



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO  
DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS MÉTODOS PARA ATENUARLAS**

**Héctor Armando Hernández Curiel**

Asesorado por el Ing. Carlos Rolando Curiel Ortega

Guatemala, enero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO  
DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS MÉTODOS PARA ATENUARLAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**HÉCTOR ARMANDO HERNÁNDEZ CURIEL**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ROLANDO CURIEL ORTEGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ENERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Edgar Estuardo Chaj Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftali López Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS MÉTODOS PARA ATENUARLAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha del 28 de octubre de 2011.

**Héctor Armando Hernández Curiel**

Guatemala 24 de octubre de 2012

Ing. Romeo López  
Coordinador del área de Electrotecnia  
Escuela de Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC

Ingeniero López:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado:  
**"ANALISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO DE ARCO ELECTRICO Y SUS METODOS PARA ATENUARLAS"**, desarrollado por el estudiante Héctor Armando Hernández Curiel, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente



Ing. Carlos Rolando Curiel Ortega

**Carlos Curiel Ortega**  
**Ingeniero Electricista**  
**Colegiado No. 7096**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 81. 2013

Guatemala, 19 de SEPTIEMBRE 2013.

Señor Director

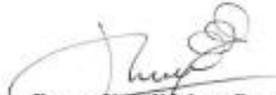
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL  
HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS MÉTODOS PARA  
ATENUARLAS, del estudiante Héctor Armando Hernández Curiel,  
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
**Ing. Romeo Nefalí López Orozco**  
Coordinador Área Electrotécnica



520

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 81. 2013.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; HÉCTOR ARMANDO HERNÁNDEZ CURIEL titulado: ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS MÉTODOS PARA ATENUARLAS, procede a la autorización del mismo.**

**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Guillermo Antonio Puente Romero'.



**GUATEMALA, 31 DE OCTUBRE 2,013.**

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.D.007-2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS MÉTODOS PARA ATENUARLAS**, presentado por el estudiante universitario: **Héctor Armando Hernández Curiel**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, enero de 2014

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
<b>Mis padres</b>	Julio Hernández y Lilitana Curiel. Su amor será siempre mi inspiración.
<b>Mi tío</b>	Carlos Curiel. Por ser mi tío, amigo, asesor y ejemplo a seguir, por su gran paciencia, apoyo y motivación para el desarrollo de este trabajo.
<b>Mi hermana</b>	Lily Hernández. Por estar en todos los momentos buenos y malos.
<b>Mis familiares</b>	A mis abuelos, que con sus consejos sabios me dieron fuerza para seguir, y a mis demás tíos, tías, primos y primas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	José Pérez, María Díaz, Clara Domínguez, etc.
<b>Aceros de Guatemala</b>	Por la oportunidad brindada para la realización de mi trabajo de graduación.
<b>Asesor</b>	Ingeniero Carlos Curiel, por creer en mí y brindarme el apoyo que necesité.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO .....	1
1.1. El horno de arco eléctrico .....	1
1.2. Operación del horno de arco eléctrico .....	3
1.3. Características eléctricas del horno de arco eléctrico.....	6
1.3.1. Eficiencia eléctrica del horno de arco eléctrico .....	11
1.3.2. Reactancia de operación del horno de arco eléctrico .....	12
1.3.3. Potencia eléctrica .....	15
1.3.4. Factor de potencia .....	20
1.4. Abastecimiento de potencia para hornos de arco eléctrico ....	22
1.5. Compensador estático de reactiva .....	23
1.5.1. Funcionamiento del compensador estático.....	26
2. PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO .....	29
2.1. Armónicos.....	29
2.1.1. Definición de armónicos .....	30
2.1.1.1. Transformadores .....	32

2.1.1.2.	Efectos en máquinas rotatorias .....	32
2.1.1.3.	Efecto en motores de inducción .....	32
2.1.1.4.	Efectos en cables y conductores.....	33
2.1.1.5.	Efecto en aparatos de medición .....	34
2.1.2.	Filtros activos .....	36
2.1.3.	Filtros pasivos .....	40
2.1.4.	Conexiones de transformadores .....	47
2.2.	<i>Flicker</i> (parpadeo) .....	53
2.2.1.	Variación instantánea de potencia .....	57
2.3.	Variación instantánea de la potencia reactiva .....	59
2.4.	Variación instantánea de potencia activa .....	61
3.	SISTEMAS DE ATENUACIÓN UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA NACIONAL, PARA ATENUAR LAS DISTORSIONES PROVOCADAS POR LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO .....	63
3.1.	Compensador estático (SVC).....	63
3.1.1.	Función y operación de los SVC en Sidegua .....	68
3.1.1.1.	Bancos de capacitores .....	72
3.2.	Reactor en serie .....	76
3.3.	Filtros armónicos .....	79
3.3.1.	Tipos de filtros .....	85
4.	RESULTADOS DE MEDICIONES REALIZADAS EN LA PLANTA DE SIDEGUA.....	89
4.1.	Diagrama unifilar simplificado.....	89
4.2.	Resultados de mediciones en la planta de acero de Sidegua en un punto cercano al horno de arco eléctrico	

	(punto o), no afectadas directamente por el compensador estático de reactiva y filtros de armónicas .....	90
4.2.1.	Gráfica de potencia.....	90
4.2.2.	Factor de potencia .....	91
4.2.3.	Comportamiento de armónicas.....	92
4.2.4.	Balance de corrientes A, B y C en un punto cercano al horno de arco .....	94
4.2.5.	<i>Flicker</i> versus potencia activa en una colada .....	96
4.3.	Mediciones realizadas en línea de 22,8 kV desde la subestación principal .....	97
4.3.1.	Mediciones realizadas en nodo de 22,8 kV en la planta de laminación (punto S) .....	97
4.3.2.	Resultados de las mediciones en área servicios de acería (Punto T).....	100
4.4.	Medición en nodo de conexión 230 kV con el sistema nacional (punto A).....	104
4.4.1.	Gráfica de potencia y factor de potencia .....	104
4.4.2.	Gráfica de frecuencia y voltaje en línea de 230 kV .....	106
4.4.3.	Gráfica de comportamiento de las armónicas en la línea de 230 kV .....	107
4.4.4.	Gráfica de corrientes A, B, C en línea 230 kV .....	108
4.4.5.	<i>Flicker</i> en línea de 230 kV .....	109
	CONCLUSIONES .....	111
	RECOMENDACIONES .....	113
	BIBLIOGRAFÍA .....	115



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Vista superior horno de arco eléctrico de Sidegua .....	1
2.	Proceso de realización de acero al carbón .....	3
3.	Vista lateral y frontal de un horno de arco eléctrico.....	4
4.	Diagrama unifilar simplificado del horno de arco eléctrico y su compensador estático instalados en Sidegua .....	6
5.	Comportamiento de la frecuencia durante 24 horas.....	8
6.	Comportamiento de la potencia activa durante 24 horas .....	9
7.	Potencia reactiva durante 24 horas, 22,8 kV.....	10
8.	Factor de potencia durante 24 horas, 22,8 kV.....	11
9.	Reactancia normalizada versus factor de potencia .....	14
10.	Potencia durante una colada estándar en el horno de arco eléctrico..	17
11.	Curvas de potencia .....	19
12.	Banco de capacitores y reactores SVC en Sidegua.....	24
13.	Sistema de enfriamiento de tiristores (SVC).....	26
14.	Armónicos de horno de arco .....	30
15.	Filtro activo serie .....	37
16.	Filtro activo paralelo .....	38
17.	Esquema básico de compensación.....	39
18.	Gráfica de compensación de corrientes .....	40
19.	Filtro pasivo conectado .....	41
20.	Entrada a un filtro pasivo.....	41
21.	Salida de un filtro pasivo .....	42
22.	Entrada a un reactor en línea.....	43

23.	Salida de un reactor en línea .....	44
24.	Posición del reactor respecto a las cargas.....	45
25.	Conexión D-Y de transformadores trifásicos.....	48
26.	Corrientes de secuencia cero en la conexión D-Y .....	49
27.	Conexión de dos transformadores para eliminación de 5a y 7a armónica .....	50
28.	Diagrama fasorial de corrientes de transformadores, 5a armónica.....	51
29.	Diagrama fasorial corrientes de transformadores, 7a armónica.....	53
30.	<i>Flicker</i> .....	54
31.	Variación de las potencias durante la colada completa .....	57
32.	Curva característica de un horno de arco eléctrico .....	58
33.	Triángulo de potencias.....	59
34.	Variación instantánea de la potencia reactiva .....	60
35.	Circuito equivalente horno eléctrico y (b) diagrama fasorial.....	61
36.	Ejemplo de compensación con una batería fija de condensadores .....	63
37.	Compensación de potencia reactiva mediante una batería automática de condensadores .....	65
38.	Medida de la tensión e intensidad en el instante que se conecta un escalón de una batería de condensadores (salida TRAF0 1,5 MVA en carga).....	66
39.	Muestra la influencia en poco tiempo respecto al incremento de la producción de acero. En el tiempo de la colada desciende desde los 53 minutos hasta los 48 minutos una vez el SVC esté instalado. Éste es el 9,4 % de reducción del tiempo de calentamiento respecto de la productividad .....	68
40.	Evolución de la potencia reactiva generada por el TCR en función del ángulo de disparo ( $\alpha$ ) .....	70
41.	Composición por fase de un SVC .....	71

42.	Evolución de la potencia reactiva generada por un SVC formado por TSC+TCR .....	71
43.	Esquema equivalente de un TSC.....	75
44.	Lugar de instalación de banco de tiristores idealmente.....	76
45.	Gráfica de onda senoidal y distorsionada por el armónico .....	80
46.	Filtros del quinto y séptimo armónico, además de un pasa alto .....	81
47.	Mecanismos de acción de filtros .....	83
48.	Filtro de 3a armónica instalado en Sidegua .....	84
49.	Gráfica de un filtro simple.....	86
50.	Gráfica de un filtro pasa alto.....	86
51.	Unifilar simplificado de la planta Sidegua .....	89
52.	Gráfica potencia en un punto cercano al horno sin filtros.....	90
53.	Gráfica del factor de potencia en un punto cercano al horno .....	91
54.	Gráfica armónicas atenuadas por el SVC en línea 22,8 kV .....	92
55.	Gráfica de armónicas de corriente medidas en línea de 22,8 kV .....	93
56.	Gráfica corrientes de fases en punto cercano al horno .....	94
57.	Gráfica desbalance de corriente en línea 22,8 kV .....	95
58.	Gráfica potencia activa versus <i>Flicker</i> .....	96
59.	Potencia activa y reactiva, planta de laminación .....	97
60.	Factor de potencia planta laminación .....	98
61.	Armónicas de voltaje planta laminación .....	99
62.	Potencia activa y reactiva servicios acería .....	100
63.	Factor de potencia línea de servicios acería 22,8 kV .....	101
64.	Armónicos de voltaje línea servicios acería 22,8 kV .....	102
65.	Armónicas de corriente línea de servicios acería 22,8 kV .....	103
66.	Gráfica de potencia en línea 230 kV .....	104
67.	Gráfica de factor de potencia en línea 230 kV subestación .....	105
68.	Gráfica de voltaje y frecuencia en línea de 230 kV .....	106
69.	Gráfica de armónicos en línea 230 kV, entrada principal .....	107

70.	Gráfica de corrientes de entrada en línea 230 kV (línea de entrada)..	108
71.	Gráfica de <i>Flicker</i> PST en línea 230 kV, entrada principal.....	109
72.	Gráfica de <i>Flicker</i> en línea 230 kV, entrada principal.....	110

## TABLAS

I.	Variables del modelo matemático .....	13
II.	Variables asociadas a voltajes .....	14

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$S_{cc}$	Capacidad de corto circuito (KVA)
<b>C</b>	Capacitancia
<b>I</b>	Corriente eléctrica
<b>B</b>	Densidad de flujo magnético
<b>THD</b>	Distorsión Armónica Total
<b>f</b>	Frecuencia
<b>F</b>	Fuerza
$P_{st}$	Índice de severidad en <i>Flicker</i> a corto plazo
<b>L</b>	Inductancia
<b>kV</b>	Kilovoltio
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>MVA</b>	Mega voltamperios
<b>MVAR</b>	Mega voltamperios reactivos
<b>N</b>	Número de espiras
$\mu_0$	Permeabilidad del espacio libre
<b>X</b>	Reactancia
<b>R</b>	Resistencia
<b>T</b>	Temperatura



## GLOSARIO

<b>Acero al carbón</b>	Acero que contiene un mínimo no especificado de elementos de aleación; el aumento de la proporción de carbono reduce su ductilidad y soldabilidad a pesar de incrementar su resistencia.
<b>Arco eléctrico</b>	También llamado arco voltaico, es un tipo de descarga eléctrica continua que genera luz y calor intenso; formado entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial.
<b>Chatarra</b>	Materia prima para la fabricación de acero al carbón compuesto de materiales ferrosos.
<b>Colada industrial</b>	Término que define una etapa de fundición de acero en proceso de fabricación.
<b>Electrodos</b>	Postes de grafito comprimido utilizados como medio conductor, ubicados justamente donde se realiza el arco eléctrico para fundir el material ferroso.
<b>Oxidación-reducción</b>	Reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

**Refractario**

Material no metálico, resistente al calor, compuesto básicamente de magnesio y calcio, capaz de soportar temperaturas hasta de 3 000 grados Celsius.

**Siderurgia**

Técnica del tratamiento del mineral de hierro para obtener los diferentes tipos de acero.

## RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación, como se muestra en el capítulo I es una descripción general del funcionamiento del horno de arco eléctrico, sus componentes principales y las características eléctricas de los equipos, especialmente de los que intervienen en la corrección y atenuación de las perturbaciones eléctricas provocadas durante su funcionamiento. Se hace mención del consumo de grandes potencias solicitadas por la industria siderúrgica, que esto a su vez provoca distorsiones en la red eléctrica mencionados en el capítulo II.

Asimismo en el capítulo III se analiza la importancia del uso de compensadores estáticos, utilizados para filtrar las corrientes armónicas, compensar la potencia reactiva y atenuar el *Flicker*, de manera de que con este equipo se podrá medir y analizar los problemas que podrían darse al manejar este proceso errático como lo es la fusión de chatarra, así como la tecnología utilizada para la estabilización de las variables eléctricas que intervienen en el mismo.

El análisis de las perturbaciones provocadas por el horno de arco eléctrico dará una visión más amplia y completa sobre su comportamiento, así como su atenuación a efecto de evitar problemas de estabilidad y calidad de energía al sistema.

Se realizaron pruebas para determinar cómo reacciona el sistema eléctrico nacional con los equipos de atenuación y de una manera teórica como funcionaría el sistema sin estos equipos, dando una perspectiva más amplia

sobre los efectos causados que podrían disminuir la calidad de la energía eléctrica servida como se muestra en el capítulo IV.

# OBJETIVOS

## General

Analizar las perturbaciones provocadas por el horno de arco eléctrico utilizado en la industria siderúrgica para el proceso de producción de acero al carbón, así como los equipos y sistemas que intervienen para la atenuación de las mismas.

## Específicos

1. Presentar el funcionamiento del horno de arco eléctrico utilizado en la siderurgia, y el comportamiento de las variables eléctricas que intervienen en el proceso de fusión de materiales ferrosos.
2. Presentar el proceso eléctrico de la fundición del acero al carbón, de manera que quede claro los equipos involucrados en este proceso.
3. Presentar los parámetros bajo los cuales se tendría que instalar equipos de alta tecnología, para atenuar las perturbaciones provocadas por los hornos de arco eléctrico.
4. Presentar un análisis de las variables eléctricas medidas en el punto de conexión con el sistema nacional, utilizando el equipo de atenuación conectado para verificar la calidad de energía en ese punto.

5. Presentar por medio de gráficas obtenidas en la pruebas, que punto en la red interna de Sidegua son los más determinantes a tener en cuenta en los mantenimientos.
6. Presentar gráficas del comportamiento de las variables eléctricas medidas en el punto de origen, donde no intervengan los equipos de atenuación.
7. Presentar qué puntos del sistema de Sidegua son los mas vulnerables al no estar bajo la protección de los equipos de SVC, pudiendo llegar a ser afectados por distintas fallas.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la fabricación de aceros al carbón, para producir materiales para la industria de la construcción, se encuentra en crecimiento, tratando cada día de mejorar sus tecnologías para lograr hacer más eficientes sus procesos y lograr competir en un mercado internacional muy fuerte.

Para lograr los objetivos de reducción de costos en estos procesos, es necesario prestarle total atención al uso de los hornos de arco eléctrico que son la parte vital en este sistema productivo, pero debe tomarse en cuenta, que debido a que la fusión de los materiales ferrosos se lleva a cabo por medio de un arco eléctrico, puede representar un problema serio para el sistema eléctrico nacional, si no se toman las medidas técnicas necesarias en su operación.

Son ampliamente conocidos los problemas causados por los hornos de arco eléctrico, como por ejemplo la regulación de voltaje, producción de *Flicker*, los desbalances en las líneas, lo que podría traducirse en una reducción de la estabilidad y eficiencia eléctrica del sistema.

La solución ha sido la utilización de banco de condensadores para la compensación de potencia reactiva, aunque estos interactúan con el sistema eléctrico formando circuitos RLC que produce resonancia, por lo cual se tienen que instalar equipos tecnológicamente más avanzados que actúen instantáneamente para atenuar estas perturbaciones y así disminuir los efectos producidos por el horno de arco eléctrico.

Por otro lado ya que el horno de arco eléctrico es una carga no lineal, origina corrientes armónicas, por lo que las frecuencias naturales del sistema podrían ser afectadas por éstas, siendo necesaria la instalación de filtros adecuados para su debido control para evitar que puedan provocar perturbaciones al sistema eléctrico.

Existen ciertas limitaciones para instalar hornos de arco eléctrico, siendo la más relevante de ellas, la necesidad de una fuerte línea de suministro de energía eléctrica, la cual debe ser capaz de aportar los megavatios requeridos, en este caso en un aproximado de 60 MW; por lo tanto, debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar las fluctuaciones de potencia activa MW que produce el horno de arco, a fin de evitar fluctuaciones que podrían provocar problemas a la coordinación de protecciones.

Los equipos eléctricos que alimentan el horno de arco eléctrico están diseñados para soportar las condiciones más críticas de operación, ya que la carga (el horno) es un corto circuito franco trifásico desbalanceado, con altos valores de corriente e interrupciones frecuentes, lo cual aumenta seriamente las posibilidades de fallas en los equipos, especialmente en el transformador de potencia que alimenta directamente el horno.

Además, se menciona el comportamiento y la importancia de cada uno de los elementos auxiliares tanto de operación como de protección, que son parte vital para la operación adecuada del horno de arco eléctrico.

En las páginas siguientes, se describe y analiza una serie de causas de fluctuaciones provocadas por el proceso de producción de acero al carbón, por medio de un horno de arco eléctrico. Además, se estarán analizando los equipos actuales que evitan que estas fluctuaciones lleguen en un mayor rango

a las líneas eléctricas, y de cómo éstas varían en función de los diferentes procesos de la siderúrgica guatemalteca.

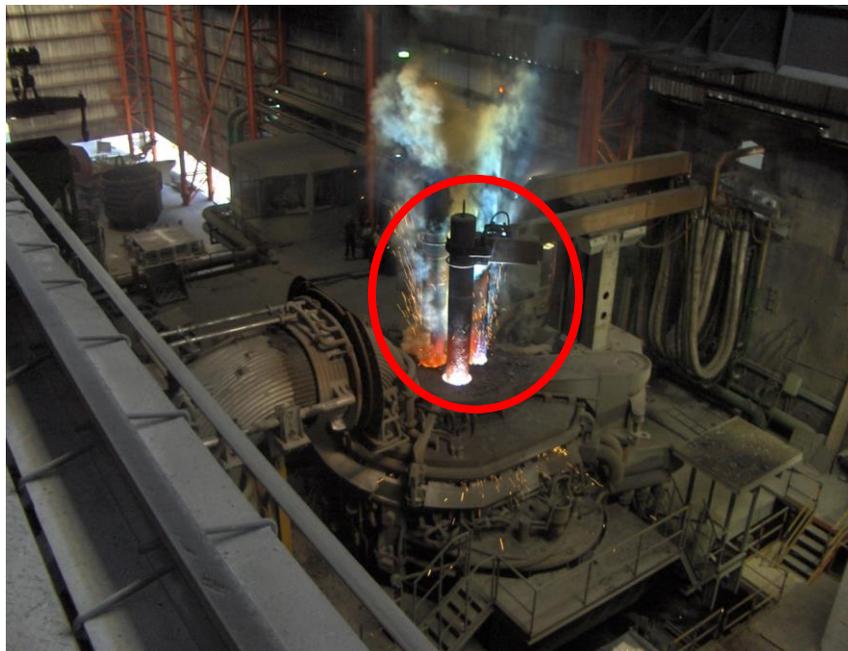


# 1. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

## 1.1. El horno de arco eléctrico

El horno eléctrico se utiliza para producir grados especiales de acero, tal como el acero para herramientas y troqueles, los inoxidables y resistentes al calor. Suele usarse una corriente trifásica en este horno y el calor se genera con el arco producido por la corriente. El calor se puede generar entre los electrodos. Por tanto, el acero de horno eléctrico es el más limpio de todos.

