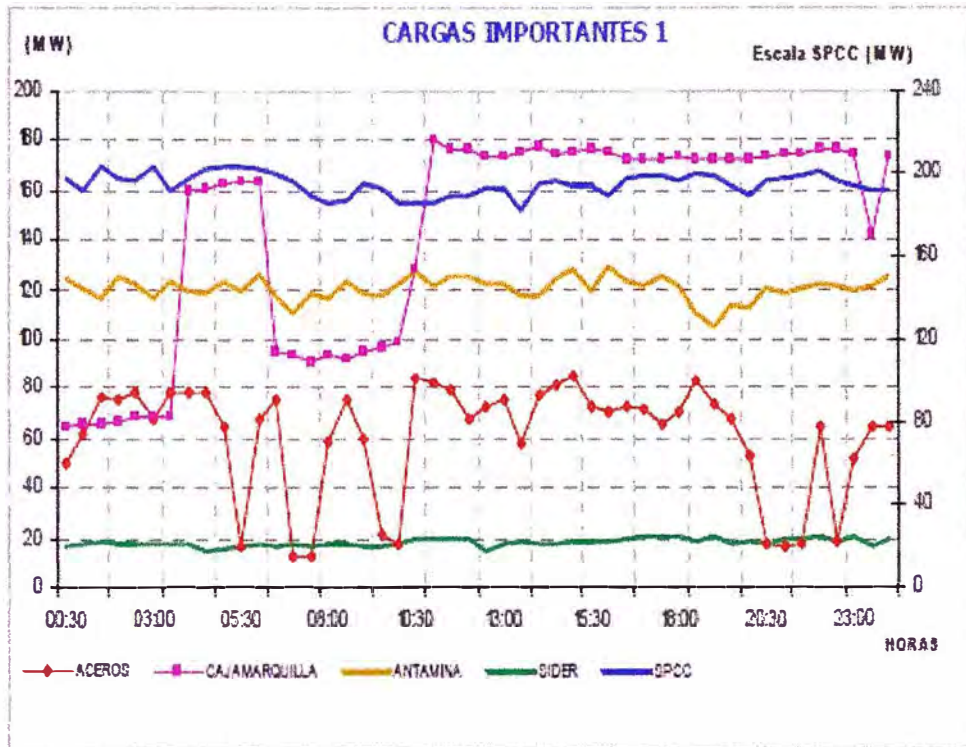


Fig.6.2 Cargas importantes SEIN – Domingo, 03-08-14 [Fuente: COES]

Dia: Viernes 08 de agosto, 2014

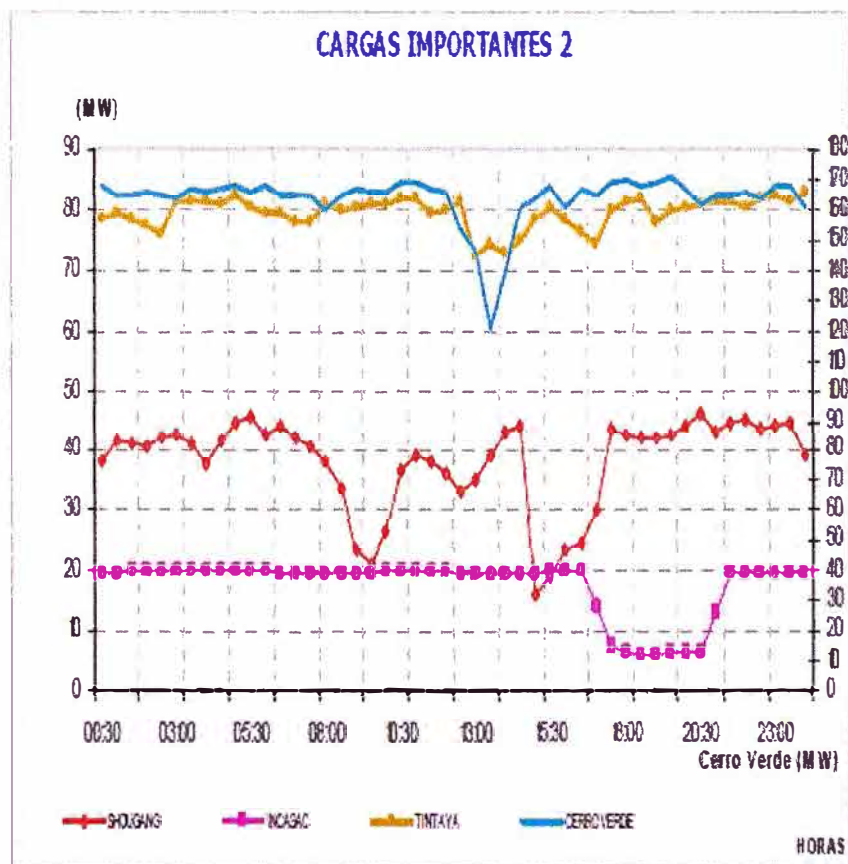
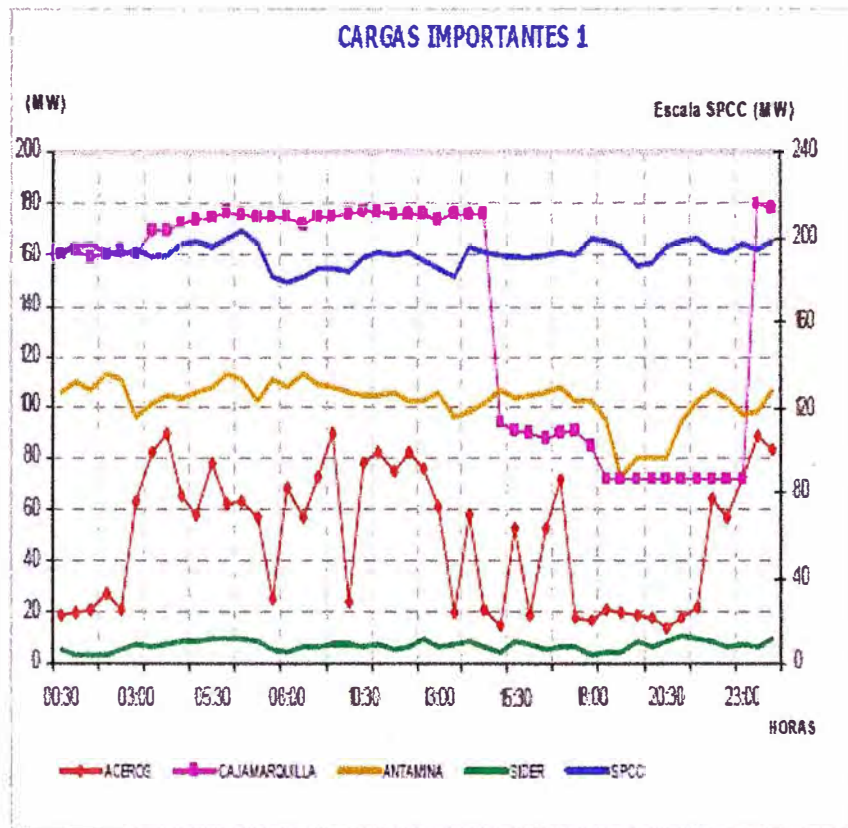