Figura 1. Vista superior horno de arco eléctrico de Sidegua



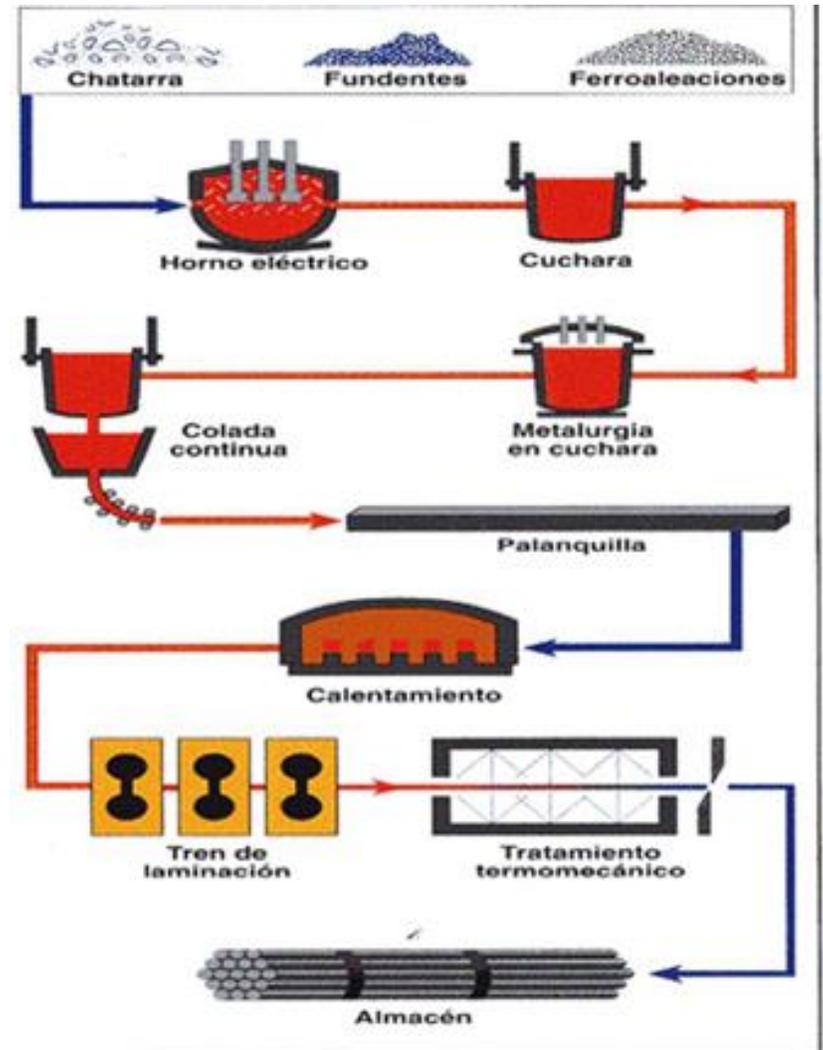
Fuente: Planta de Sidegua.

Puede ser de dos tipos: de arco y de inducción, pero la mayoría del acero se produce con horno de arco. El horno eléctrico es una envoltura de acero, circular en forma de taza o cóncavo, con refractarios en el interior. El horno se monta en balancines a fin de poder inclinarlo y descargar el acero fundido.

La capacidad de los hornos de arco eléctrico varía entre 2 y 200 toneladas. El tiempo de ciclo por hornada (una colada), varía entre 30 minutos y 2 horas, según el tamaño de la carga y el tipo de acero por producir. La carga consiste en chatarra de acero muy seleccionada, piedra caliza y recortes de laminado, que se cargan por la puerta giratoria en la parte superior del horno. Se agregan pequeñas cantidades de elementos en la cesta, las cantidades grandes se incluyen en la carga. Se utilizan los métodos ácido y básico, el ácido suele ser para piezas de acero fundido y el básico para aceros especiales.

El horno de arco eléctrico genera altas temperaturas, un control muy preciso de la composición y mínima contaminación. Pero, debido a la cantidad de electricidad que consume, este horno es más costoso en su operación que los otros procesos para producción de acero.

Figura 2. **Proceso de realización de acero al carbón**



Fuente: proceso del acero al carbón, Sidegua.

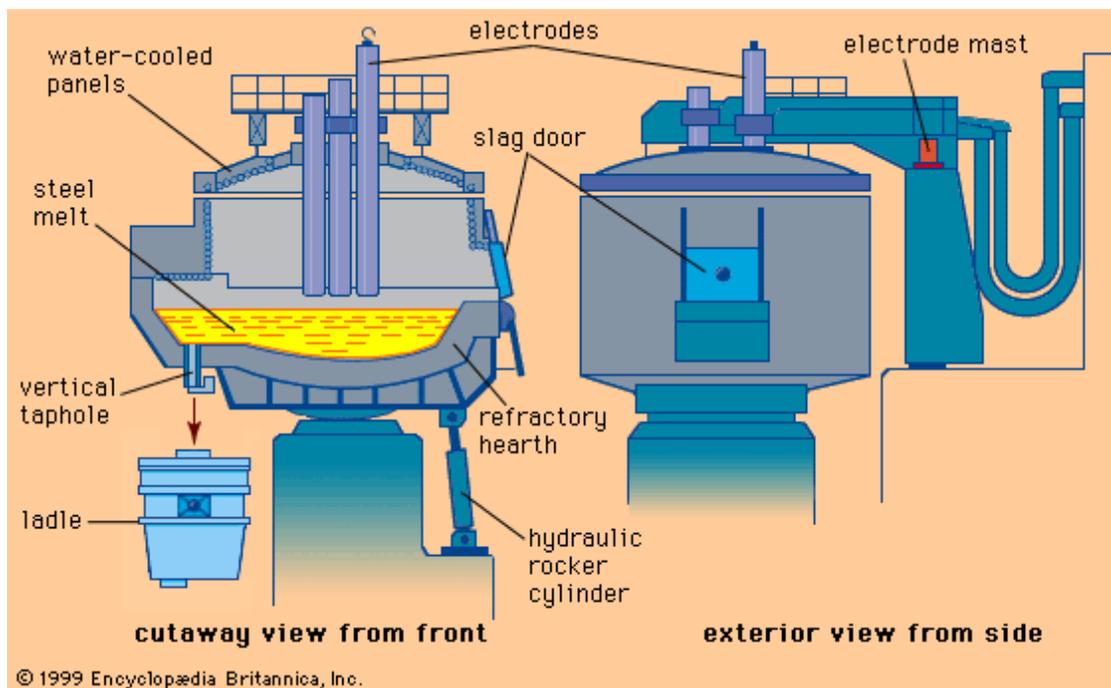
## 1.2. **Operación del horno de arco eléctrico**

La carga del horno eléctrico está constituida de chatarra principalmente. En el baño se lleva a cabo una reacción de oxidación – reducción (proceso redox). Durante la fusión oxidante se elimina el fósforo y durante la reductora el

óxido de hierro disuelto en el baño y el azufre. Controlar el tipo de atmósfera en el baño es fácil.

El calor se encuentra en la parte superior de la carga, siendo necesario en general usar quemadores de diésel o gas, además de lanzas de oxígeno y lanzas inyectoras de grafito, todo este sistema químico aporta energía al proceso.

Figura 3. **Vista lateral y frontal de un horno de arco eléctrico**



Fuente: Encyclopedia Britannica. p. 243.

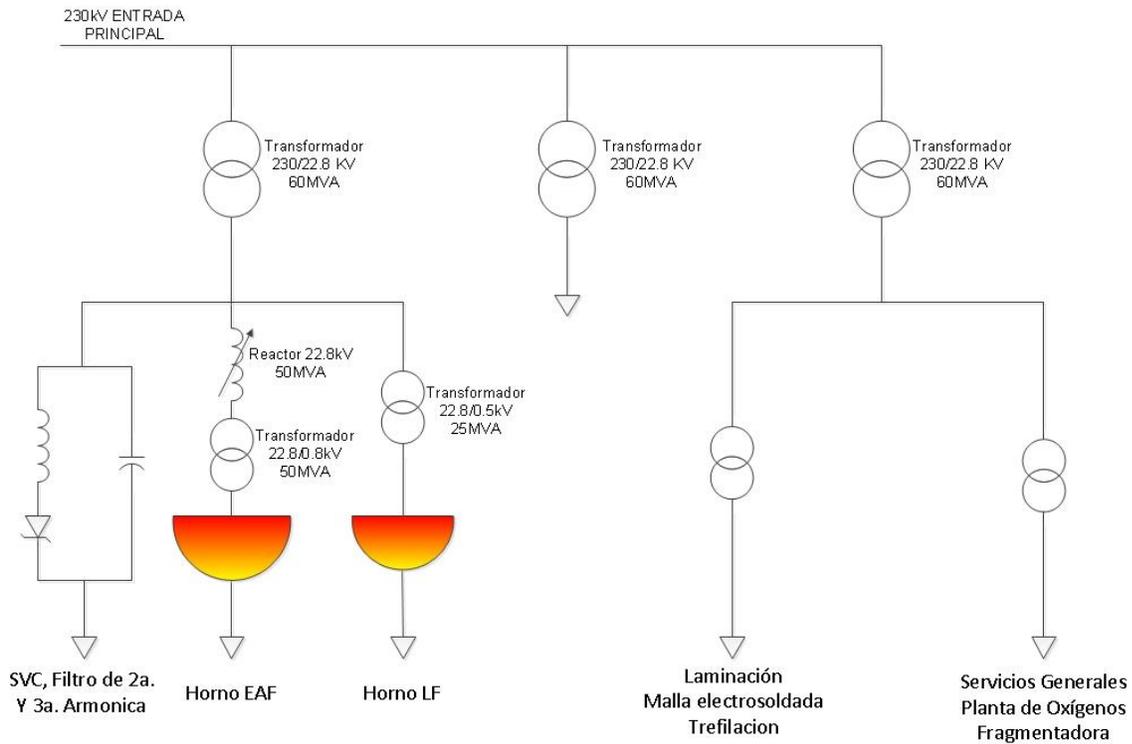
Para generar escoria se añade cal, caliza, etc. El contenido en oxígeno suele ser elevado debido a las altas temperaturas generadas inmediatamente por debajo de los electrodos (3 500 °C) aunque la temperatura final que alcanza el baño líquido suele estar entre 1 600 y 1 700 grados Celsius.

Las ferroaleaciones se añaden tanto al horno eléctrico como en horno olla, siendo este proceso el más adecuado para la fabricación de los aceros al carbón. Aunque a veces pueden surgir problemas con el carbono desprendido de los electrodos de alta pureza, cocidos al vacío y de alta conductividad. Su tamaño es de 20 pulgadas de diámetro y 4 metros de longitud. Según se van quemando se va añadiendo nuevo tramo de electrodo a su extremo opuesto.

El arco opera de forma similar sobre una masa fría de chatarra o sobre la superficie del metal líquido. Este hecho y la facilidad de carga del recipiente lo convierten en el sistema idóneo para fundir chatarra de baja densidad, tales como carrocerías compactas de coches o virutas y desechos procedentes de tornos y talleres mecánicos.

El horno instalado en Guatemala tiene una capacidad de 60 toneladas de acero líquido. La potencia que alimenta al horno de arco eléctrico es suministrada por un transformador de 50 MVA, 22 800/250:950 voltios, tipo columnas, con un circuito secundario enfriado por agua, y un sistema de aceite y agua forzada para mantener su temperatura dentro de los límites seguros de operación.

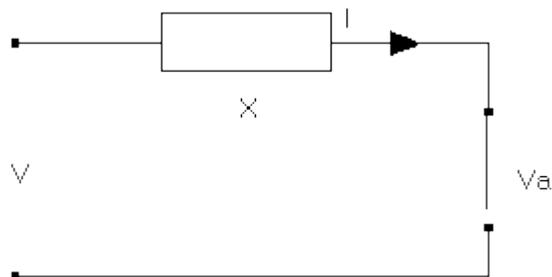
Figura 4. **Diagrama unifilar simplificado del horno de arco eléctrico y su compensador estático instalados en Sidegua**



Fuente: Sidegua.

### 1.3. Características eléctricas del horno de arco eléctrico

El circuito equivalente del horno de arco es muy simple:



Donde X es la reactancia del circuito, V es la tensión en vacío,  $V_a$  es la tensión de arco e I es la corriente. El arco es resistivo, por tanto, la corriente está en fase con la tensión de arco. La tensión de arco es definida por la longitud del arco. Las principales correlaciones entre los parámetros son (para un circuito monofásico):

$$V_a = V \cdot \cos\varphi$$

$$V_a = V \cdot \frac{\text{sen}\varphi}{X}$$

$$X = V \cdot \frac{\text{sen}\varphi}{I}$$

$$\cos\varphi = \cos(a \cdot \text{sen}\varphi) = \cos(a \cdot \text{sen}(I \cdot \frac{X}{V}))$$

$$P = V_a \cdot I = V \cdot I \cdot \cos\varphi = V^2 \cdot \cos\varphi \cdot (\frac{\text{sen}\varphi}{X})$$

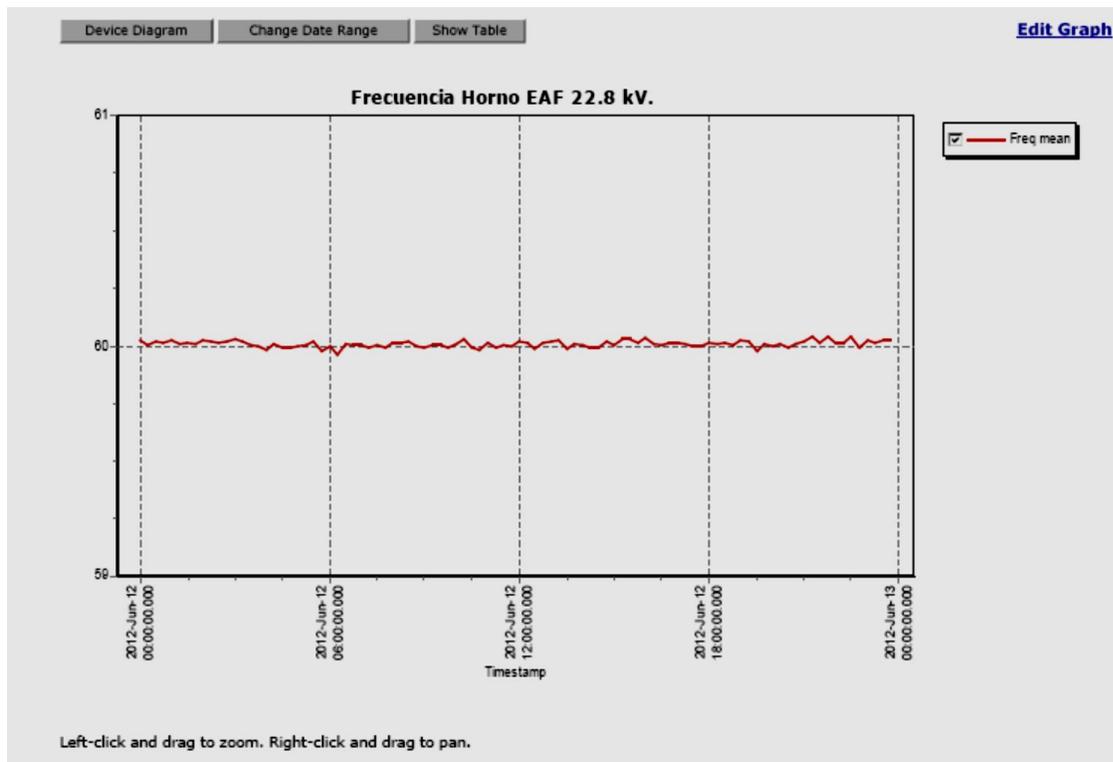
Puede ser incluida la resistencia de pérdidas del circuito para calcular el rendimiento eléctrico del horno.

Una pequeña complicación es el hecho de la reactancia del circuito variar en función de la etapa de operación y del coseno fi. Por ese motivo, para hacer los cálculos de los parámetros operacionales del horno generalmente es necesario partir de un determinado coseno fi y, para cada etapa de operación, afectar a la reactancia del correspondiente factor operacional (que puede variar entre 1,05 e 1,45 aproximadamente).

La operación eléctrica del horno de arco es un poco complicada, debido a la complejidad de la forma de la onda del voltaje del arco, que tiende a generar una serie de ondas que distorsionan la señal senoidal, así como la interacción de las otras dos fases sobre la fase de referencia.

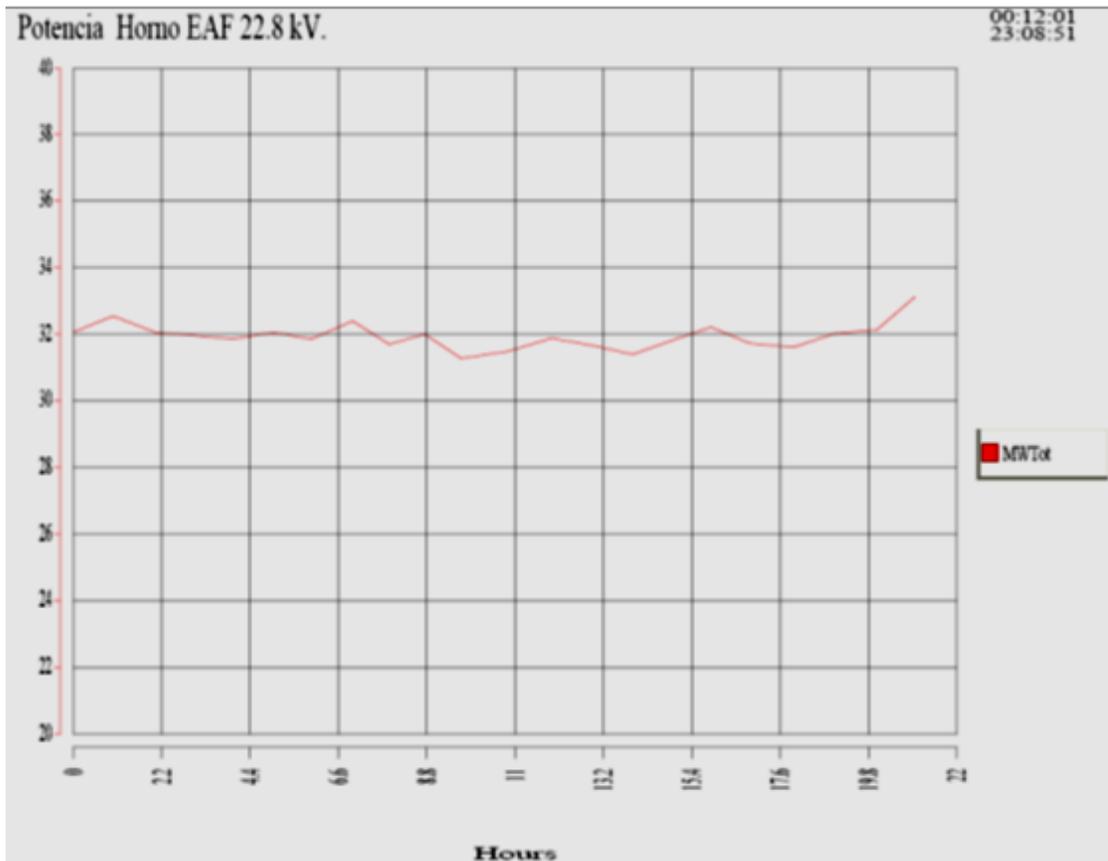
El valor instantáneo de voltaje de cada una de las fases depende de la distancia entre el electrodo de grafito y la carga; esta longitud cambia rápida y constantemente en forma no predecible y errática, por lo que el sistema de regulación (posicionamiento de electrodos) no puede prevenir estas variaciones de voltaje. En las ilustraciones 3, 4, 5 y 6 se puede observar el comportamiento de algunas variables eléctricas (frecuencia, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia) respecto al tiempo, en un horno de arco eléctrico.

Figura 5. **Comportamiento de la frecuencia durante 24 horas**



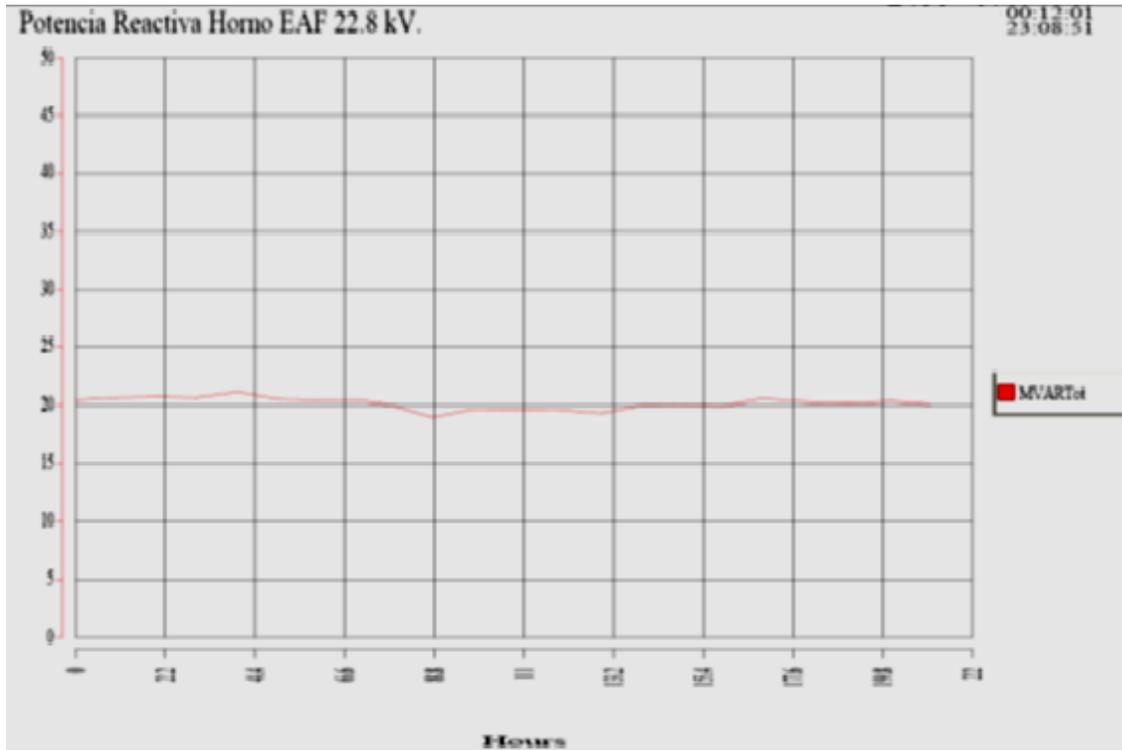
Fuente: sistema de monitoreo ION ENTERPRISE 5.5 instalado en Sidegua.

Figura 6. Comportamiento de la potencia activa durante 24 horas



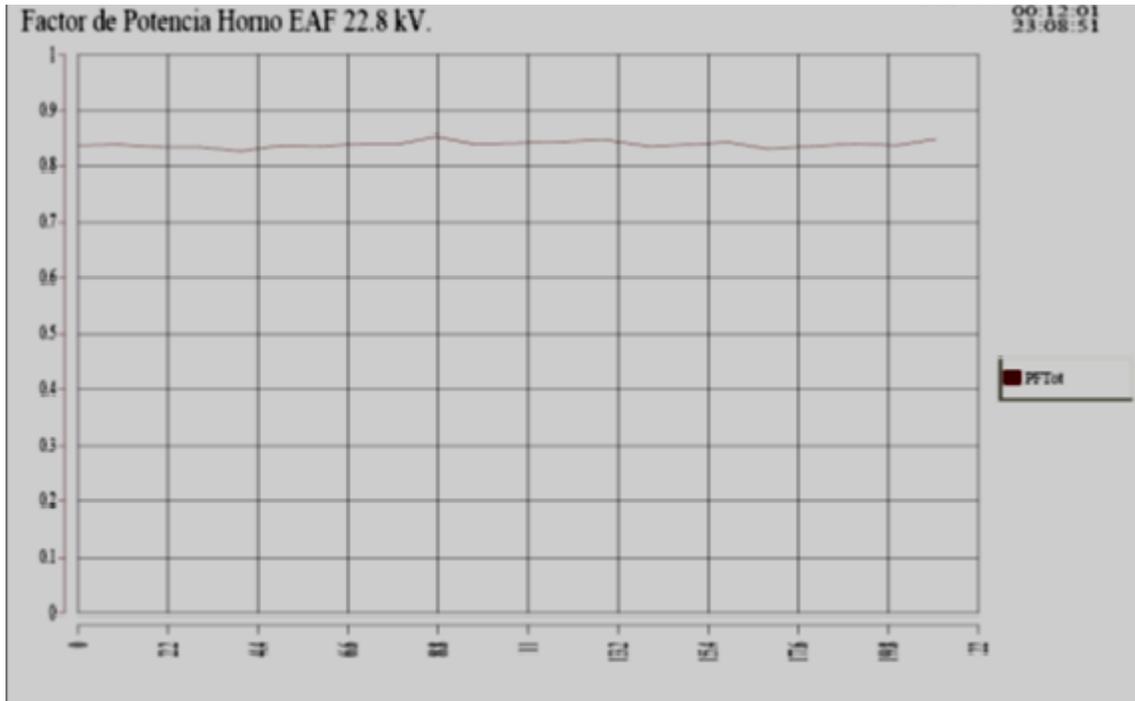
Fuente: sistema de monitoreo ION ENTERPRISE 5.5 instalado en Sidegua.

Figura 7. **Potencia reactiva durante 24 horas, 22,8 kV**



Fuente: sistema de monitoreo ION ENTERPRISE 5.5 instalado en Sidegua.

Figura 8. **Factor de potencia durante 24 horas, 22,8 kV**



Fuente: sistema de monitoreo ION ENTERPRISE 5.5 instalado en Sidegua.

### 1.3.1. **Eficiencia eléctrica del horno de arco eléctrico**

Los hornos de arco eléctrico tienen una eficiencia aproximada del 90 % la cual es relativamente alta, siendo las mayores componentes de pérdidas, las que ocurren en el transformador, los cables refrigerados, los tubos conductores y los electrodos de grafito. Asimismo, existen pérdidas causadas por corrientes de Eddy en los alrededores de la estructura metálica. Se hace la observación de que las pérdidas mencionadas son estrictamente eléctricas, ya que luego que esta energía se convierte en calor, ocurren pérdidas en altas proporciones debido a otras causas, como sistemas de enfriamiento (paneles refrigerados y enfriamiento de electrodos), extracción de humos, falta de hermetismo en el

horno, reacciones químicas exotérmicas en el acero, escoria, escape de gases, etc.

Es importante mencionar que uno de los elementos más relevante en el costo de producción del acero es la energía eléctrica; motivo por el cual se lucha porque su utilización sea lo más eficiente posible. Un valor promedio aceptable de consumo de energía eléctrica para fabricar 1 tonelada de acero, es de 500 kWh.

### **1.3.2. Reactancia de operación del horno de arco eléctrico**

La oposición al paso de la corriente en un circuito de corriente alterna causado por la auto-inductancia o por la inductancia mutua recibe el nombre de reactancia ( $X$ ). En la operación del horno de arco eléctrico está presente, principalmente, la reactancia de tipo inductivo, y se le designa como  $X_L$ . Existe también otro tipo de reactancia, llamada reactancia capacitiva  $X_C$ , la cual es introducida al circuito para corregir el factor de potencia y para estabilizar las líneas de voltaje.

No existe un criterio definido para estandarizar los valores adecuados de reactancia para hornos de arco eléctrico, ya que cada caso es muy particular. Lo que sí es importante resaltar es que, al aumentar la reactancia inductiva del sistema, se mejora notablemente la estabilidad de la corriente, pero a costa de cierta caída de voltaje, el cual puede ser compensado aumentando el tap del transformador, para tratar de obtener una potencia constante.

Algunos sistemas de regulación de arco eléctrico cuentan con reactores regulables bajo carga, conectados en serie con las líneas de alta tensión del transformador del horno, con lo cual se logra que el comportamiento del arco

eléctrico sea más estable, utilizando solamente la reactancia necesaria en función de la parte de proceso involucrada (fusión o afinación).

Este efecto puede representarse por medio de un modelo matemático expresado en la siguiente ecuación:

$$\frac{X_{op}}{X_{sc}} = (1 - F) + F \left( \frac{I_{sc}}{I} \right)$$

Donde:

Tabla I. **Variables del modelo matemático**

$X_{op}$	Reactancia de operación
$I$	Corriente del electrodo
$X_{sc}$	Reactancia de corto circuito
$I_{sc}$	Corriente de corto circuito
$F$	Característica térmica de la operación del horno

Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se observa el comportamiento de la reactancia normalizada  $X_{op}/X_{sc}$  con respecto al factor de potencia. La tendencia con respecto al tiempo, es el desplazamiento de los puntos de operación desde el inicio de la fusión (inestable) hasta la operación en baño líquido. La reactancia de operación de un horno eléctrico también puede definirse por medio de los parámetros eléctricos instantáneos en función de los megos vatios (MW), mega volta amperios reactivos y voltajes del primario y secundario del transformador:

$$X_{OP} = \frac{MVAR \left( V_{sr} \cdot \frac{V_{pr}}{V_{pn}^2} \right)}{(MW^2 + MVAR^2)}$$

Donde:

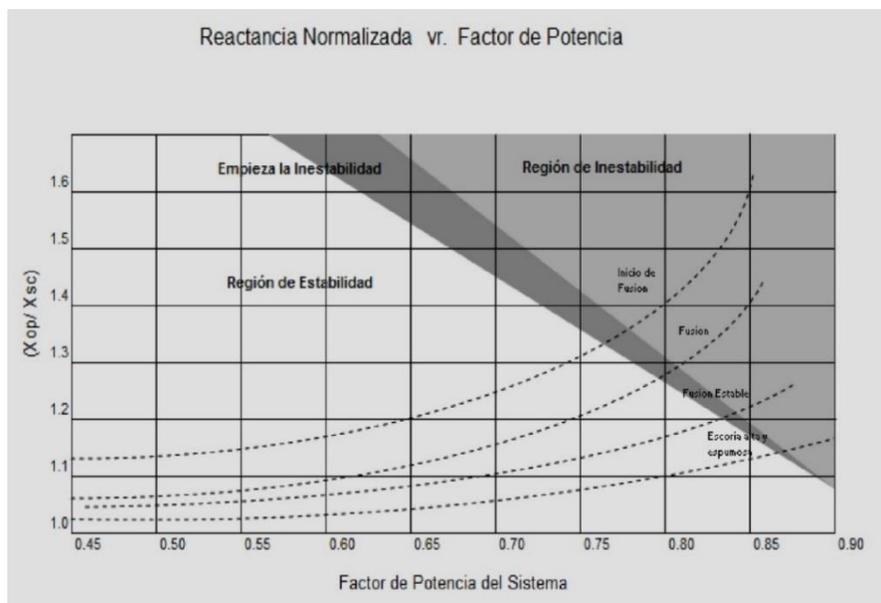
Tabla II. **Variables asociadas a voltajes**

$V_{sr}$	voltaje real del secundario
$V_{pr}$	voltaje real del primario
$V_{pn}$	voltaje nominal del primario

Fuente: elaboración propia.

Esta definición de la reactancia de operación es el valor promedio de las tres fases; es variable y depende del factor de potencia y del tiempo; es siempre mayor que la reactancia física que se obtiene por medio de una prueba de corto circuito del sistema (ver figura 7).

Figura 9. **Reactancia normalizada versus factor de potencia**



Fuente: Arc furnish theory. p. 58.

### 1.3.3. Potencia eléctrica

La potencia máxima que puede aplicarse a un horno de arco eléctrico depende básicamente del tamaño físico del mismo, de si es enfriado por paneles o simplemente posee paredes y bóveda de ladrillo refractario; estos factores son los que limitan la potencia que proporciona el transformador.

En el proceso de fusión, la potencia del transformador no mantiene su valor máximo, porque se trata de moderar el arco al empezar y terminar la fusión de cada recargue; es decir, se trabaja con un arco medio y, luego con un arco largo.

Por ejemplo: para un horno que tiene un diámetro D entre paredes interiores, la potencia máxima que puede soportar es:

$$\text{Potencia Aparente (MVA)} = K \cdot D^2$$

Donde:

MVA = Potencia aparente del transformador

K = 2,4 para paneles y 1,8 para refractario

D = Diámetro entre paredes del horno en metros

Así que un horno como el instalado en Siderúrgica de Guatemala, con paredes de paneles enfriados por agua (ver figura 1), permite mejorar considerablemente el uso de una potencia mayor.

Si

$$D = 4,4 \text{ metros}$$

Entonces:

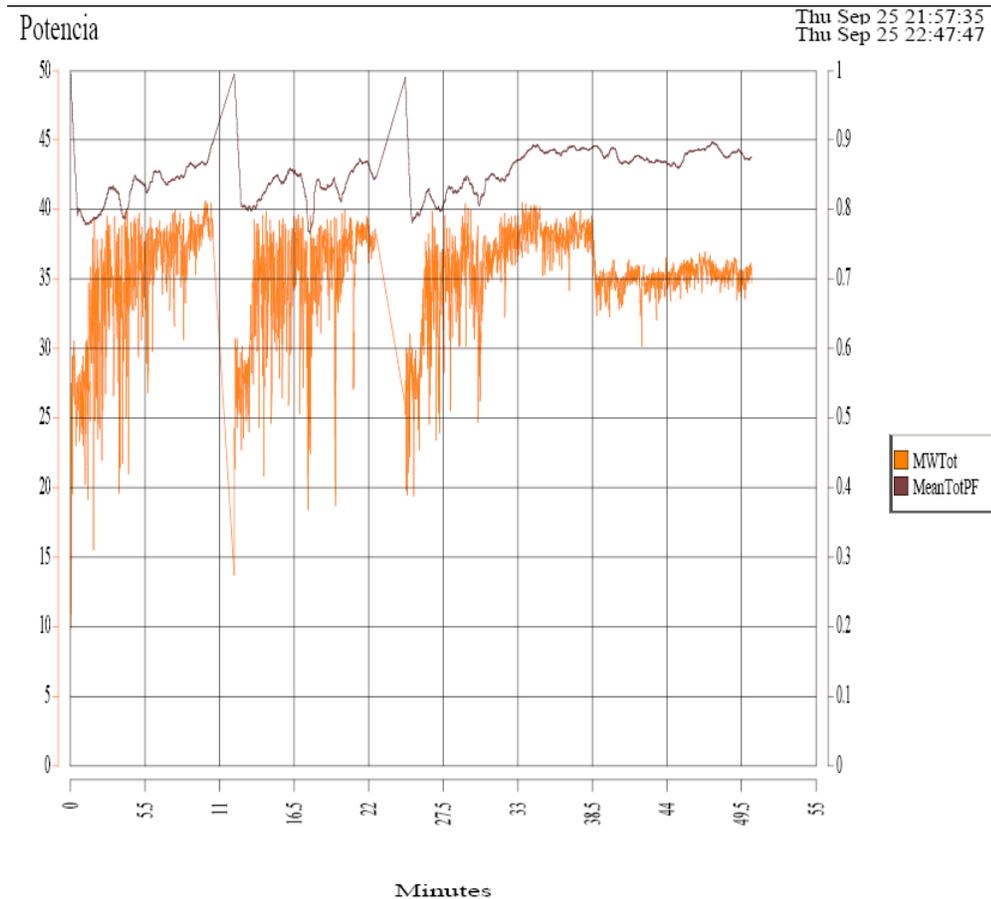
$$MVA = 2,4 \times (4,4)^2$$

$$MVA = 2,4 \times 19,36$$

$$MVA = 46$$

El horno de fusión con el que se cuenta en Siderúrgica de Guatemala es alimentado actualmente por un transformador de 50 MVA. Además, tiene una capacidad volumétrica de 60 toneladas de acero líquido, y produce un promedio de 1 300 toneladas diarias de acero. La fusión se lleva a cabo a una potencia promedio de 35 megavatios, la cual oscila de acuerdo a las necesidades del proceso y al tipo de chatarra que se está utilizando (ver figura 8).

Figura 10. **Potencia durante una colada estándar en el horno de arco eléctrico**



Fuente: Sistema de monitoreo ION ENTERPRISE 5.5 instalado en Sidegua.

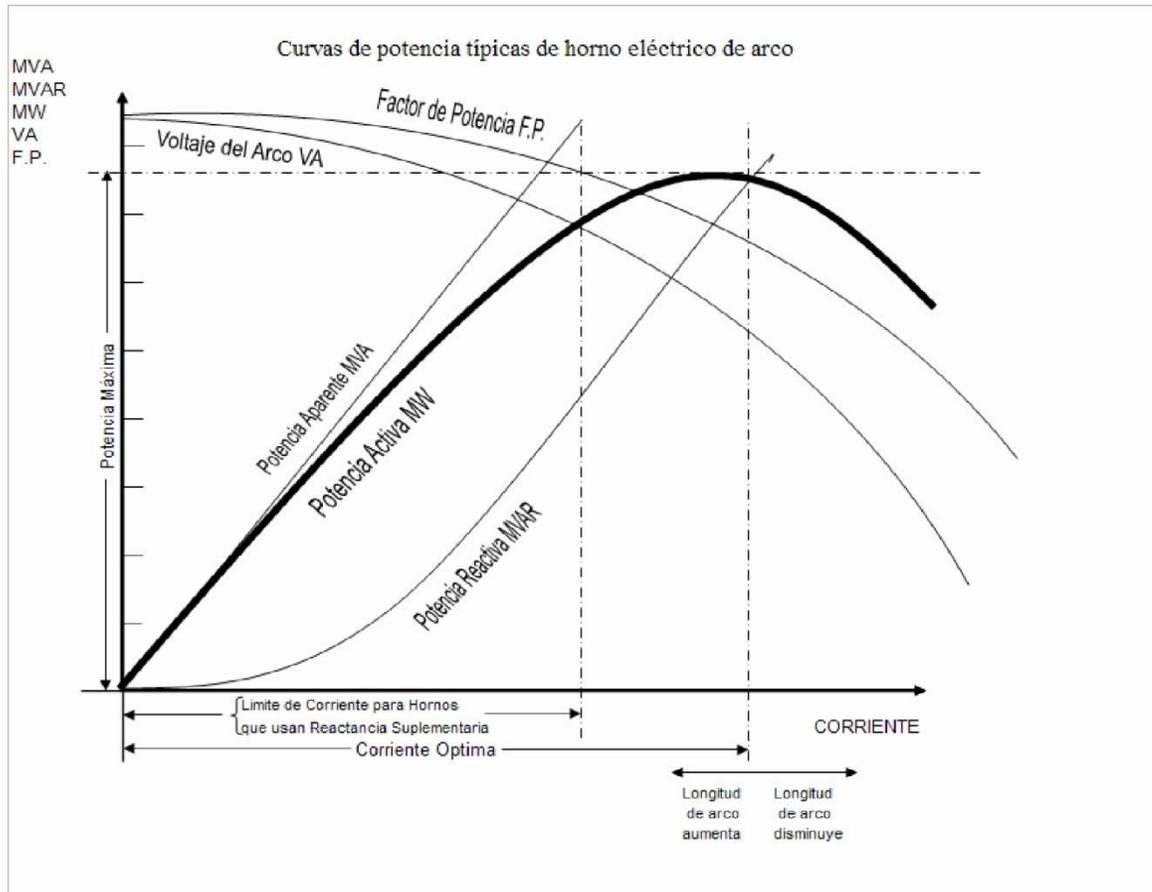
Una colada de 60 toneladas de acero se realiza en un tiempo de 60 minutos, durante los cuales se hacen de 5 a 6 recargues de aproximadamente 13 toneladas cada uno, hasta completar el total de la carga, para luego proceder a su preparación química y elevación de la temperatura, para el posterior vaciado en la olla, donde continúa otra parte del proceso.

Durante la operación del horno de arco eléctrico existen tres elementos importantes que se deben mencionar: los electrodos de grafito, la chatarra y la potencia; todos son esenciales, pero de los tres, la potencia es la más compleja, ya que ésta se presenta en tres formas diferentes: potencia aparente (MVA), potencia reactiva (MVAR) y potencia real o activa (MW). La función del operador es manipular estas potencias para la obtención de la máxima cantidad de acero al costo más bajo y en el menor tiempo posible. Esto define esencialmente lo que es la optimización de la potencia (ver gráficas de potencia activa y reactiva en figuras 4 y 5).

Desde el punto de vista del operador, la más importante de estas potencias es la potencia activa, pues es la que funde la carga. Pero la interacción de las tres potencias juega un papel vital en la operación total del horno, porque interpretando y controlando esta interacción se puede lograr un rendimiento óptimo de la planta en general (ver curvas de potencia, figura 11).

El comportamiento de la potencia activa y reactiva, y el factor de potencia con respecto a la corriente puede observarse más claramente en la gráfica de curvas características del horno (ver figura 3).

Figura 11. Curvas de potencia



Fuente: Boletín Técnico UCAR, no. 3, marzo, 1994, México.

Las curvas de potencia del horno de arco eléctrico mencionadas, contienen amplia información gráfica sobre el fenómeno eléctrico del proceso de fusión por arco. Se puede ver que tanto la potencia activa como la reactiva aumentan al incrementarse la corriente; también se podrá ver que el factor de potencia (f.p.) y el voltaje del arco (v.a.) disminuyen al aumentar la corriente.

El punto que representa la intersección de la curva de potencia activa con la curva de potencia reactiva, y a partir del cual la potencia activa empieza a disminuir en tanto que la reactiva continúa en aumento, representa el punto óptimo de corriente y máxima potencia.

Pero contrariamente a lo que podría esperarse, este no necesariamente corresponde al punto de máxima producción del horno. Los cuatro factores principales que influyen en la determinación del punto óptimo de operación en cada horno de arco eléctrico en particular son: el circuito eléctrico de potencia; la longitud del arco; el tipo de chatarra y la etapa de operación.

#### **1.3.4. Factor de potencia**

En las redes eléctricas de corriente alterna pueden distinguirse dos tipos fundamentales de cargas: cargas óhmicas o resistivas y cargas reactivas. Las primeras toman corrientes que se encuentran en fase con el voltaje aplicado a las mismas. Debido a esta circunstancia, la energía eléctrica que consumen se transforma íntegramente en trabajo mecánico, en calor o en cualquier otra forma de energía no retornable directamente a la red eléctrica. Este tipo de corrientes se conocen como corrientes activas.