Fig.6.3 Cargas importantes SEIN – Viernes, 08-08-14 [Fuente: COES]

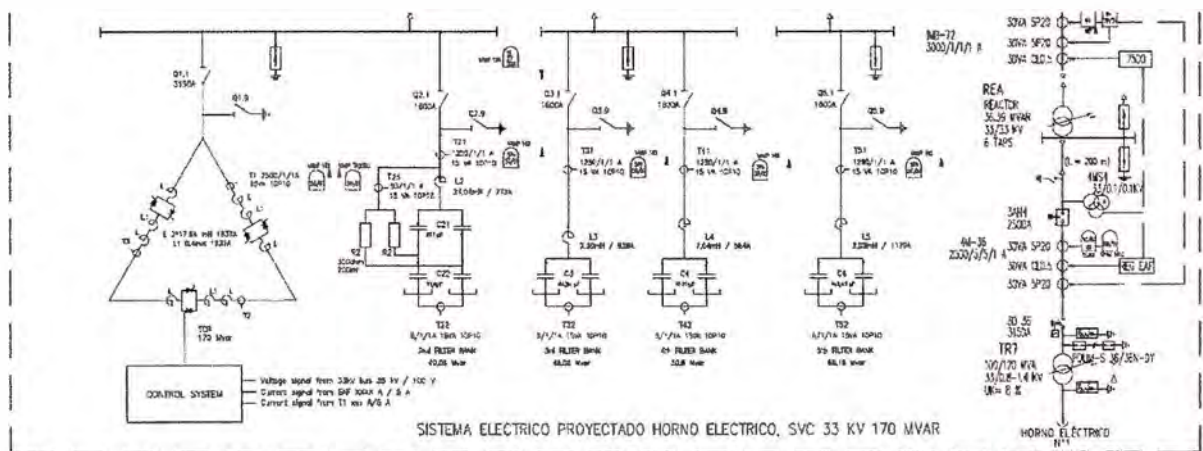
De las figuras se puede observar que Aceros Arequipa es la carga variable más importante que tenemos en Perú, esto debido a que posee dos hornos de arco eléctrico, uno de 100 – 120 MVA y el otro de 45 MVA aproximadamente.

Actualmente existe en Aceros Arequipa un SVC convencional de 170 MVAR, 33 kV con filtros para los armónicos de orden 2do, 3ero, 4to y 5to. Este SVC convencional usa tecnología TCR y de acuerdo a lo visto en el capítulo I puede controlar el nivel de tensión de la planta y mejorar la calidad de energía hasta cierto punto.

Si se usara el SVC Light se obtendría mejores resultados en todo sentido ya que es un FACTS exclusivamente diseñado para este tipo de cargas.