Las cargas reactivas ideales toman corrientes que se encuentran desfasadas 90 grados con respecto al voltaje aplicado y, por consiguiente, la energía eléctrica que llega a las mismas no se consume en ellas, sino que se almacena en forma de un campo eléctrico o magnético durante un corto período de tiempo, y se devuelve a la red en un tiempo igual al que tardó en almacenarse. Este proceso se repite periódicamente, siguiendo las oscilaciones del voltaje aplicado a la carga.

Las corrientes de este tipo se conocen como corrientes reactivas.

Los hornos de arco eléctrico representan una carga desequilibrada en la cual el factor de potencia viene definido por la relación de energías reactivas y activas referidas al punto de medición en el circuito primario del transformador.

$$\text{Factor de potencia} = \frac{MW}{MVA}$$

Para un mismo voltaje del transformador, el factor de potencia determina la relación entre el voltaje y la corriente del arco, de tal forma que entre mayor sea el factor de potencia, mayor será la relación de voltaje a corriente del arco.

Debido a las características especiales de los arcos en los hornos durante la fusión de la chatarra, esta relación varía con el tiempo y, asimismo, es dependiente del tipo de carga y de la calidad de la regulación.

En la gráfica de curvas características del horno de arco eléctrico (figura 9), se puede apreciar el comportamiento del factor de potencia con respecto a las demás variables eléctricas. Además cabe observar cómo varía el factor de potencia respecto a la reactancia (ver figura 7).

#### **1.4. Abastecimiento de potencia para hornos de arco eléctrico**

En la selección de un sistema de abastecimiento de energía para un horno de arco eléctrico hay ciertos parámetros por considerar, como:

- Características de la red de alimentación
- Restricciones de las perturbaciones de la red, *Flicker* y armónicas
- Demanda de energía eléctrica para la fusión
- Costo de la energía eléctrica
- Costo de inversión

Por lo tanto, es obvio que la decisión sobre el tipo de alimentación de energía deberá basarse en un estudio esmerado de cada caso, tomando en consideración las condiciones actuales locales (ver unifilar simplificado de Sidegua, figura 2). Es importante mencionar que la red de abastecimiento de energía eléctrica para un horno de arco eléctrico, debe ser lo suficientemente fuerte para proporcionar los megavatios requeridos y para admitir severas fluctuaciones de potencia reactiva que produce el horno, a fin de evitar provocar graves trastornos a otros usuarios de la misma línea.

El método tradicional de alivio a estos problemas es conectar el horno a una línea suficientemente fuerte, opción preferida en los países con redes eléctricas muy desarrolladas, o agregar un compensador estático.

## **1.5. Compensador estático de reactiva**

La estrategia de control para el compensador estático instalado en Siderúrgica de Guatemala es la siguiente: la potencia reactiva capacitiva es producida por dos bancos de capacitores, sintonizados para poder filtrar la distorsión armónica del sistema (específicamente la segunda y la tercera armónica para este caso). La potencia reactiva inductiva es manejada por un controlador de reactores por tiristores (TCR), los cuales hacen posible el control de la potencia reactiva en el horno de arco eléctrico casi instantáneamente.

La potencia reactiva capacitiva entregada por el compensador estático, es controlada ajustando el ángulo de conducción de las válvulas de tiristores, las cuales actúan sobre los reactores. La corrección del ángulo de disparo de la válvula de tiristores es tan rápido, como rápida sea la medición de la corriente de la carga.

Esta información de la corriente es, entonces, usada para calcular el ángulo de disparo necesario para compensar la potencia reactiva de la carga.

El compensador estático instalado en Sidegua consta de las partes básicas siguientes:

- Banco de capacitores (25 MVAR capacitivos)
- Banco de reactores (25 MVAR inductivos)
- Grupo de válvula de tiristores (uno por cada fase)
- Sistema de enfriamiento para la válvula de tiristores

- Cubículo de control y medición
- Filtro de segunda armónica
- Filtro de tercera armónica

Figura 12. **Banco de capacitores y reactores SVC en Sidegua**



Fuente: instalaciones Sidegua.

El cubículo de control realiza todas las funciones lógicas del compensador estático. Estas funciones incluyen, a modo de ejemplo, las siguientes:

- Procedimientos de marcha - paro del sistema de enfriamiento del compensador estático.
- Procedimientos de marcha-paro del compensador.
- Operaciones de interruptor del compensador.
- Funciones de alarma y disparo.
- Enclavamientos para el procedimiento de marcha.
- Diagnóstico de malos funcionamientos.

El sistema de enfriamiento puede operarse remoto, o desde el propio panel del sistema de enfriamiento, pero esto debe hacerse solo durante el mantenimiento y bajo continua supervisión del personal responsable.

Figura 13. **Sistema de enfriamiento de tiristores (SVC)**



Fuente: instalaciones Sidegua.

### **1.5.1. Funcionamiento del compensador estático**

Por razones económicas, el compensador estático se instala en el lado de media tensión del sistema (barra de 22,8 kV, ver gráfica 2); el banco de capacitores (25 MVAR) se encuentra conectado todo el tiempo, mientras el banco de reactores (25 MVAR inductivos) es controlado por válvulas gobernadas por tiristores.

El control de la compensación de potencia reactiva se realiza independientemente en cada una de las tres fases del sistema, lo cual hace más eficiente el trabajo del compensador. Una característica muy importante del compensador de reactiva es el pequeño tiempo de respuesta a las variaciones

producidas por el horno (1/4 de ciclo), lo cual permite una regulación casi instantánea del factor de potencia. Esta rapidez permite disminuir el *Flicker* considerablemente.

El compensador estático es parte fundamental en el funcionamiento de la industria metalúrgica para limitar las perturbaciones que provoca el horno de arco eléctrico.

Un problema muy importante que ha sido un poco difícil de resolver para la compañía suministradora de la energía en el país, es que debido al tipo de proceso de producción que se lleva a cabo en la industria metalúrgica, el sistema eléctrico que abastece a este tipo de industria debe contar con un excedente de generación (llamada potencia rodante), para atenuar la inestabilidad producida por las variaciones en el consumo de potencia del horno, el cual no es constante; es más, el horno, en determinado momento, puede estar consumiendo 35 MW y un instante después cero MW (debido a un disparo por máxima corriente en alguna de las fases del horno o porque se ha terminado la fusión de la carga presente).

Además, mientras se hace el recargue de chatarra, el horno no consume ninguna potencia durante aproximadamente 3 minutos, y ocurren alrededor de 60 recargues por día (ver gráfica 8, potencia versus tiempo).



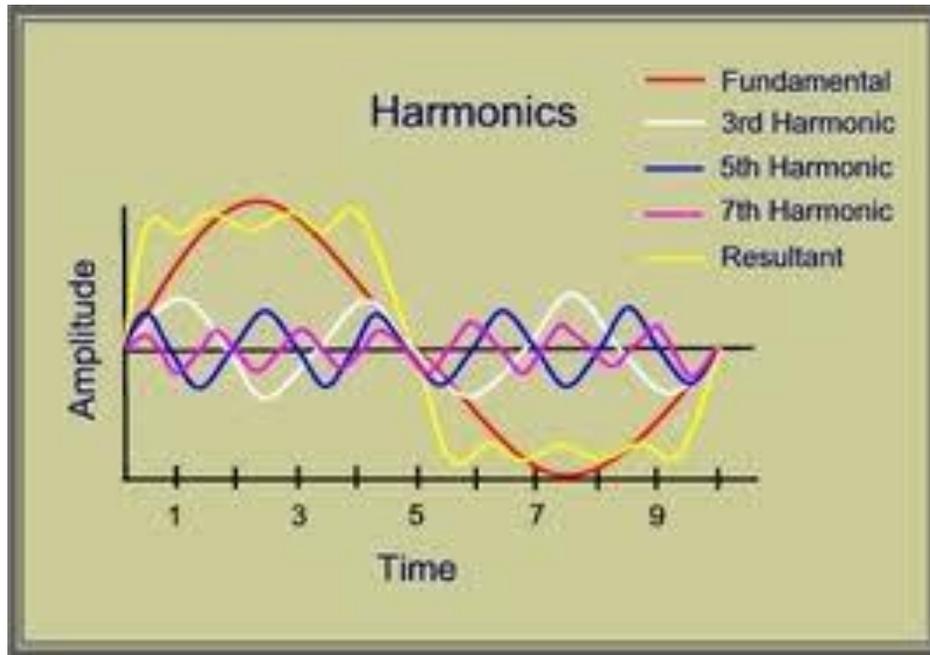
## **2. PERTURBACIONES PROVOCADAS POR EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO**

### **2.1. Armónicos**

De todos los aparatos que producen arco eléctrico en un sistema de potencia, son los hornos de arco eléctrico los que pueden causar los problemas más severos, porque representan una fuente armónica de gran capacidad concentrada en un lugar específico. Un horno de arco eléctrico es mostrado en la figura 13, estos equipos según sus características de diseño pueden fundir acero, minerales y en general material de desecho metálico y el método de fundición consiste en la producción de un arco de gran energía que permite fundir el acero.

Una combinación del retraso en la ignición del arco con las características altamente no lineales de la curva voltaje del arco vs. Corriente, introduce armónicas de la frecuencia fundamental. Adicionalmente, los cambios de voltaje ocasionados por alteraciones en la longitud del arco producen una gama de frecuencias, predominantemente de 0,1 a 30 KHz, este efecto se hace más evidente en la fase de la fundición, en la interacción de las fuerzas electromagnéticas entre los arcos.

Figura 14. Armónicos de horno de arco



Fuente: Navarro Crespo, Alfredo. Corrientes Armónicas. p. 15.

### 2.1.1. Definición de armónicos

Son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

El incremento en el uso de las cargas no lineales principalmente, la incorporación de sistemas de transmisión de CD y la proliferación de diversas fuentes de generación de armónicos, está causando un incremento de problemas armónicos en los sistemas de potencia.

El efecto de distorsión de voltaje puede ser dividido de manera general en 3 categorías:

- Esfuerzos en el aislamiento debido a los efectos de voltaje
- Esfuerzos térmicos debido al flujo de corriente
- Trastornos en la carga

Factor de Distorsión Armónica Total (THD):

Determina el grado de distorsión de una señal periódica con respecto a la senoidal y se define en términos de la amplitud de los armónicos.

THD para voltaje (THDV): 
$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}$$

THD para Corriente (THDI): 
$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Los efectos de las armónicas se dividen en general en tres categorías:

- Efectos en el propio sistema de potencia
- Efectos en la carga consumida
- Efectos en los circuitos de comunicación

### **2.1.1.1. Transformadores**

Los efectos de las armónicas en los transformadores son:

- Incremento en las pérdidas del cobre.
- Incremento en las pérdidas del hierro.
- Posible resonancia entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea.
- Esfuerzos de aislamiento.

### **2.1.1.2. Efectos en máquinas rotatorias**

Fundamentalmente las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas rotatorias de C.A.:

- Incremento en el calentamiento debido a las pérdidas en el hierro y cobre.
- Cambios en el par electromagnético que afecta a:
  - La eficiencia de la máquina.
  - Las oscilaciones torsionales de la máquina.

### **2.1.1.3. Efecto en motores de inducción**

Las pérdidas pueden ocurrir en el estator y en el rotor de la siguiente manera:

- Pérdidas  $I^2R$  en el estator: al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico, no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también

aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas  $I^2R$ .

- Pérdidas  $I^2R$  en el rotor: éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque.

Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas:

- Pérdidas de núcleo: son función de la densidad de flujo en la máquina
- Pérdidas adicionales
- Torque en el motor de inducción

#### **2.1.1.4. Efectos en cables y conductores**

Al circular corriente a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule,  $I^2R$  donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable, disminuye el área efectiva por donde ésta circula, puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.

### **2.1.1.5. Efecto en aparatos de medición**

Los medidores e instrumentos son afectados por la presencia de voltajes y corrientes armónicas. Aparatos de disco de inducción, tales como vatímetros y relevadores de sobre corriente son diseñados y calibrados solamente para la corriente y el voltaje fundamental.

La presencia de corrientes y voltajes armónicas generan un par electromagnético adicional en el disco causando operaciones erróneas. La distorsión debe ser severa (mayor del 20 %) para que se detectan errores importantes.

Los grandes generadores de armónicos de intensidad son las cargas no lineales de alta potencia que se encuentran principalmente en el sistema eléctrico de distribución, afectando negativamente a éste. Los principales problemas derivados de las intensidades armónicas son los siguientes:

- Sobrecalentamiento de transformadores y motores eléctricos: los armónicos de tensión y de intensidad inducen flujos magnéticos de alta frecuencia en el paquete magnético, provocando un aumento de las pérdidas por histéresis (proporcionales a la frecuencia) y por Foucault (proporcionales al cuadrado de la frecuencia), traducidas en un sobrecalentamiento. Por ello se sobredimensionan los transformadores y motores entre un 5 y 10 %.

- Sobrecalentamiento de condensadores: la impedancia de éstos decrece proporcionalmente con el orden de lo armónico, de forma que a mayor frecuencia menor impedancia capacitiva, provocando sobretensiones y sobrees intensidades, sobrecalentándolos e incluso llegando a alcanzar su destrucción. Además, si la combinación de la reactancia de una línea o transformador y el condensador, tienen una resonancia en la misma frecuencia que un armónico de intensidad existente en el sistema eléctrico, se producirá una sobre intensidad fluyente hacia el elemento capacitivo (el condensador se cortocircuita).
- Distorsión de la onda de tensión: los armónicos de intensidad, al transcurrir por una impedancia, causan distorsión de la onda de tensión, con indeseada repercusión sobre dispositivos eléctricamente cercanos. Éste es un hecho muy común cuando se utilizan rectificadores.
- *Flicker* o parpadeo: en algunos casos, el espectro frecuencial generado por una carga no lineal contiene frecuencias inferiores a la del sistema eléctrico (subarmónicos). Estas indeseables frecuencias, especialmente entre 8 y 30 Hz, causan "parpadeo" en lámparas incandescentes, siendo muy molesto para el ojo humano. Las industrias de hornos de arcos son los principales contribuidores a este tipo de problema.
- Errores de medida: errores de medición de energía reactiva y el factor de potencia. También erran las lecturas con multímetros basados en el valor medio o con poco ancho de banda.

- Interferencia con sistemas de comunicación: los armónicos altos de intensidad interfieren con sistemas de comunicación tales como teléfonos, radios, antenas de televisión, etc.
- Intensidades en los conductores de neutro, incluso en redes equilibradas, producidas por armónicos triples (3, 6, 9, 12,...).
- Pérdidas Joule en conductores: en los conductores se producen pérdidas adicionales asociadas a las intensidades armónicas, además, estas pérdidas son amplificadas debido al efecto Skin (acumulación de la intensidad en el exterior del conductor, reduciéndose la sección efectiva).

### **2.1.2. Filtros activos**

El principal objetivo del equipo limitador de armónicos es reducir, mediante filtrado, la distorsión de las ondas de tensión y corriente producidas por los hornos de arco y los rectificadores que existen en la acería.

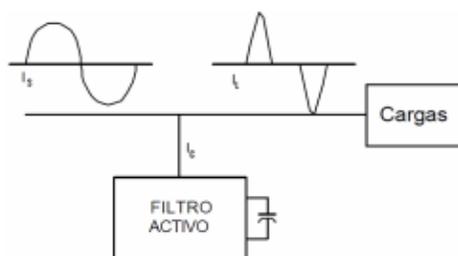
En el diseño de un filtro se busca la reducción de los efectos perjudiciales causados por la distorsión de la onda, si bien su total eliminación no es posible debido tanto a razones técnicas como económicas. Desde el punto de vista técnico, no se puede estimar por adelantado de manera precisa la distribución de armónicos que se va a presentar en la red en todo momento. Además, la total eliminación de los armónicos, aún en el caso de ser técnicamente posible, sería una opción antieconómica.

Los filtros tradicionalmente utilizados en la minoración de la distorsión armónica han sido los filtros pasivos. Estos basan su funcionamiento en proporcionar a las corrientes armónicas, un camino de impedancia mucho

menor que la red exterior, actuando como sumideros de las mismas. Sin embargo, la incapacidad de los filtros convencionales de reducir las resonancias de armónicos no característicos, han hecho que se produzca un gran desarrollo de las técnicas de compensación basadas en la electrónica de potencia, que se denominan filtros activos.

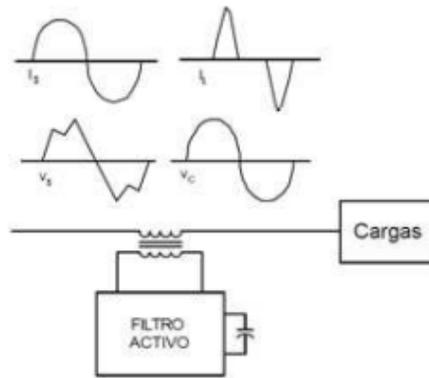
Los filtros activos cancelan las corrientes armónicas generadas en la carga mediante la inyección de las mismas corrientes armónicas pero en oposición de fase, de forma que se consigue eliminar la distorsión de la onda. La inyección de estas corrientes se realiza mediante un inversor que se conecta a la red de corriente alterna, con un sistema de almacenamiento de energía situado en el lado de corriente continua. El sistema de almacenamiento debe ser capaz de absorber o suministrar el contenido de corriente armónica que se requiera en cada momento. El inversor trabaja con tecnología PWM y va dotado de un sistema de control que realiza un seguimiento de la corriente de la carga, determinando el contenido armónico y generando en consecuencia consignas de mando para conseguir su cancelación.

Figura 15. **Filtro activo serie**



Fuente: Fink, Donald; Beaty, Wayne H. Manual de ingeniería eléctrica. p. 74.

Figura 16. **Filtro activo paralelo**



Fuente: Fink, Donald; Beaty, Wayne H. Manual de ingeniería eléctrica. p. 74.

Comparándolos con los filtros activos, los principales inconvenientes que presentan los filtros pasivos son:

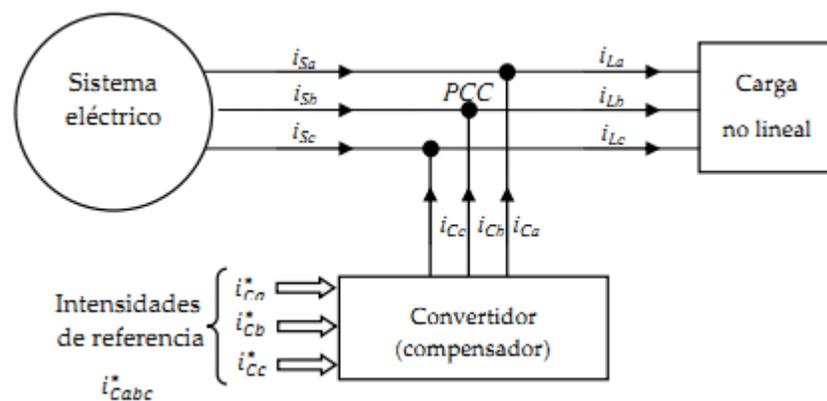
- Solamente son válidos para un orden armónico determinado, mientras que los filtros activos sirven para un rango armónico que va a ser función de la frecuencia de conmutación de los elementos activos del filtro.
- Pueden llegar a dar lugar a problemas de resonancias que podrían provocar la destrucción del filtro.
- El cálculo del filtro es función de la impedancia de la red, que en principio puede ser desconocida y que además puede variar una vez calculado el filtro.
- Por su parte, los filtros activos permiten el funcionamiento estable a pesar de la variación de la impedancia de la red, así como una variación rápida si cambia el orden o magnitud de los armónicos.

- Su principal desventaja es su mayor coste en comparación con los filtros pasivos.

Funciones que puede realizar:

- Reducción de los armónicos de intensidad que circulan por la red.
- Reducción de corrientes que circulan por el conductor neutro.
- Reducción de los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.
- Corrección del factor de potencia.
- Equilibrado de las intensidades que circulan por las distintas fases.
- Equilibrado de la tensión entre fases y el neutro.
- Regulación de la tensión y reducción del parpadeo.

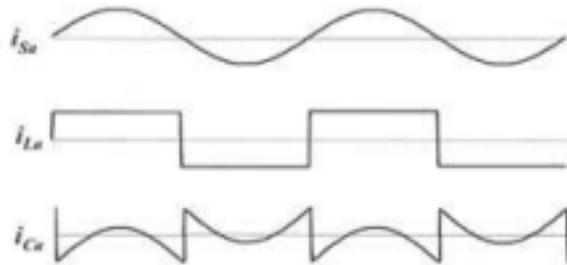
Figura 17. **Esquema básico de compensación**



$$i_{Sa} = i_{La} + i_{Ca}^*$$

Fuente: Fink, Donald; Beaty, Wayne H. Manual de ingeniería eléctrica. p. 75.

Figura 18. **Gráfica de compensación de corrientes**

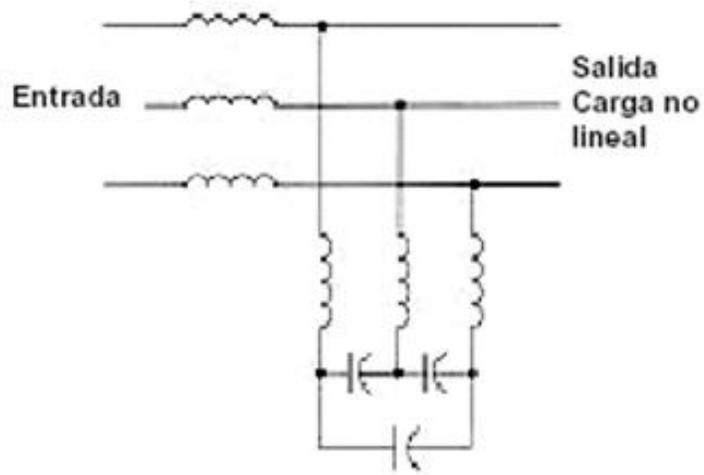


Fuente: Fink, Donald; Beaty, Wayne H. Manual de ingeniería eléctrica. p. 76.

### 2.1.3. Filtros pasivos

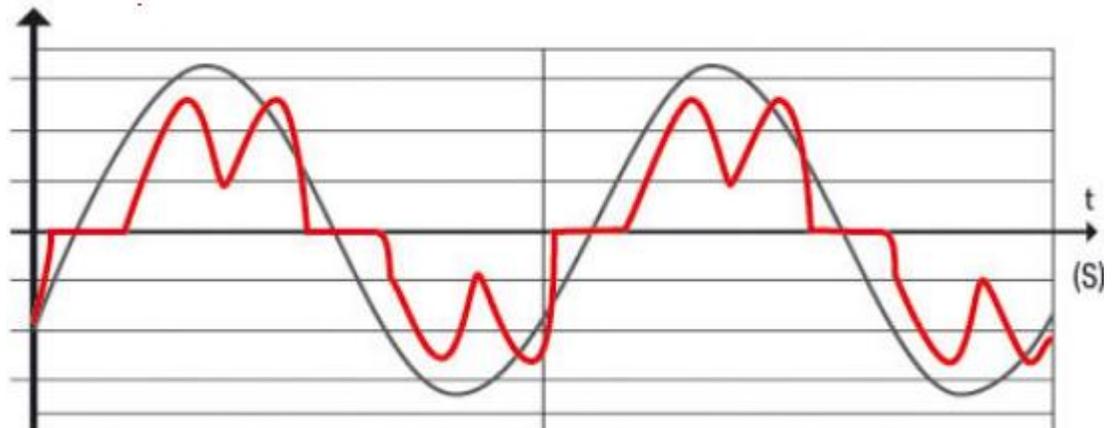
Filtros pasivos, los más populares, construidos basados en condensadores e inductancias ajustados para bloquear o absorber determinados armónicos. Las aplicaciones en que son empleados deben estudiarse con cuidado para asegurar su compatibilidad con el resto del sistema. Pueden llegar a ser excesivamente voluminosos y crear efectos indeseables como transitorios y resonancias. La figura 5 muestra una configuración típica.

Figura 19. **Filtro pasivo conectado**



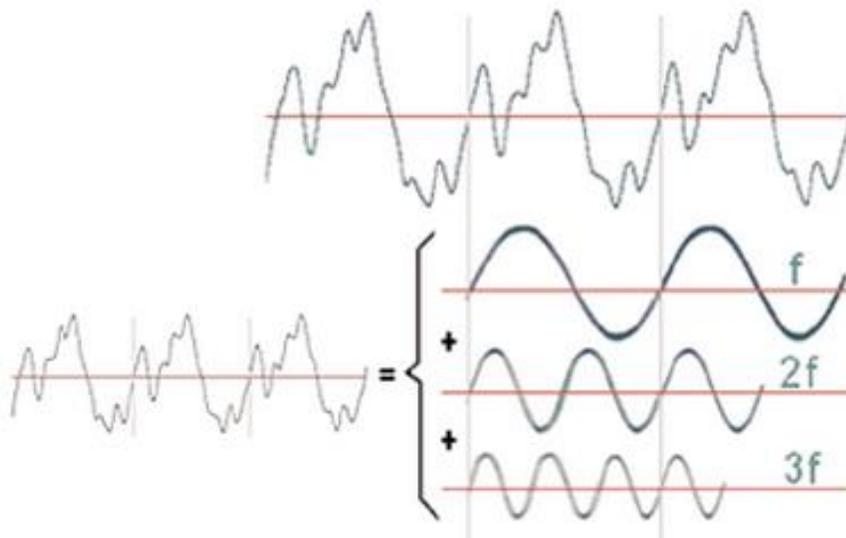
Fuente: Fink, Donald; Beaty, Wayne H. Manual de ingeniería eléctrica. p. 77.

Figura 20. **Entrada a un filtro pasivo**



Fuente: Navarro Crespo, Alfredo. Corrientes armónicas. p. 16.

Figura 21. **Salida de un filtro pasivo**



Fuente: Charles, Alexander. Circuitos electrónicos. p. 117.

Los filtros pasivos, de armónicas, vienen en una amplia variedad. En algunos casos, ellos no son más que un reactor de línea. En otros casos, pueden usar filtros resonantes en serie o paralelos (uno solo o ambos simultáneamente) para atrapar o resistir a los armónicos.

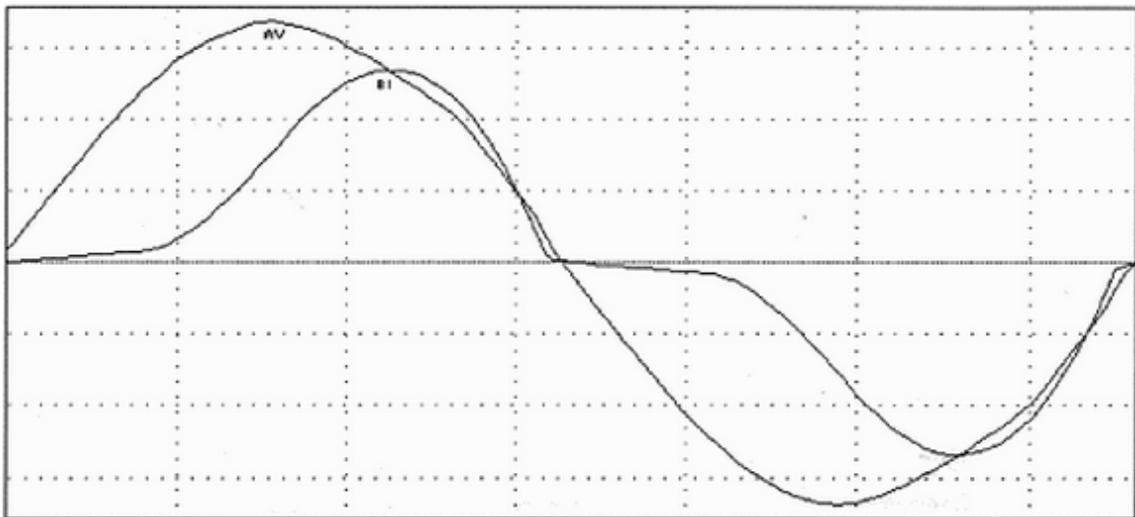
Un filtro serie (con la carga en serie) que usa componentes en paralelo (inductancias y capacitancias en paralelo) se conoce como un “reflector (repelente) de corriente”. En, o cerca la frecuencia de resonancia del conjunto paralelo, el filtro provee atenuación máxima. La “Q” del filtro determina el ancho de banda. Un filtro paralelo (paralelo con la carga) usando componentes en serie (inductancias y capacitancias en serie) es un aceptador de corriente.

En o cerca al punto de resonancia del filtro, este dejará pasar mucha corriente y voltaje armónico y la resistencia de Corriente Continua (DC) del filtro

la soportará. Cuando se sintonizan adecuadamente con la carga estática, los filtros pasivos se convierten en un medio efectivo para controlar los armónicos. Como en el caso de reactores de línea, la distorsión de voltaje de rendimiento puede ser bastante. Las figuras 4 y 5 muestran el voltaje y corriente dentro y fuera de un filtro pasivo.

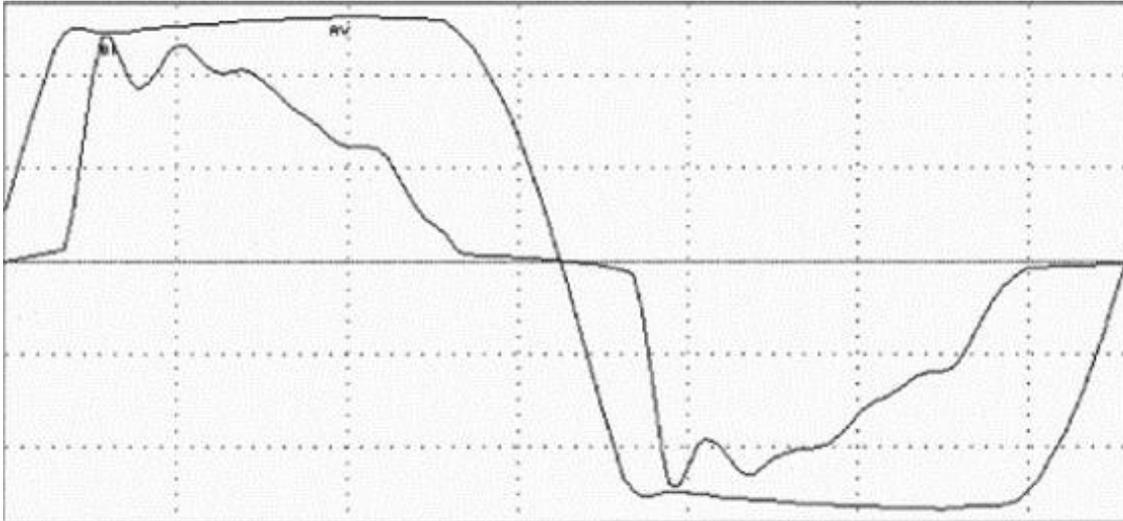
Se debe tener pendiente: los filtros armónicos pueden ser bidireccionales. Esto significa que ellos pueden “hundir” (deformar) tanto la onda hacia la carga como la onda hacia la fuente. Algunos usuarios de filtros armónicos simples, se han horrorizado al encontrar que sus filtros les están disparando *breakers* o rompiendo componentes cuando los filtros intentan atrapar armónicos provenientes de la red de distribución.

Figura 22. **Entrada a un reactor en línea**



Fuente: Palmer, A. Horno de acero de la acería Allegheny Ludlum Pennsylvania. (en línea). p. 51.

Figura 23. **Salida de un reactor en línea**



Fuente: Palmer, A. Horno de acero de la acería Allegheny Ludlum  
Pennsylvania. (en línea). p. 51.

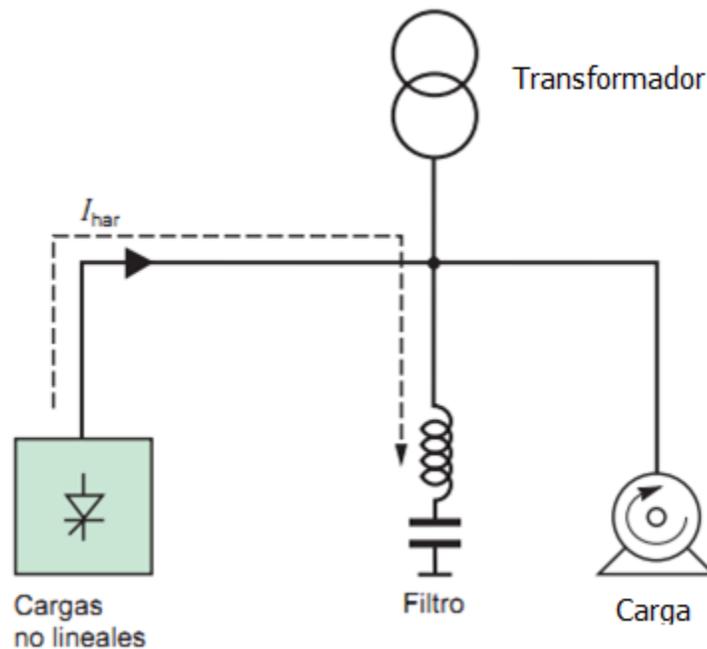
Un reactor en línea, es comúnmente un simple inductor. La reactancia inductiva del inductor resiste la corriente de armónicos de alta frecuencia. Según la ecuación  $X_L = 2\pi fL$ . Como la frecuencia aumenta, también lo hace la resistencia.

Las componentes de 60 Hz pasan a través del inductor con poca oposición, pero a los componentes de más alta frecuencia les resulta más difícil pasar. Por lo que las corrientes armónicas disminuyen cuando un reactor se aplica en la línea. El reactor de línea limita las corrientes armónicas, a expensas de una distorsión en el voltaje. El voltaje de salida en el reactor de línea mostrará distorsión en su forma de onda y limitará frecuentemente el voltaje pico. Las figuras 22 y 23 muestran el voltaje y corriente dentro y fuera de un reactor de línea.

Aplicaciones típicas:

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Figura 24. **Posición del reactor respecto a las cargas**



Fuente: Navarro Crespo, Alfredo. Corrientes armónicas. p. 19.

Un circuito LC, sintonizado a cada rango armónico que se va a filtrar, se instala en paralelo con la carga no lineal (ver figura 21). Este circuito de

derivación absorbe los armónicos, evitando así que circulen por la red de distribución.

De manera general, el filtro pasivo se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. Se pueden utilizar varias ramificaciones de filtros conectadas en paralelo si se necesita una reducción significativa de la distorsión global.

- Filtros *Shunt* o paralelos pasivos:

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros, pero las más utilizadas son los filtros sintonizados simples y los pasa altos.

- Filtro sintonizado simple

Elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor.

Selección de filtros pasivos:

La utilización de un filtro como solución al problema de armónicos, requiere de un análisis detallado de la respuesta en frecuencia del sistema. Entre los criterios de selección del filtro se tienen los siguientes:

- El número de armónicos del sistema a atenuar. Dependiendo del número de armónicos existentes en el sistema, se puede determinar la cantidad de filtros (filtro sintonizado o dual) que se podrían ubicar para obtener una atenuación de las componentes armónicas.

- Esta minimización debe estar acorde con los límites establecidos por las normas. Los requerimientos del filtro. Se hace referencia a la acción correctiva que se desee del filtro (compensación de reactivos, reducción de la distorsión armónica, regulación de tensión o todos). Cada requerimiento del filtro implica un diseño específico, tal que el objetivo para el cual se quiere se cumpla.
- La energía de cada armónico. La magnitud de cada armónico está directamente relacionada con las pérdidas que estas componentes armónicas ocasionan en los sistemas de potencia.

#### **2.1.4. Conexiones de transformadores**

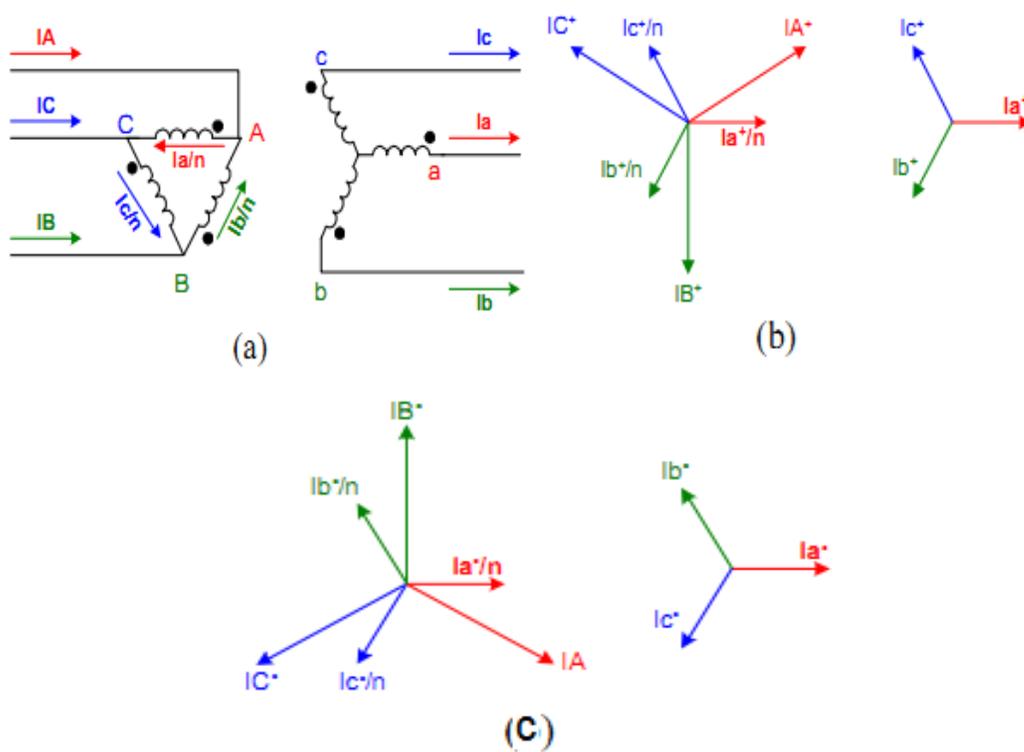
Se analizarán las conexiones de transformadores eléctricos para la eliminación de 3a, 5a, 7a, 11a y 13a armónicas, provocadas por el funcionamiento del horno eléctrico.

En cuanto a conexiones de transformadores trifásicos, las más comúnmente utilizadas son: D-Y, Y-Y, Y-D, D-D. La conexión D-Y se muestra en la figura 1a. Si se asume que los transformadores tienen una relación de vueltas igual a “n”, entonces existen  $30^\circ$  de desfaseamiento entre las corrientes de línea de primario y secundario, tal como se muestra en la figura 1b y 1c, mismo que depende de la secuencia de las corrientes. En el caso de secuencia negativa, el desfaseamiento es opuesto al de secuencia positiva.

La figura 2 muestra como la conexión D-Y elimina el flujo de corrientes de secuencia CERO en las líneas del lado de la D y éstas se limitan a circular dentro de la D. En el caso de que la Y del secundario no esté conectada a tierra, entonces, debido a que la corriente del neutro es nula y las corrientes de

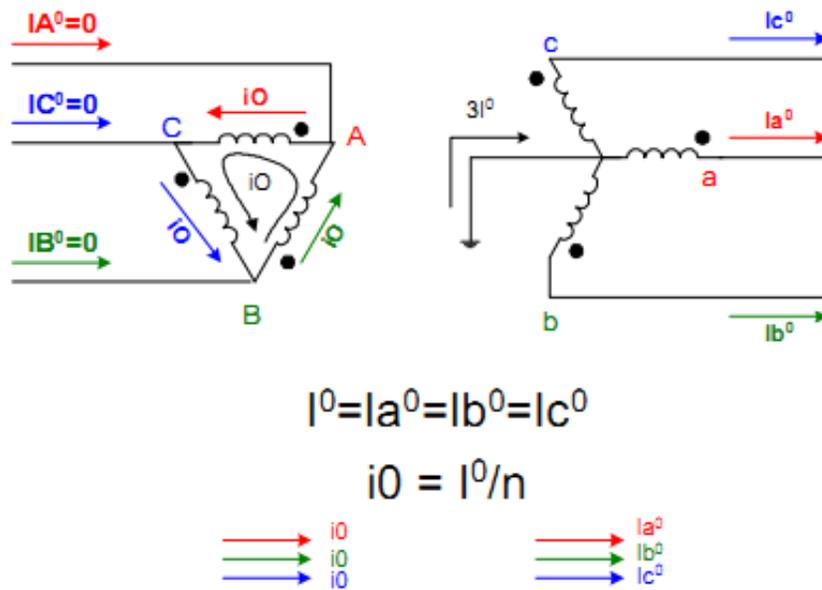
secuencia CERO están en fase, no existe posible trayectoria para estas corrientes en el secundario. Una situación similar ocurre cuando se deja sin conectar a tierra alguna de los lados de un transformador Y-Y.

Figura 25. **Conexión D-Y de transformadores trifásicos**  
**(a) Conexión estándar (b) Corrientes de secuencia positiva**  
**(c) Corrientes de secuencia negativa**



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia p. 112.

Figura 26. Corrientes de secuencia cero en la conexión D-Y



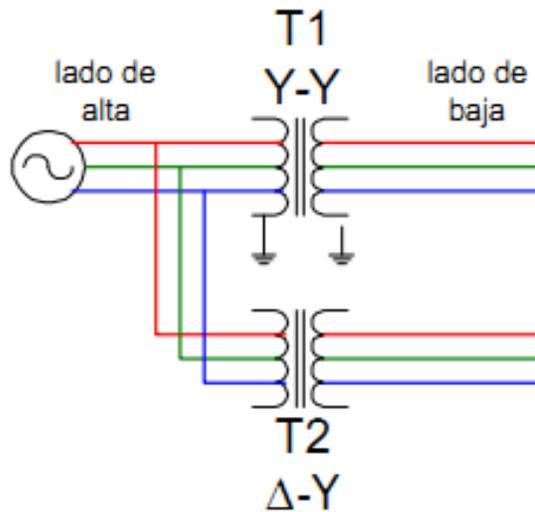
Si el neutro de la Y no está puesto a tierra, entonces todas las corrientes de secuencia cero son iguales a cero:  
 $i_0 = I^0 = I_a^0 = I_b^0 = I_c^0 = 0$

Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 113.