En la figura se muestra un extracto del unifilar de la ampliación de la planta de Aceros Arequipa con el SVC tradicional. Si hubiera mayor exigencia en el cumplimiento de la NTCSE, hubiera sido necesario la instalación de un SVC Light en la planta de Aceros Arequipa.

Cabe recordar que el SVC Light no sólo se usa en instalaciones de hornos de arco eléctrico, también puede ser usado en cualquier aplicación de carga variable.



**Fig.6.4 Diagrama unifilar planta Aceros Arequipa con SVC convencional [Fuente: COES]**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

Se ha recopilado los casos más importantes en el mundo de aplicaciones del SVC Light para compensar los consumos aleatorios de potencia reactiva de plantas industriales, que poseen cargas variables, tales como un horno de arco eléctrico.

En ese sentido, es posible concluir que mediante su instalación en una planta industrial de las características señaladas, se logrará:

- Mitigar el efecto flicker hasta valores permisibles por la norma, evitando reclamos de las industrias o zonas residenciales vecinas.
- Estabilizar la tensión en barra del horno de arco eléctrico, mejorando la calidad de energía de los equipos alimentados desde la barra del horno.
- Incrementar la potencia activa del horno, lo cual mejora la productividad de la planta pues se reduce el tiempo del ciclo de trabajo.
- Disminuir el consumo de materiales propios de la industria siderúrgica tales como: electrodos, refractarios, etc.
- Menores costos de mantenimiento en toda la planta.
- Mejorar el factor de potencia, consumiendo así menos potencia reactiva de la red.
- Mejorar sustancialmente la calidad de energía de la planta y de zonas aledañas.

### **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda el uso del SVC Light en plantas industriales que posean hornos de arco eléctrico y para todo tipo de cargas variables.
2. Para la especificación y correcto dimensionamiento de los componentes de un SVC Light, se deben realizar mediciones de armónicos, no solo los provocados por la propia planta y los que vaya a generar el SVC Light, sino también los provenientes desde la red.
3. Al ser un equipamiento especial se deberá pedir al proveedor del equipo el servicio de pre-comisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha, así como también capacitación técnica para el personal de la planta que lo va a operar.

## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**LISTA DE FIGURAS**

## Lista de figuras:

Fig. 1.1 Límites de operación para líneas de transmisión en diferentes niveles de tensión. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	4
Fig.1.2 Resumen de principales dispositivos FACTS. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania].....	5
Fig.1.3 Presencia de FACTS alrededor del mundo. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania].....	6
Fig.1.4 Rango de niveles de tensión para dispositivos de conmutación en FACTS [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	6
Fig.1.5 Configuraciones de SVC [Fuente: ABB].....	8
Fig.1.6 Característica V-I de SVC [Fuente: ABB].....	8
Fig.1.7 Vista panorámica de SVC [Fuente: ABB] .....	9
Fig.1.8 Esquema de funcionamiento de STATCOM [Fuente: ABB] .....	10
Fig.1.9 Característica estructural y curva V-I de STATCOM [Fuente: ABB].....	11
Fig.1.10 Vista panorámica de una subestación con STATCOM [Fuente: ABB].....	11
Fig.1.11 Esquema de funcionamiento de TCSC y curva V-I [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania].....	12
Fig.1.12 Vista panorámica de TCSC [Fuente: ABB].....	13
Fig.1.13 Esquema de funcionamiento de SSSC y layout típico. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania].....	13
Fig.1.14 Esquema de funcionamiento y diagrama de operación de SCCL [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania].	14
Fig.1.15 Vista panorámica típica de SCCL. [Fuente: SIEMENS] .....	15
Fig.1.16 Esquema de funcionamiento de DPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	15
Fig.1.17 Diagrama operacional de DPFC. [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	16
Fig.1.18 Esquema de funcionamiento de UPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	17
Fig.1.19 Esquema de funcionamiento de IPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	18
Fig.1.20 Esquema de funcionamiento de GUPFC [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania].....	19
Fig.1.21 Esquema de funcionamiento de HVDC Back-to-Back con fuentes de tensión controladas [Fuente: Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer – Alemania] .....	20
Fig.1.22 Vista panorámica de un HVDC Back-to-Back con fuentes de tensión controladas, 2x36MVA [Fuente: ABB] .....	20
Fig.1.23 Vista panorámica de un SVC Light. [Fuente: ABB] .....	22
Fig.2.1 Vista interior de un horno de arco eléctrico [Fuente: ABB] .....	24
Fig.2.2 Esquema eléctrico típico de horno de arco eléctrico. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España] ..	25
Fig.2.3 Vista simplificada de horno de arco eléctrico [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España] .....	26