Atenuación de armónicas:

La figura 3 muestra un transformador T1 en conexión Y-Y y un transformador T2 en conexión D-Y cuyos primarios están en paralelo. Los secundarios alimentan a cargas no lineales iguales. Asíumase que sólo existe distorsión de corrientes y que sólo existen armónicas impares, además de la componente fundamental. El transformador T2 puede, alternativamente, conectarse en Y-D.

Figura 27. **Conexión de dos transformadores para eliminación de 5a y 7a armónica**



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 113.

- Eliminación de quinta armónica

Debido al desfase de  $-30^\circ$  que introduce el transformador T2, las corrientes del secundario correspondientes a la 5a armónica están desfasadas:

$$-30^\circ \cdot 5 = -150^\circ$$

Con respecto a las del transformador T1.

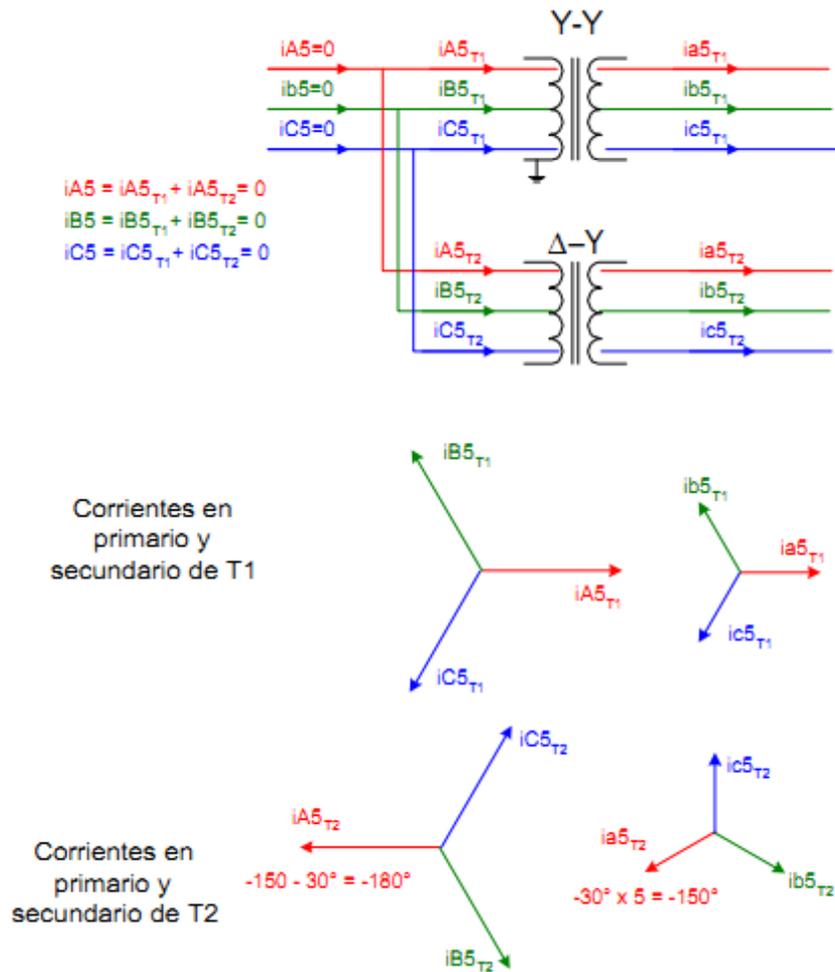
Mientras que, debido a que las 5as armónicas se comportan como componentes de secuencia negativa, existen  $-30^\circ$  de desfase, por tanto las corrientes en el primario de T2 están desfasadas:

$$-150^\circ - 30^\circ = -180^\circ = 180^\circ$$

Con respecto a las del transformador T1.

Si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces las 5as armónicas se cancelan y no fluyen a la fuente. Este análisis se aprecia mejor en la figura 4, donde se han incluido las corrientes de 5a armónica de las 3 fases de ambos transformadores.

Figura 28. **Diagrama fasorial de corrientes de transformadores, 5a armónica**



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 114.

- Eliminación de séptima armónica

Debido al desfase de  $-30^\circ$  que introduce el transformador T2, las corrientes del secundario correspondientes a la 7a armónica están desfasadas:

$$-30^\circ \cdot 7 = -210^\circ = 150^\circ$$

Con respecto a las del transformador T1.

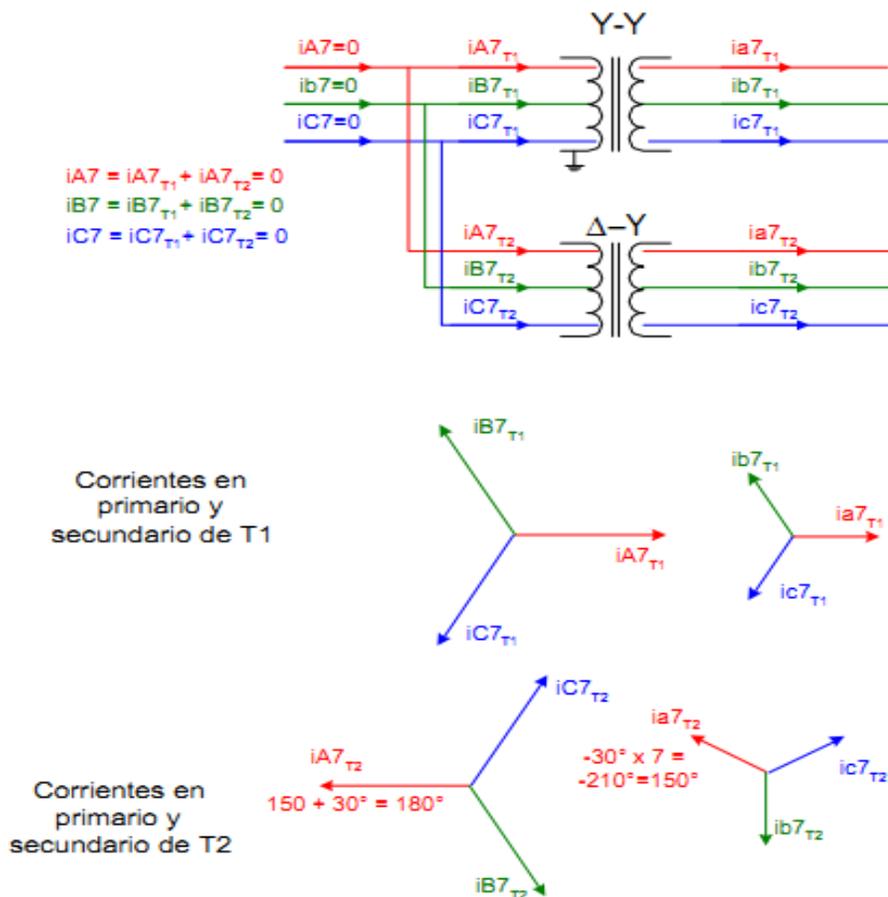
Mientras que, debido a que las 7as armónicas se comportan como componentes de secuencia positiva, existen  $30^\circ$  de desfase, por tanto las corrientes en el primario de T2 están desfasadas:

$$150^\circ + 30^\circ = 180^\circ$$

Con respecto a las del transformador T1.

Si las magnitudes de las corrientes en los primarios de T1 y T2 son iguales, entonces las séptimas armónicas se cancelan y no fluyen a la fuente. Este análisis se aprecia mejor en la figura 5, donde se han incluido las corrientes de 7a armónica de las 3 fases de ambos transformadores.

Figura 29. Diagrama fasorial corrientes de transformadores, 7a armónica



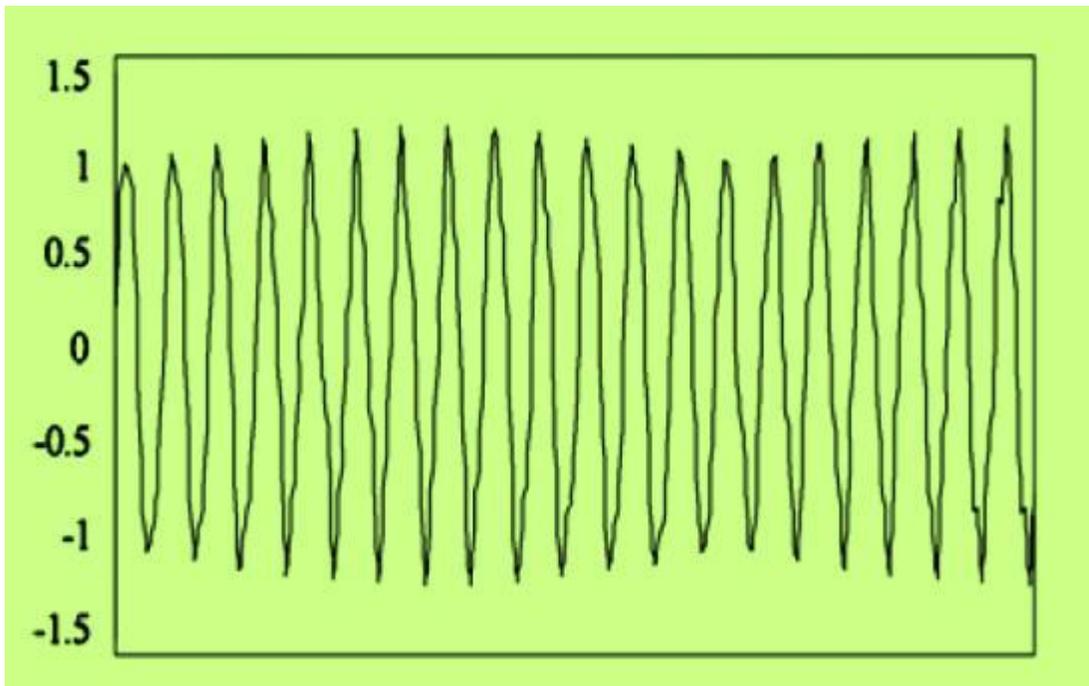
Fuente: Sawabe, Hiroshi. Fluctuación del voltaje-Flicker en el horno de arco eléctrico. p. 96.

## 2.2. Flicker (parpadeo)

Se define como el nivel de molestia que percibe un observador medio como consecuencia de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red de alimentación eléctrica.

Depende fundamentalmente de la profundidad y de la frecuencia de las fluctuaciones de tensión que lo causan.

Figura 30. **Flicker**



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Fluctuación del voltaje-Flicker en el horno de arco eléctrico. p. 99.

Según la Norma UNE EN 50160:1996, el *Flicker* es la impresión de inestabilidad de la sensación visual debida a un estímulo luminoso en el cual la luminosidad o la distribución espectral fluctúan en el tiempo.

Puede afirmarse que una de las cargas que causa mayor perturbación en las redes eléctricas de suministro es el horno de arco eléctrico.

Los efectos pueden percibirse en el mismo sitio donde opera el horno, pero también, son perceptibles en instalaciones remotas.

Los disturbios producidos por los hornos de arco, pueden afectar significativamente la calidad de la energía distribuida. El horno de arco es una carga no lineal, que varía en función del tiempo y que propicia tanto fluctuaciones del voltaje como distorsión armónica.

Las primeras causan variaciones de la luminosidad de las lámparas, el *Flicker*, que afecta el aparato visual del ser humano; el efecto entonces, es neurológico.

De hecho, las variaciones de las cantidades eléctricas se deben a las fluctuaciones de la longitud del arco causadas por fuerzas electromagnéticas, colapsos de la chatarra metálica y el movimiento de los electrodos activados por los reguladores. Entonces se está en presencia de una carga considerablemente desbalanceada y, por si fuera poco, varía entre condiciones de cortocircuito, cuando los electrodos hacen contacto con la chatarra, y circuito abierto, cuando el arco se extingue.

La compensación del *Flicker* en un horno de arco eléctrico (EAF) no es un asunto simple; ni siquiera para sistemas de capacidad pequeña. El problema lo causan la carga no lineal en sí misma y la característica V-I no lineal que, además, varía con el tiempo. Independientemente del contenido de 2a, 3a, 4a, y 5a armónicas, que son las de mayor magnitud, el horno genera, para todo fin práctico, un espectro continuo con un rango que va desde cd hasta kilociclos. Es más, en algunos casos las técnicas simples de mitigación no bastan para eliminar las variaciones de las cantidades eléctricas.

Para tener una visión preliminar respecto a posibles problemas, se puede aplicar una aritmética simple:

Se calcula el scvd (*short circuit voltage depression*); este índice califica la severidad del *Flicker* e indirectamente estima los efectos del horno sobre la red eléctrica de suministro. El juicio se da en función de cómo encaja el scvd en la gráfica denominada de aceptabilidad.

$$SCVD = \frac{2 \times MW_{AF\_nominales}}{MVA_{CC\_PCC}}$$

- La severidad del *Flicker* viene a ser una estimación de los efectos que causa un eaf en la red de suministro.
- El *Flicker* se mide mediante el scvd: *Short-Circuit Voltage* que se basa en:
  - La capacidad máxima de placa del horno (en MW).
  - La capacidad de corto-circuito (en MVA) en el punto de acoplamiento común (PCC) distorsión.

Estándares de calidad:

Armónicos	IEEE Std C57.110, IEEE Std 519, IEEE P519a, IEEE Std 929, IEEE Std 1001
-----------	---

Cálculo matemático:

$$Pst = (0,0314 P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50})$$

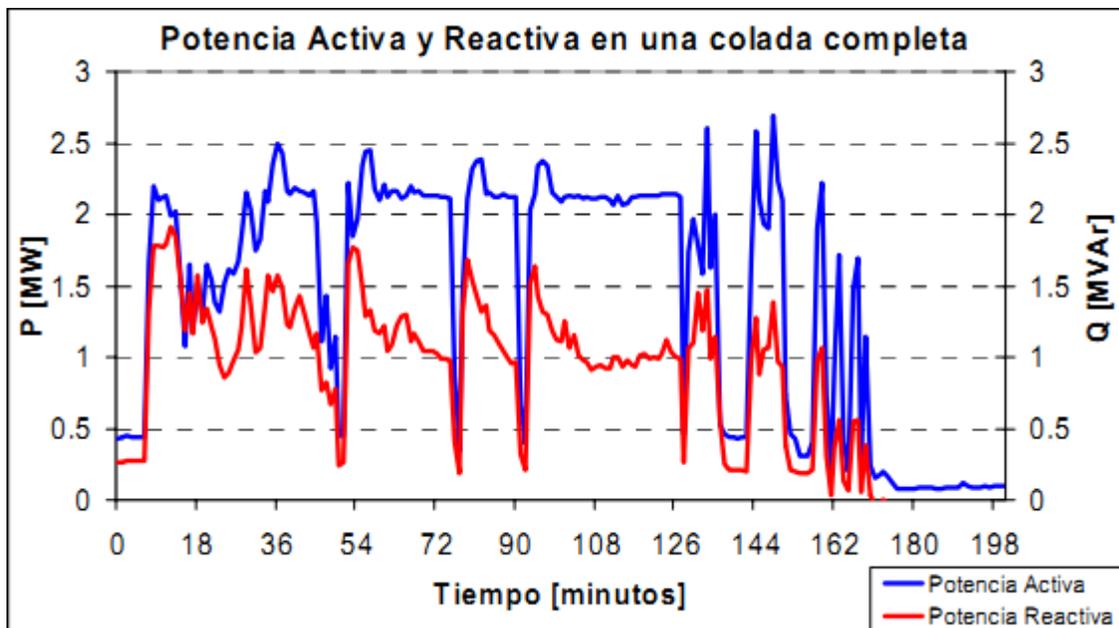
Pst → Índice de severidad del *Flicker* de corta duración.

$P_{0,1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$  → Niveles de efecto *Flicker* que se sobrepasan durante el 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 % y 50 % del tiempo total del período de observación.

### 2.2.1. Variación instantánea de potencia

Los hornos de arco eléctrico pueden resultar serias cargas perturbadoras en los sistemas eléctricos. La modulación de amplitud de la tensión de alimentación en nivel del orden del 0,3 % puede provocar problemas de parpadeo en las lámparas de filamento. Estas perturbaciones son particularmente molestas para los seres humanos cuando se encuentran en el rango de frecuencias entre 3 y 10 Hz.

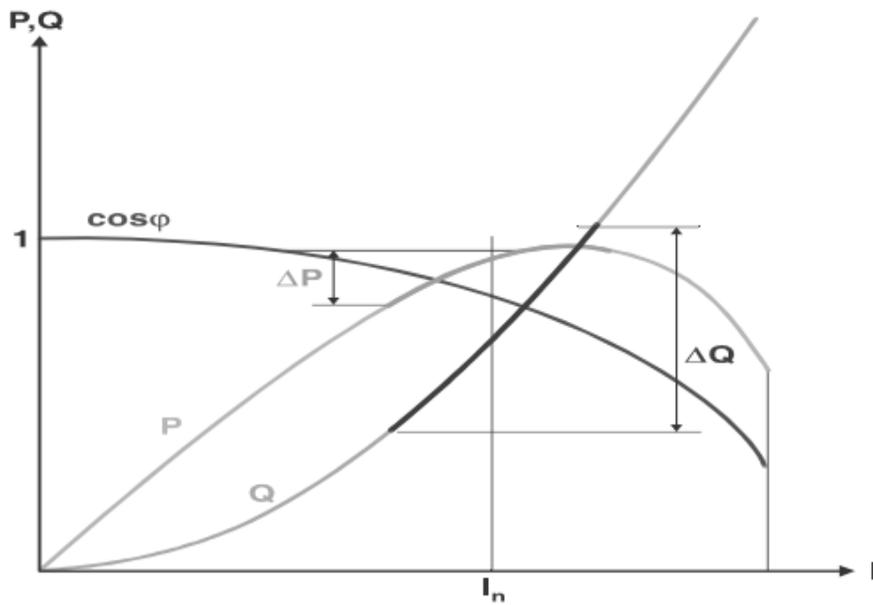
Figura 31. Variación de las potencias durante la colada completa



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 4.

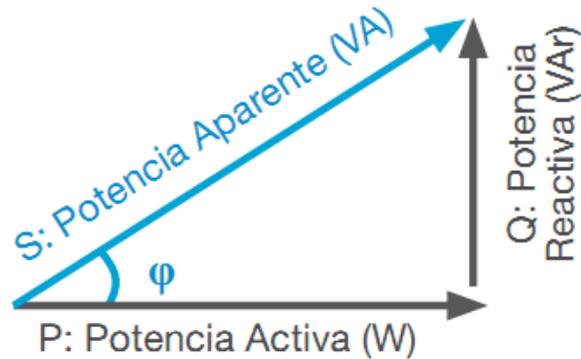
En la siguiente figura puede verse que cerca del intervalo de operación,  $\Delta Q$  es mucho mayor que el correspondiente  $\Delta P$ . Cuando la red de suministro no está diseñada para suministrar potencia reactiva con variaciones tan violentas, la tensión en la barra que alimenta al Horno de Arco Eléctrico tiene fuertes variaciones de tensión.

Figura 32. **Curva característica de un horno de arco eléctrico**



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 4.

Figura 33. **Triángulo de potencias**



$$P = S \cdot \cos(\varphi)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi)$$

donde  $S$  es:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \text{ en trifásica}$$

$$S = U \cdot I \text{ en monofásica}$$

donde  $S$  es:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \text{ en trifásica}$$

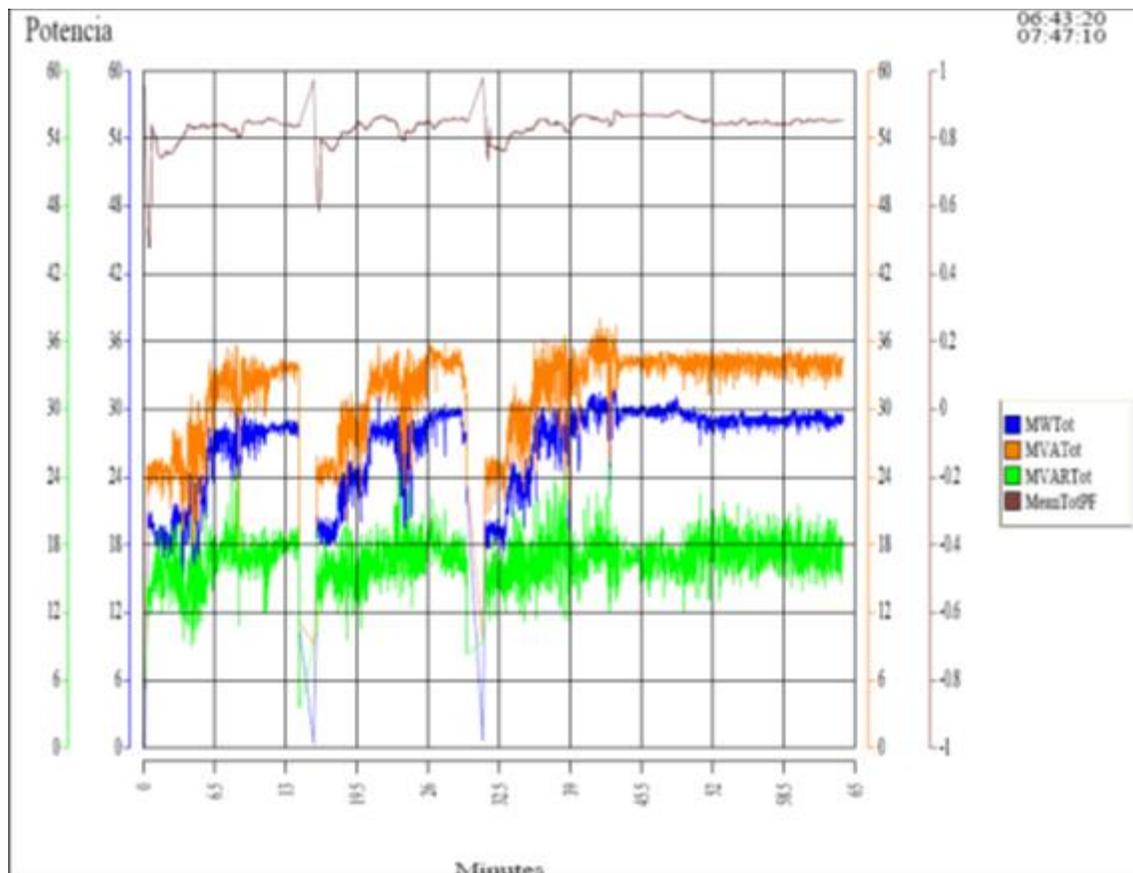
$$S = U \cdot I \text{ en monofásica}$$

Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 5.