Fig.2.4 Características y estabilidad del arco eléctrico en el horno. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España] .....	27
Fig.2.5 Relación entre la potencia del transformador, capacidad y duración del arco eléctrico. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España] .....	28
Fig.2.6 Panel de control de horno de arco eléctrico. [Fuente: Monografías sobre tecnología del acero – Parte I, Universidad Politécnica de Madrid - España] .....	30
Fig.2.7 Configuración típica de horno de arco eléctrico [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	31
Fig.2.8 Espectro de corriente que alimenta un horno en corriente alterna [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	32
Fig.2.9 Forma de onda achatada por efecto de armónicos. [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	33
Fig.3.1 Oscilograma de una corriente de rayo [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	35
Fig.3.2 Sobrevoltaje debido a un impulso de voltaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	36
Fig.3.3 Ejemplo de subtensión (niveles de voltaje, registro de 1 semana) [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	37
Fig.3.4 Clasificación de variaciones de voltaje de corta duración según IEEE std. 1159-1995 [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	37
Fig.3.5 Interrupción de corta duración [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	38
Fig.3.6 Corriente de arranque vs. Variaciones de voltaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	39
Fig.3.7 Subida de voltaje o voltaje swell [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	40
Fig.3.8 Nivel de voltaje vs desbalance expresado en porcentaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	41
Fig.3.9 Ondulamiento de la onda de voltaje [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	41
Fig.3.10 Fluctuación de voltaje tipo a [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	42
Fig.3.11 Fluctuación de voltaje tipo b [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	43
Fig.3.12 Fluctuación de voltaje tipo c [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	43
Fig.3.13 Fluctuación de voltaje tipo d [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	43
Fig.3.14 Niveles de flicker producidos por un horno de arco eléctrico [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	44
Fig.3.15 Impulso de votaje de 6 microsegundos de duración [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	45
Fig.3.16 Forma de onda generada por un convertidor de 6 pulsos [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	46
Fig.3.17 Ejemplo de ancho de banda de interarmónicos [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	46
Fig.3.18 Voltaje notching generado por un variador de velocidad [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	47