### 2.3. **Variación instantánea de la potencia reactiva**

La potencia reactiva instantánea comprende todas las porciones de potencia en las fases que no contribuyen al flujo instantáneo de potencia activa. La idea de potencia reactiva proviene del análisis oscilante del sistema de potencia.

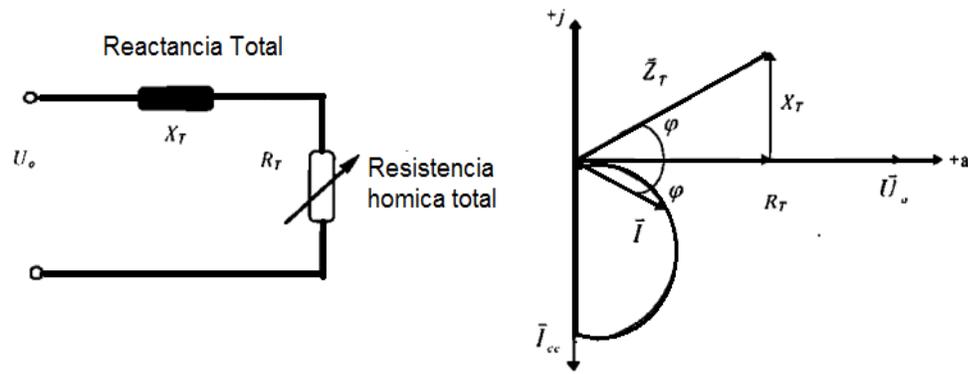
Figura 34. Variación instantánea de la potencia reactiva



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 6.

Las variaciones de la potencia reactiva, muy acentuadas en el inicio del proceso de fusión originan fluctuaciones de voltaje, que limitan el suministro de potencia reactiva al horno de arco eléctrico y a otras cargas que puedan estar conectadas a esa barra en específico, por lo cual es necesario la utilización del compensador estático de reactiva para compensar instantáneamente estos cambios bruscos de reactiva.

Figura 35. Circuito equivalente horno eléctrico y (b) diagrama fasorial



Fuente: Sawabe, Hiroshi. Horno de arco eléctrico-Curvas de potencia. p. 12.

$$Pot. reactiva = 3I^2 X_T$$

$$X_T = Z_T \text{Sen}\Theta$$

$$Z_T = R_T + jX_T$$

Para suministrar continuamente la potencia reactiva a un horno de arco eléctrico, la cual varía rápidamente, se necesitan equipos de compensación de reactivo igualmente rápidos. Mantener un factor de potencia elevado y estable en el punto de conexión común independientemente de las variaciones de la potencia reactiva de los hornos.

$$Q_m = VI_m = VI \text{sen}\varphi \quad \Rightarrow \quad \text{Potencia de Magnetización}$$

#### 2.4. Variación instantánea de potencia activa

Es la capacidad que tiene un equipo o artefacto eléctrico para desarrollar trabajo. A mayor potencia, el equipo estará en capacidad de desarrollar más trabajo. La potencia es, entonces, un dato característico de cada equipo.

La potencia activa representa en realidad la potencia útil medida en wattio (W), es decir, la energía que realmente se aprovecha cuando se pone a funcionar un equipo eléctrico y realiza un trabajo.

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i)$$

Fórmula de la potencia activa de un horno en respecto al tiempo de utilización.

Al momento en que el horno entra a funcionar esta potencia varía, ya que la producción del horno es directamente proporcional a la potencia activa requerida, y al no tener los filtros requeridos para evitar estas variaciones en donde se altera de manera significativa el incremento de la potencia aparente, respecto de la misma potencia activa, y así logrando que el factor de potencia se altera y esto conlleva una serie de problemas tanto para las instalaciones eléctricas como para la red de media tensión ya que se ve alterada la frecuencia, provocando multas a la misma.

La potencia consumida por el horno de arco eléctrico se registra en medidores de electricidad, que se instalan para medir el total de la energía eléctrica consumida en el período de tiempo determinado de cada colada.

$$P = VI_a = VI \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad \text{Potencia Activa}$$

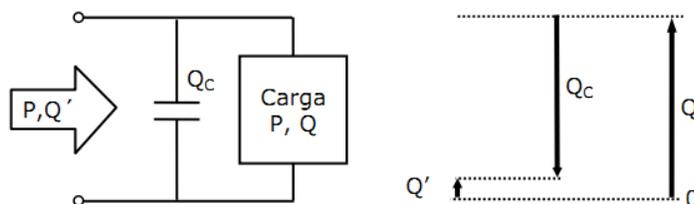
### 3. SISTEMAS DE ATENUACIÓN UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA NACIONAL, PARA ATENUAR LAS DISTORSIONES PROVOCADAS POR LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

#### 3.1. Compensador estático (SVC)

Uno de los grandes problemas en ingeniería eléctrica, resulta ser la necesidad de introducir, bajo determinadas circunstancias, en la red, elementos que controlen la potencia reactiva.

Una aplicación típica sería la corrección del factor de potencia de consumos, en la que se pone en paralelo con la carga un elemento que genere (o consuma) parte de la reactiva consumida (o generada) por la carga. De esta forma, el factor de potencia del conjunto formado por la carga más el elemento de compensación es mayor que el de la carga sola.

Figura 36. **Ejemplo de compensación con una batería fija de condensadores**



Fuente: Salonem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 136.

Las ventajas de la compensación son:

- Aumento de la capacidad de transporte y dimensionado adecuado de la instalación, debido a la disminución en el valor eficaz de la intensidad consumida por el conjunto carga más equipo de compensación.
- Reducción de pérdidas.
- Mantenimiento de la tensión, debido a la relación existente entre la reactiva y la tensión.

Habitualmente el factor de potencia se corrige poniendo en paralelo con la carga a compensar, generalmente inductiva, una batería de condensadores fija (como en la figura 1). No obstante, estos elementos no están exentos de inconvenientes, como por ejemplo:

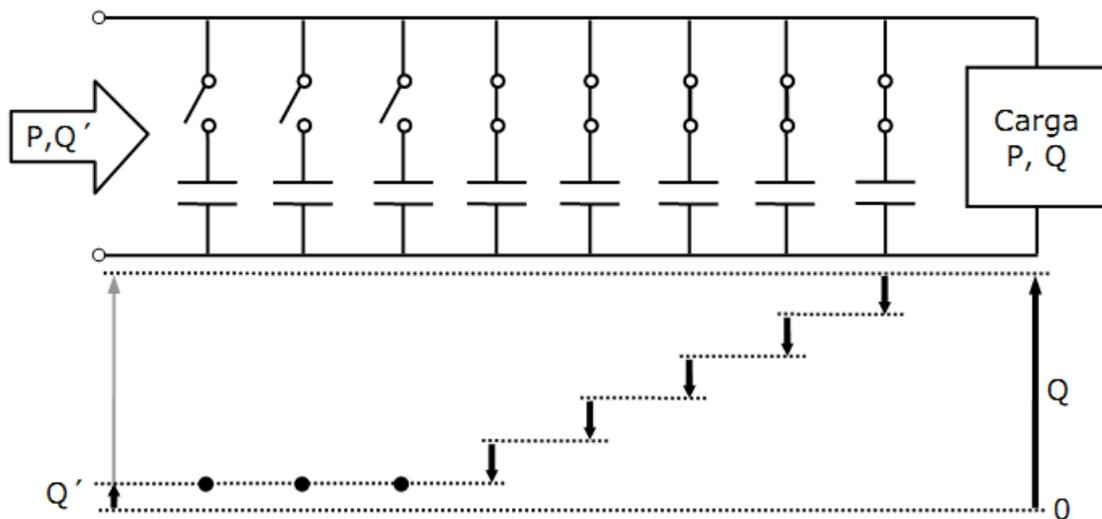
- La potencia reactiva depende de la tensión.
- Son elementos sensibles armónicos, ya que su impedancia disminuye con la frecuencia.
- Su inclusión en la red puede provocar resonancias con los elementos inductivos existentes en ella.
- Su envejecimiento afecta la potencia reactiva que son capaces de generar.
- Influyen en la estabilidad de las máquinas eléctricas presentes en la red.

Cuando se desea que la energía reactiva generada por los condensadores se adapte al posible comportamiento variable de la carga, es normal encontrar baterías de condensadores divididas en varios escalones de generación gobernados por elementos mecánicos como interruptores (ver figura 2).

Sin embargo, y a pesar de su sencillez, la división en los escalones tiene fundamentalmente los siguientes inconvenientes:

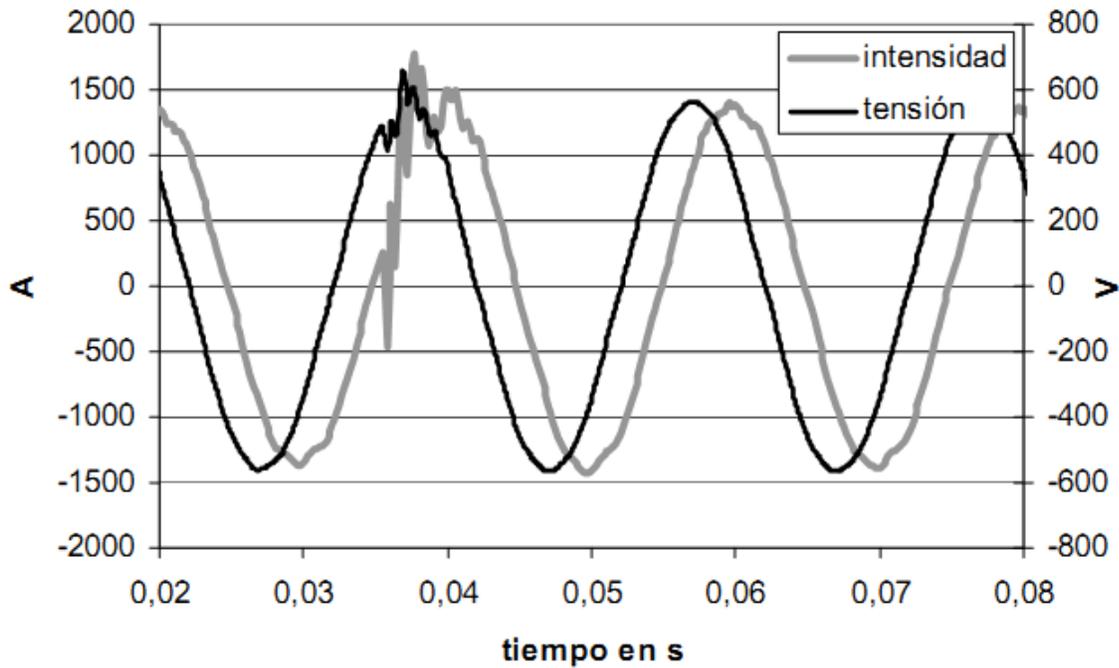
- La capacidad de adaptación al comportamiento de la carga depende del número de escalones disponibles, los cuales no suelen ser numerosos por razones tecnológicas y económicas.
- La corriente de conexión de una batería de condensadores puede alcanzar valores considerables. (ver figura 3).
- La utilización de elementos mecánicos para la conexión de las capacidades significa una limitación en cuanto a la velocidad de actuación y vida útil.

Figura 37. **Compensación de potencia reactiva mediante una batería automática de condensadores**



Fuente: Salonem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 139.

Figura 38. **Medida de la tensión e intensidad en el instante que se conecta un escalón de una batería de condensadores (salida TRAF0 1,5 MVA en carga)**



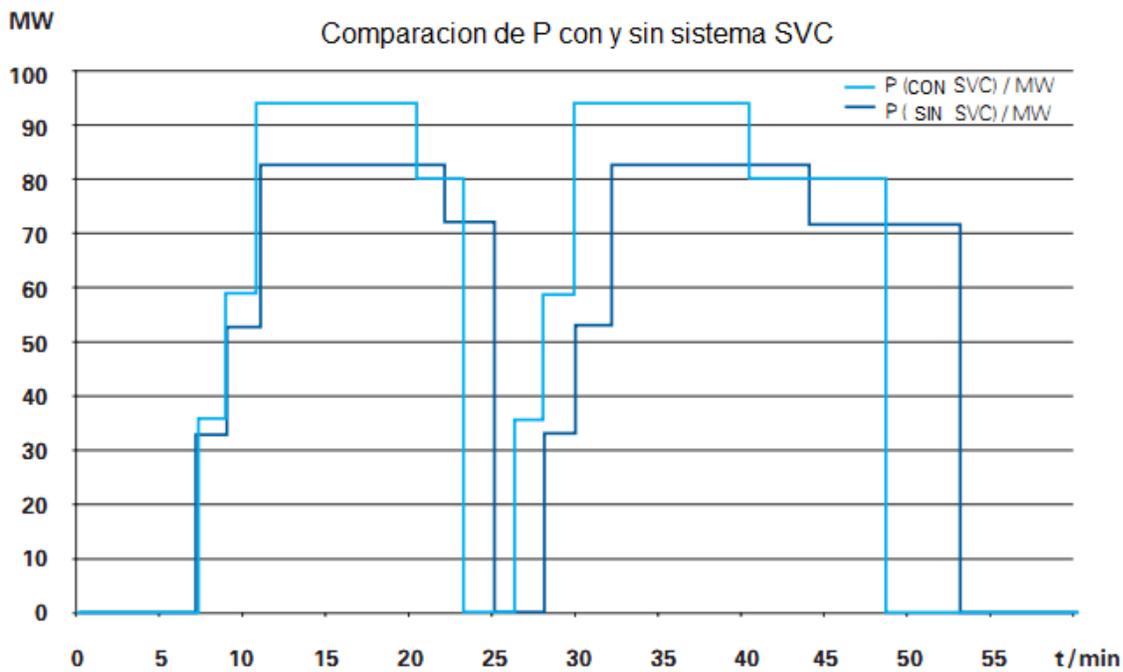
Fuente: Saloem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 152.

Un elemento que se ha venido aplicando para obtener una regulación continua de reactiva, tanto generada como consumida, es el condensador síncrono. Se trata de un motor síncrono funcionando en vacío, de forma que, si se actúa sobre su excitación, éste se comporta como una carga inductiva si está subexcitado, o como una carga capacitiva si está sobreexcitado. Las características del condensador síncrono son:

- La regulación de la potencia reactiva es muy fácil y progresiva, pudiendo compensar tanto cargas inductivas como capacitivas, tanto en régimen estático como transitorio.
- A pesar de su marcha en vacío, el compensador síncrono absorbe una potencia activa apreciable debido a las pérdidas mecánicas.
- Su instalación implica considerables gastos de montaje y mantenimiento.

Lo anteriormente expuesto sirve para poner de manifiesto que en las aplicaciones en las que hay una necesidad un consumo o generación variable de potencia, se utilizan equipos basados en elementos electromecánicos, lo que limita en gran medida su utilización. Esta situación cambia en el momento en el que se introduce la electrónica de potencia en el diseño de estos equipos, apareciendo así el concepto del compensador estático de potencia reactiva o *Static Var Compensator* (SVC) cuyo funcionamiento se basa en la utilización de tiristores conjuntamente con condensadores y bobinas.

Figura 39. **Muestra la influencia en poco tiempo respecto al incremento de la producción de acero. En el tiempo de la colada desciende desde los 53 minutos hasta los 48 minutos una vez el SVC esté instalado. Éste es el 9,4 % de reducción del tiempo de calentamiento respecto de la productividad**



Fuente: Saloem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 156.

### 3.1.1. Función y operación de los SVC en Sidegua

Dentro de las instalaciones de Sidegua, se encuentra instalado el SVC que se aplica en función de regular la potencia reactiva, de manera que éste disminuye los efectos que se podrían producir que afecten tanto los equipos internos como la red externa.

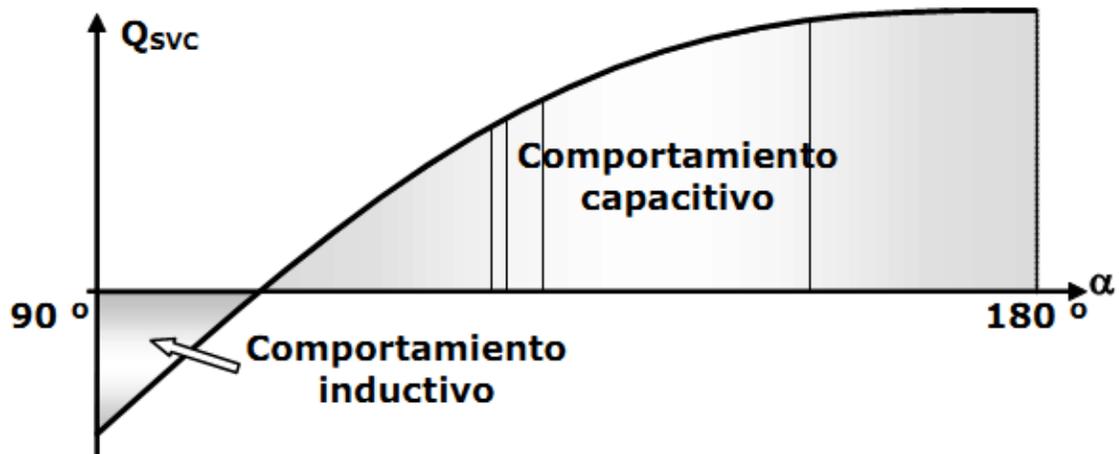
Dentro de las aplicaciones de los SVC se destacan:

- Control de la tensión para aumentar la calidad de suministro permitiendo, por ejemplo, mitigar la aparición de *Flicker* cuando se está el funcionamiento el horno de arco eléctrico.
- Desde el lado del transporte de energía eléctrica, se emplean para mejorar la estabilidad y la capacidad de transporte de las líneas de transmisión.
- El SVC se puede poner en paralelo con un determinado consumo cuyo comportamiento varía rápidamente para obtener un factor de potencia cercano a la unidad en todo instante.
- En el caso de consumos monofásicos variables en SVC se usa para equilibrar el consumo en cualquier régimen de funcionamiento.

TSR: Bobina conmutada por tiristores o *thyristor swichted reactor*.

TCR: Bobina controlada por tiristores o *thyristor controlled reactor*.

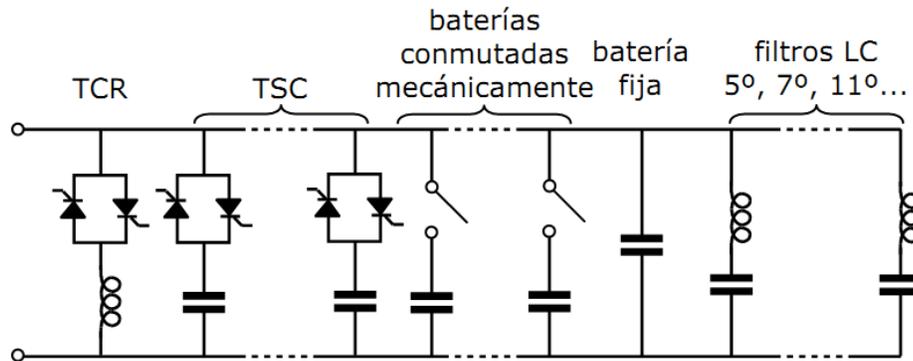
Figura 40. Evolución de la potencia reactiva generada por el TCR en función del ángulo de disparo ( $\alpha$ )



Fuente: Salonem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 223.