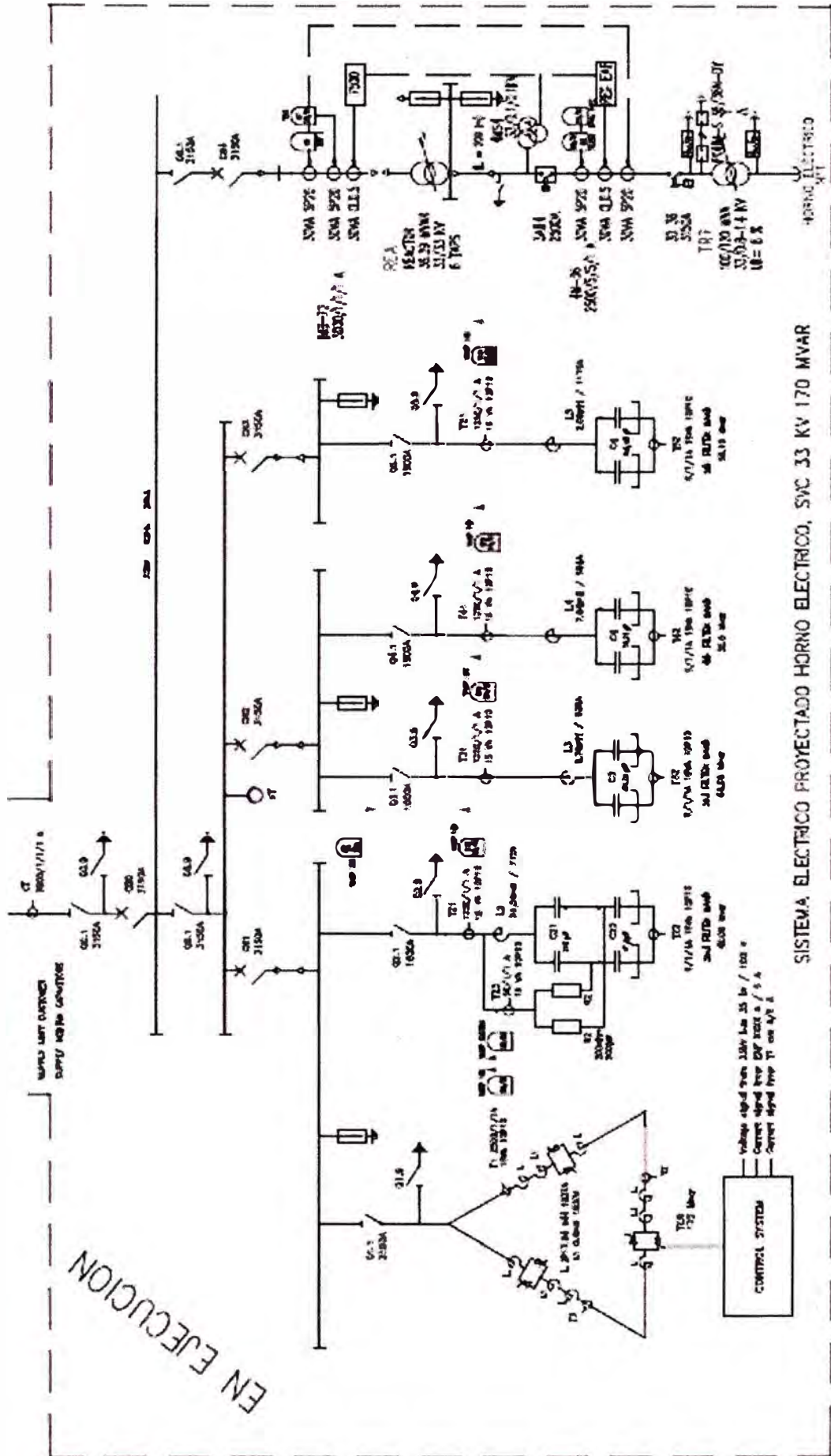


Fig.3.19 Resumen de perturbaciones eléctricas asociadas a la operación del horno de arco eléctrico (punto de vista de calidad de la energía) [Fuente: Curso de Calidad de Energía, TECSUP VIRTUAL – Perú] .....	48
Fig.3.20 Diagrama de carga de un horno de arco eléctrico [Fuente: ABB] .....	49
Fig.3.21 Curva de umbrales de flicker Fuente: ABB].....	50
Fig.4.1 Potencia y tensión del horno de arco eléctrico con y sin SVC Light [Fuente: ABB] .....	54
Fig.4.2 Diagrama de carga con y sin SVC Light [Fuente: ABB].....	55
Fig.4.3 Esquema del VSC (Voltage Source Converter) [Fuente: ABB] .....	56
Fig.4.4 Convertidor de 3 niveles [Fuente: ABB] .....	57
Fig.4.5 Modulación PWM [Fuente: ABB].....	58
Fig. 4.6 (a) Principio del convertidor de 3 niveles y (b) configuración del convertidor con conexión NPC, en punto neutro, una fase [Fuente: ABB].....	58
Fig.4.7 Vista interna de las válvulas del SVC Light [Fuente: ABB] .....	59
Fig.4.8 Esquema de válvulas IGBT conectados en serie y conmutados al mismo tiempo [Fuente: ABB].....	60
Fig.4.9 Esquema del sistema de regulación y protección MACH2 para SVC Light [Fuente: ABB] .....	62
Fig.4.10 Procedimiento de control para minimizar el retardo entre el muestreo de los parámetros de proceso medidos y el siguiente instante de conexión [Fuente: ABB] .	63
Fig.4.11 Esquema eléctrico interno y externo de un SVC Light instalado [Fuente: ABB] .....	64
Fig.5.1 Diagrama unifilar planta Uddeholm Tooling con SVC Light [Fuente: ABB]	66
Fig.5.2 Datos técnicos y beneficios del SVC Light instalado en Uddeholm Tooling. [Fuente: ABB] .....	67
Fig.5.3 Generación de flicker sin y con SVC Light [Fuente: ABB] .....	68
Fig.5.4 Potencia activa sin y con SVC Light [Fuente: ABB].....	68
Fig.5.5 Vista exterior de la instalación del SVC Light [Fuente: ABB].....	69
Fig.5.6 Diagrama unifilar planta Trierer Stahlwerk con SVC Light [Fuente: ABB]..	70
Fig.5.7 Generación de flicker del EAF trabajando con SVC Light y de EAF fuera de servicio [Fuente: ABB] .....	70
Fig.5.8 Nivel de tensión en la barra del horno con y sin SVC Light [Fuente: ABB]..	71
Fig.5.9 Data técnica del SVC Light instalado en Trierer Stahlwerk [Fuente: ABB]..	71
Fig.5.10 Layout de la instalación del SVC Light [Fuente: ABB] .....	72
Fig.5.11 Esquema EAF Gerdau, Charlotte USA [Fuente: ABB].....	73
Fig.5.12 Diagrama unifilar acería Gerdau, Charlotte USA [Fuente: ABB] .....	74
Fig.5.13 Vista frontal HMI (Human-machine interface) [Fuente: ABB].....	74
Fig.5.14 Espectro de corrientes de secuencia negativa en el EAF (negro) y corrientes de secuencia negativa en la red (rojo) [Fuente: ABB] .....	75
Fig.5.15 Flicker en el punto de conexión común con y sin SVC Light [Fuente: ABB] .....	75
Fig.5.16 Data técnica del SVC Light instalado en Gerdau, Charlotte USA [Fuente: ABB] .....	75
Fig.5.17 Valores alcanzados con SVC Light en Gerdau. Charlotte USA [Fuente: ABB] .....	76
Fig.5.18 Diagrama unifilar EAF con SVC Light – ZPSS, China [Fuente: ABB].....	77
Fig.5.19 Potencia activa, energía consumida y nivel de tensión en barra de EAF [Fuente: ABB] .....	77
Fig.5.20 Características técnicas del SVC Light instalado en ZPSS [Fuente: ABB]..	78

Fig.5.21 Diagrama unifilar EAF con SVC Light – Outokumpu, Finlandia [Fuente: ABB] .....	79
Fig.5.22 Características Técnicas SVC Light – Outokumpu, Finlandia [Fuente: ABB] .....	79
Fig.6.1 Cargas importantes SEIN – Viernes, 01-08-14 [Fuente: COES].....	81
Fig.6.2 Cargas importantes SEIN – Domingo, 03-08-14 [Fuente: COES] .....	82
Fig.6.3 Cargas importantes SEIN – Viernes, 08-08-14 [Fuente: COES].....	83
Fig.6.4 Diagrama unifilar planta Aceros Arequipa con SVC convencional [Fuente: COES] .....	84

**ANEXO B**

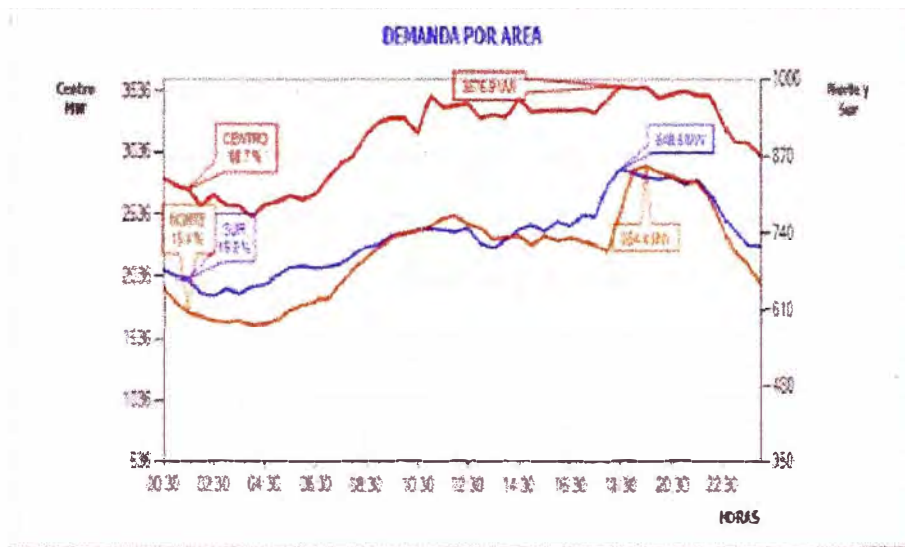
**DIAGRAMA UNIFILAR PLANTA ACEROS AREQUIPA CON SVC CONVENCIONAL**



SISTEMA ELECTICO PROYECTADO HORNO ELECTRICO, SVC 33 KV 170 MVAR

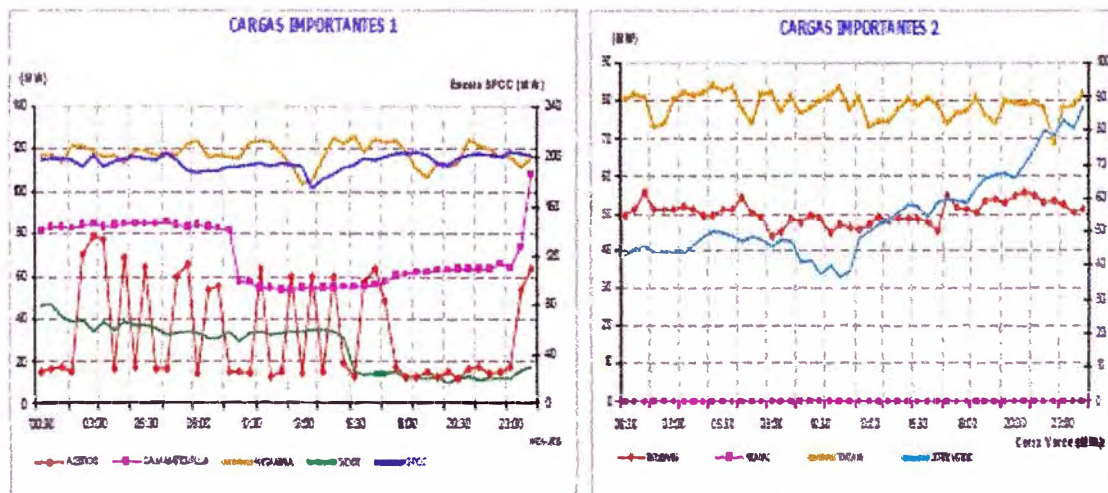
**ANEXO C**  
**EXTRACTO DE INFORMES DIARIOS DEL COES**

### 1.1.2. EVOLUCIÓN HORARIA DE LA DEMANDA POR ÁREA

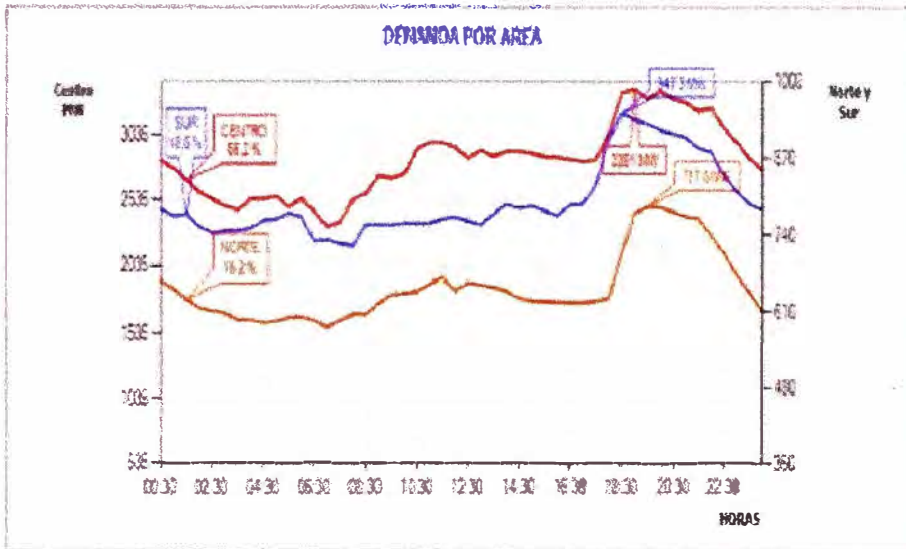


- La máxima demanda del área Norte se presentó a la misma hora que la máxima demanda del SEIN (19:30 h), mientras que las máximas demandas de las áreas Centro y Sur ocurrieron a las 18:30 h.
- La contribución del área Centro a la máxima demanda del SEIN fue 67.8 %, mientras que las áreas Norte y Sur contribuyeron con 16.2 % y 15.8 % respectivamente.
- Los factores de carga fueron: Área Norte: 0.827, Área Centro: 0.883, Área Sur: 0.864.
- La velocidad de crecimiento de carga de las áreas Centro, Norte y Sur fueron 3.62, 2.34 y 1.8 MW/min respectivamente.

### 1.1.3. EVOLUCIÓN HORARIA DE LAS CARGAS MAS IMPORTANTES

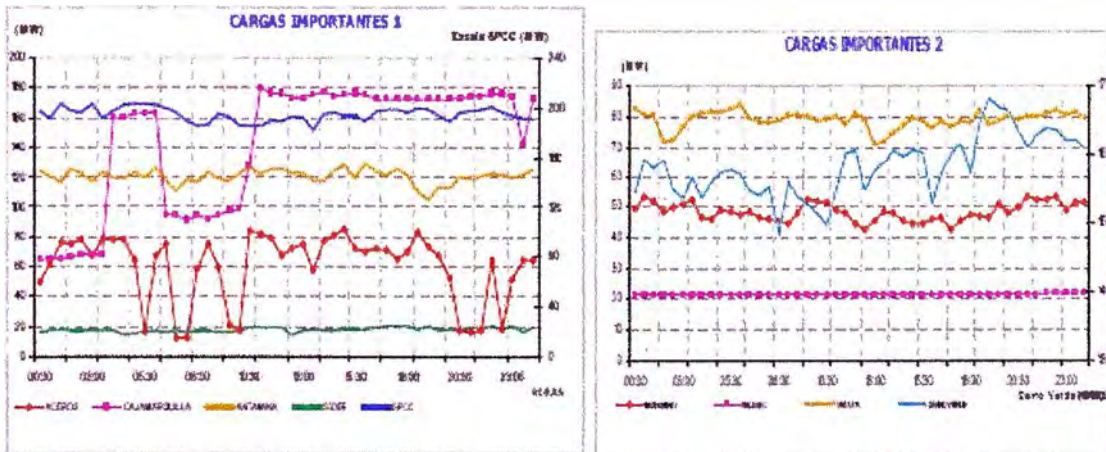


**1.1.2. EVOLUCIÓN HORARIA DE LA DEMANDA POR ÁREA**

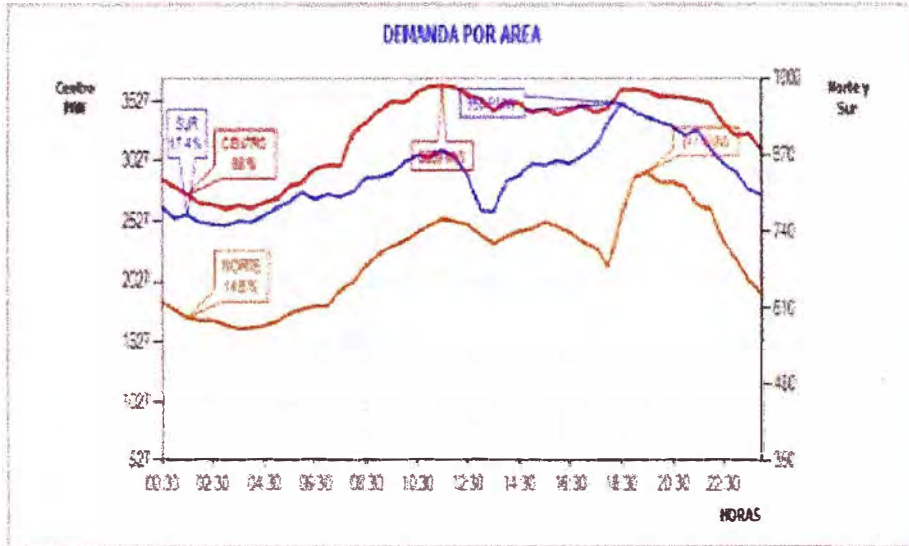


- La máxima demanda del área Centro se presentó a la misma hora que la máxima demanda del SEIN (19:00 h), mientras que las máximas demandas de las áreas Norte y Sur ocurrieron a las 19:30 h y 18:30 h, respectivamente.
- La contribución del área Centro a la máxima demanda del SEIN fue 66.4 %, mientras que las áreas Norte y Sur contribuyeron con 15.2 % y 18.3 % respectivamente.
- Los factores de carga fueron: Área Norte: 0.827, Área Centro: 0.837, Área Sur: 0.84.
- La velocidad de crecimiento de carga de las áreas Centro, Norte y Sur fueron 10.39, 2.53 y 2.62 MW/min respectivamente.

**1.1.3. EVOLUCIÓN HORARIA DE LAS CARGAS MÁS IMPORTANTES**

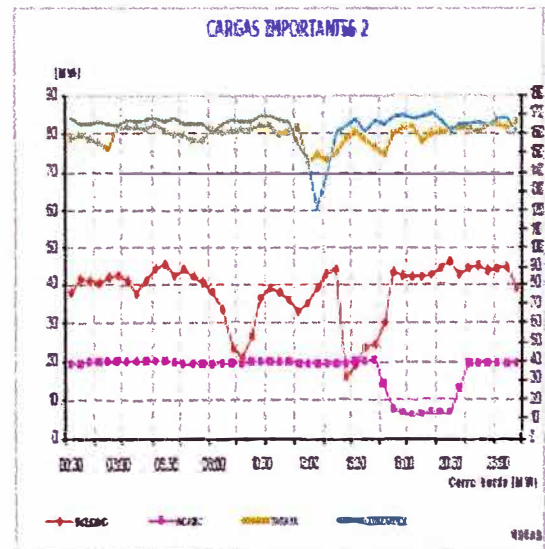
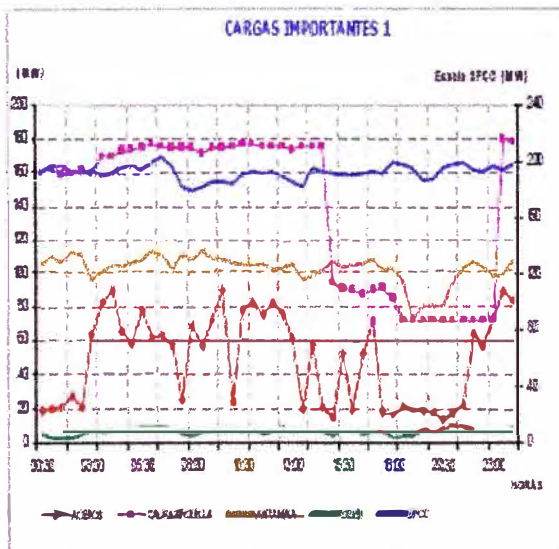


**1.1.2. EVOLUCIÓN HORARIA DE LA DEMANDA POR ÁREA**



- La máxima demanda del SEIN se presentó a las 19:00 h., mientras que las máximas demandas de las áreas Norte, Centro y Sur ocurrieron a las 19:30 h, 11:30 h y 18:30 h, respectivamente.
- La contribución del área Centro a la máxima demanda del SEIN fue 67.0 %, mientras que las áreas Norte y Sur contribuyeron con 15.4 % y 17.5 % respectivamente.
- Los factores de carga fueron: Área Norte: 0.829, Área Centro: 0.891, Área Sur: 0.872.
- La velocidad de crecimiento de carga de las áreas Centro, Norte y Sur fueron 4.89, 2.91 y 1.36 MW/min respectivamente.

**1.1.3. EVOLUCIÓN HORARIA DE LAS CARGAS MAS IMPORTANTES**





## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press Editorial Board - USA, 2000.
- [2] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control", Springer - Alemania, 2012
- [3] José Luis Enríquez Berciano, Enrique Tremps Guerra, Daniel Fernández Segovia, Susana de Elío de Bengy, "Monografías sobre tecnología del acero parte I Acería Eléctrica", Universidad Politécnica de Madrid - España, 2009.
- [4] Rolf Grunbaum, Aake Petersson, Bjorn Thorvaldsson, "FACTS: Mejora del rendimiento de las redes eléctricas" – Suecia, 2002
- [5] Rolf Grunbaum, Tomas Gustafsson, Ulf Olsson "SVC Light: Evaluation of first installation at Hagfors, Sweden", CIGRÉ – Suecia, 2000
- [6] ABB Review, "FACTS: Soluciones y casos de estudio", Revista ABB - Suecia, 2003.
- [7] TECSUP Virtual, "Calidad de la Energía", TECSUP - Perú, 2012
- [8] "IEEE Std. 519 – 1992: Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems". USA, 1993.
- [9] "IEEE Std. 1159 – 1995: Recommended practice for monitoring electric power quality". USA, 1995.
- [10] Ministerio de Energía y Minas: Dirección General de Electricidad, "NTCSE: Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos". Perú, 1997.