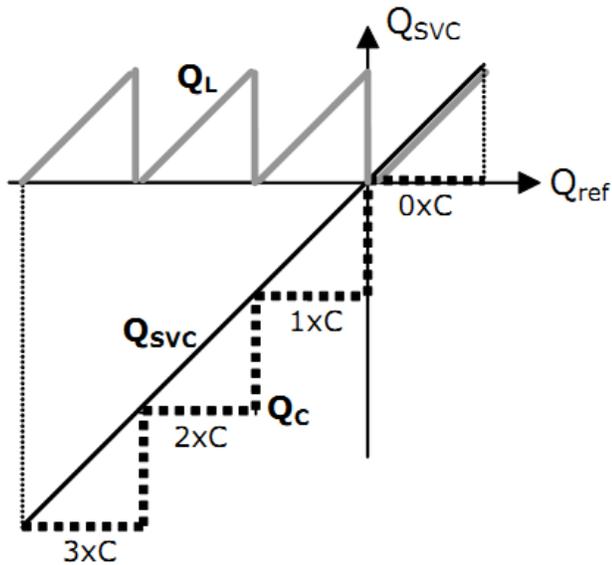
En general un SVC puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la figura 36. De esta forma, el SVC tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad del TCR y de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en baterías o filtros LC (ver figura 37).

Figura 41. **Composición por fase de un SVC**



Fuente: Salonem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 221.

Figura 42. **Evolución de la potencia reactiva generada por un SVC formado por TSC+TCR**



Fuente: Salonem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 227.

## Aplicaciones de los SVC en el horno de arco de Sidegua

- Control de la tensión para aumentar la calidad del suministro permitiendo, entre otras cosas, mitigar la aparición de *Flicker* cuando existen hornos de arco.
- Desde el lado del transporte de energía eléctrica se emplean para mejorar la estabilidad y la capacidad de transporte de las líneas de transmisión.
- El SVC se puede poner en paralelo con un determinado consumo cuyo comportamiento varíe rápidamente, para obtener un factor de potencia cercano a la unidad en todo instante.
- En el caso de consumo monofásicos variables, como el caso de la tracción en trenes eléctricos, el SVC se usa para equilibrar el consumo, en cualquier régimen de funcionamiento.
- Corrección del factor de potencia.
- En el caso de Sidegua el compensador estático de reactiva incluye dos filtros de armónicas, que son las más representativas en el sistema del horno, las cuales son la tercera y la segunda.

### **3.1.1.1. Bancos de capacitores**

Dependiendo del punto de conexión a la red eléctrica y de la reglamentación vigente puede ser necesario mantener niveles de coseno fi ( $\Theta$  del factor de potencia) superiores a 0,85, 0,92, 0,95 o, hasta 0,98, en períodos

de medición mensuales u horarios. Como el horno, al menos durante el período de fusión, opera con cosenos  $\text{fi}$  inferior a los límites, se hace necesario compensar la energía reactiva para elevar el coseno  $\text{fi}$  en el punto de conexión con la empresa suministradora de energía.

La forma más simple y económica de compensar los reactivos es la instalación de bancos de capacitores fijos. El cálculo de la potencia de los capacitores es bastante simple cuando el coseno  $\text{fi}$  de operación es conocido.

Al proyectar los bancos de capacitores hay que tomar la precaución de verificar la frecuencia de resonancia paralelo de los capacitores con la red, incluyendo el transformador rebajador y, en el caso de ocurrir una resonancia en alguna de las principales frecuencias armónicas generadas por el horno (2a, 3a, 4a, e 5a), debe ser modificada la potencia del banco para desplazar la frecuencia de resonancia.

Después de definida la potencia efectiva y la reactancia del banco, deben ser calculadas las tensiones de servicio permanente y los aumentos de tensión provocados por las armónicas generadas por el horno para poder definir la tensión nominal y la potencia nominal del banco.

Por otro lado, la corrección del factor de potencia utilizando bancos de capacitores es una práctica comúnmente aplicada en los sistemas eléctricos industriales, para la compensación de la potencia reactiva y la regulación del voltaje, obteniéndose de ella beneficios en la reducción de los costos por facturación de la energía eléctrica y en un mejor aprovechamiento de la capacidad instalada de los equipos.

Cuando hay una presencia importante de armónicos en el sistema eléctrico y se instalan bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia, hay que considerar que la reactancia de los capacitores pasa a conformar un circuito resonante con la reactancia del sistema, y que si una de las frecuencias de resonancia de este circuito coincide con la frecuencia de una de las corrientes armónicas presentes en la red, sobre voltajes y sobre corrientes importantes podrían producirse en el sistema y generar severos daños a los equipos.

Otro aspecto a considerar al instalar capacitores es el de las sobretensiones transitorias en el switcheo de estos equipos, principalmente cuando hay otros capacitores previamente instalados en el sistema, ya que pueden darse condiciones de sobre voltajes peligrosos, incluso para los capacitores ya existentes.

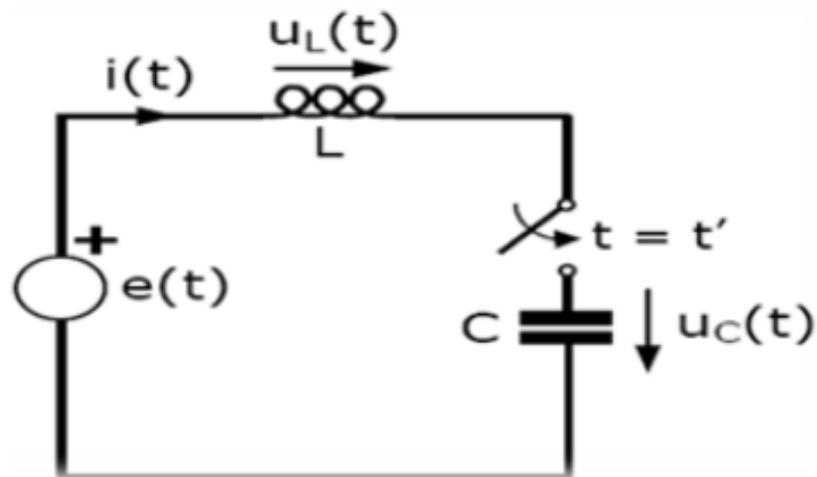
Es por eso que cuando se planifica la instalación de capacitores para corregir el factor de potencia en un sistema eléctrico, es recomendable efectuar conjuntamente un análisis de armónicos y un estudio de transitorios electromagnéticos, para determinar la respuesta del sistema a la frecuencia, y simular las maniobras de energización y desenergización de los capacitores. De encontrarse problemas de resonancia o de sobretensiones transitorias, se deberán evaluar alternativas de solución, incluyendo la aplicación de reactores con los capacitores o filtros de armónicos.

- Principio de funcionamiento de los TSC

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

Para estudiar en detalle el transitorio de conexión del condensador C cuando éste está en serie con una bobina ideal L, se emplea el circuito de la Ilustración que sigue, donde se considera un comportamiento ideal para el interruptor estático.

Figura 43. **Esquema equivalente de un TSC**

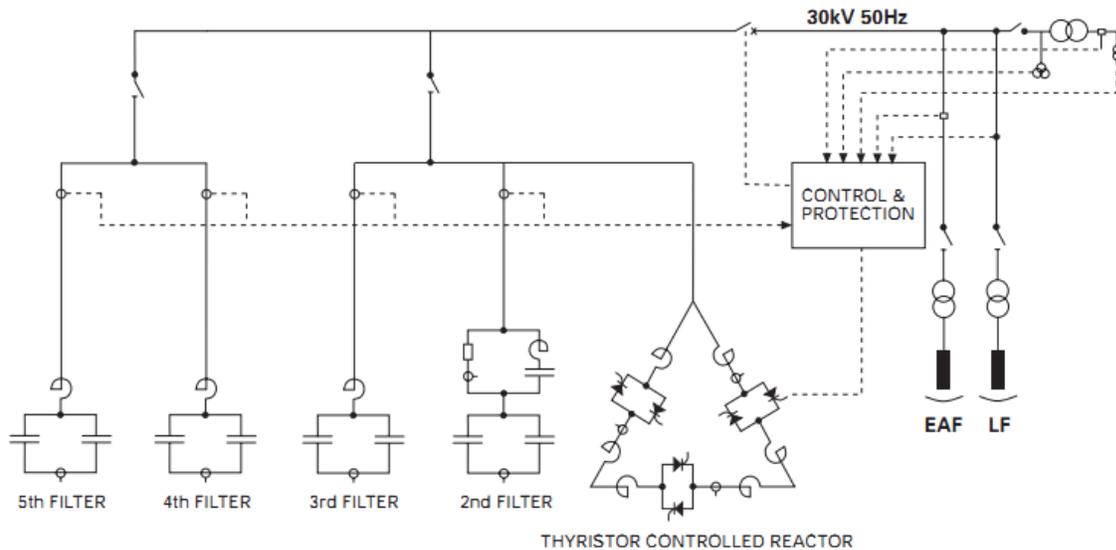


Fuente: Salonem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 97.

En la figura 43 se muestra un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en anti paralelo. De forma que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero.

En serie con el condensador es habitual encontrar una bobina (L), ya sea para limitar la derivada de la intensidad  $di(t)/dt$  y así proteger a los tiristores, o bien, para crear un filtro sintonizado a una determinada frecuencia.

Figura 44. Lugar de instalación de banco de tiristores idealmente



Fuente: Salnem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 98.

### 3.2. Reactor en serie

El SSSC (Static Synchronous Series Compensator) es uno de los controladores FACTS más importantes. Éste permite la inyección de un voltaje serie en cuadratura con la corriente de línea e independientemente de ésta. Su propósito es aumentar o disminuir la caída de voltaje reactiva de la línea y controlar así la potencia transferida.

Este equipo puede incluir dispositivos de almacenamiento o absorción de energía para mejorar el desempeño dinámico del sistema de potencia por medio de la compensación adicional de potencia activa temporal, incrementando o disminuyendo temporalmente la caída de voltaje resistiva de la línea.

Puede estar basado en convertidores de voltaje o de corriente pero su conexión estando en serie con la línea. Los voltajes inyectados serán relativamente pequeños comparados con el voltaje de la línea y el aislamiento a tierra deberá ser bastante elevado.

Éste es un compensador que a diferencia de los demás dispositivos FACTS para compensación serie, esta configuración no utiliza dispositivos de conmutación para controlar la circulación de corriente del elemento de compensación (condensador, reactor). La inyección de tensión en cuadratura se obtiene con un condensador en corriente continua, conectado a la línea de transmisión por medio de un convertidor con una fuente de tensión y un transformador en serie.

El grado de compensación se controla modificando la tensión de salida del convertidor, pudiendo incluso invertirse la fase, obteniéndose así la compensación inductiva. El sistema de control requiere muestreos de corriente y de voltaje que se obtienen de transformadores de medida que se indican en la figura de más abajo, como TC y TP.

#### Características del reactor en serie

#### Aplicación del reactor en serie en Sidegua:

- Según se observa en la figura 4 (diagrama unifilar simplificado), el reactor instalado en Sidegua se encuentra conectado en serie con el transformador que alimenta el horno de arco eléctrico, este reactor no es más que un sistema trifásico de bobinas sumergidas en aceite dieléctrico con variador de tap bajo carga con 16 pasos, el cual es gobernado por

un software que controla toda la operación eléctrica del proceso de fusión y afino del horno.

#### Funciones del reactor

- Limita en forma efectiva la corriente de cortocircuito a valores preestablecidos y mejora la respuesta a fenómenos transitorios, de modo de proteger los equipos conectados.
- Atenúa las variaciones bruscas de grandes corrientes producidas por el arco eléctrico del horno.
- Permite el control del factor de potencia, con lo cual se logra mejorar la eficiencia del proceso, además ayuda a proporcionar estabilidad al arco en los momentos de mayor erraticidad, como lo es el proceso de fusión durante el cual se requiere un factor de potencia relativamente bajo, el cual puede ir en aumento, al iniciar el proceso de afino el cual es más estable.
- Compensa la energía capacitiva de las líneas.

### **3.3. Filtros armónicos**

Los problemas de distorsión armónica son cada vez más comunes e irónicamente, su causa se puede atribuir a la revolución de la electrónica.

Los modernos elementos electrónicos principalmente las de control de potencia ofrecen muchas ventajas sobre los métodos de control convencionales y son ampliamente usados en procesos industriales. Su mayor desventaja sin embargo es que también generan armónicos.

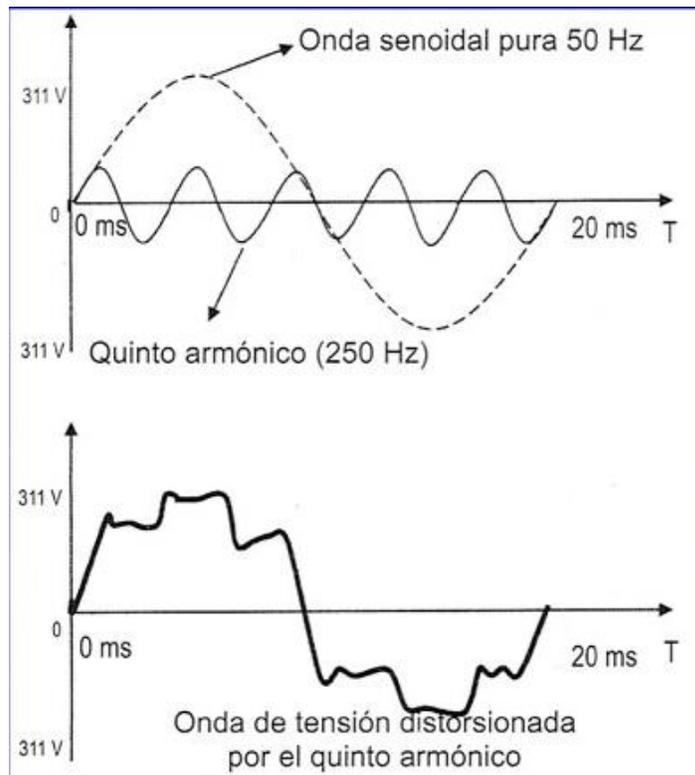
Los principales problemas que aparecen en el sistema son los generados por los armónicos de orden 3º, 5º, 7º, 11º y 13º.

Las corrientes armónicas de alta frecuencia a menudo causan problemas inesperados. Se producen altas pérdidas en transformadores, cables y otros componentes.

Sistemas de control, protección y medida no funcionan de la forma en que deberían. Las telecomunicaciones y las redes de datos están sujetas a interferencias y distorsiones, es por eso que con el filtrado de armónicos se consigue que la potencia eléctrica sea más eficiente.

Cuando la red contiene condensadores para la corrección del factor de potencia pueden aparecer problemas. Los condensadores y la inductancia de la red pueden formar un circuito resonante en paralelo a la frecuencia armónica, amplificando los armónicos de forma que la tensión se hace inadecuada para la mayoría de las aplicaciones.

Figura 45. **Gráfica de onda senoidal y distorsionada por el armónico**

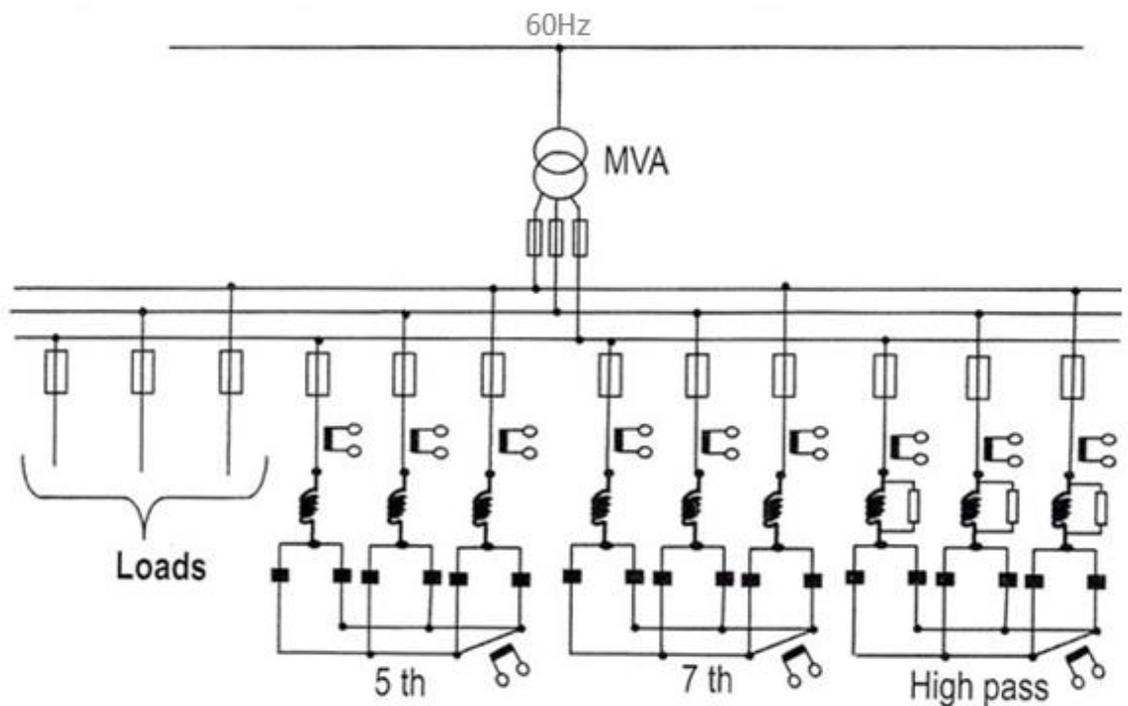


Fuente: Mazon Zamora, A.J.; Saenz, Sagastabeitia J.R. Proyecto de diseño de un equipo limitador de distorsión armónica producida por una acería. p. 24.

Mantienen la distorsión dentro de los límites permitidos: los filtros armónicos son la mejor solución a los problemas de distorsión. Compuesto por condensadores, reactancias y resistencias, los circuitos de filtro proveen una baja impedancia para los armónicos. La distorsión se reduce a los niveles requeridos, filtros de sintonía simple, doble y de paso alto están disponibles. El filtro actúa a la frecuencia fundamental sean éstas 50 o 60 Hz, como un condensador y produce potencia reactiva, funcionando de la misma forma que una batería de condensadores convencional.

Para obtener buenos resultados, condensador y reactancia deben ser diseñados conjuntamente. Existen ya hoy día, empresas que se dedican exclusivamente a la fabricación de filtros e incluso fabricando sus propios condensadores como sus reactancias, utilizando componentes normalizados, de tal manera que el filtro montado funcione sin ningún problema.

Figura 46. **Filtros del quinto y séptimo armónico, además de un pasa alto**



Fuente: Mazon Zamora, A.J.; Saenz, Sagastabeitia J.R. Proyecto de diseño de un equipo limitador de distorsión armónica producida por una acería. p. 29.

Para obtener un filtrado efectivo, se requiere de un gran conocimiento sobre transmisión y distribución de potencia. Durante muchos años los profesionales dedicados a estos menesteres ya cuentan con suficiente experiencia, como para solucionar este inconveniente. Es decir que cuando se

produzcan anomalías sin aparente razón en su sistema, se debe contactar con profesionales dedicados a los cálculos, fabricación y montaje de los filtros contra los armónicos.

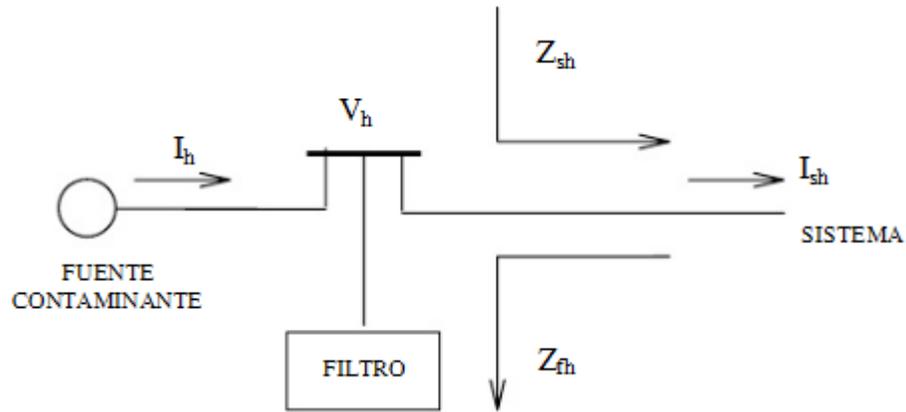
Es importante resaltar que cada filtro deberá estar diseñado, para cada caso que se presente, en otras palabras los filtros contra los armónicos se deberán fabricar a medida.

Los filtros armónicos se usan en casos donde se requiere potencia reactiva, pero donde el uso de baterías de condensadores convencionales amplificaría la distorsión existente a niveles excesivos.

En una aplicación práctica típica como la que se indica en el esquema de abajo, los filtros fueron diseñados a medida por una empresa, el cual fue la mejor solución a los problemas de potencia reactiva y distorsión en una papelería. En el sistema mencionado, varios rectificadores de 6 pulsos (en total 10,5 MW) fueron conectados a un sistema de barras de 11 KV alimentado por un transformador de 31,5 MVA. Tres filtros (dos de sintonía simple para los armónicos 5o y 7o y más uno de paso alto para los armónicos de orden más elevado) fueron conectados a las barras.

Juntos los filtros produjeron una potencia reactiva total de 13 MVA<sub>r</sub>, a la vez que los armónicos entrando al sistema se redujeron en un 70 %. Este problema no se podría haber resuelto usando solo baterías de condensadores, porque la resonancia en paralelo resultante habría amplificado los armónicos e incrementado el problema de la distorsión.

Figura 47. **Mecanismos de acción de filtros**



Fuente: Mazon Zamora, A.J.; Saenz, Sagastabeitia J.R. Proyecto de diseño de un equipo limitador de distorsión armónica producida por una acería. p. 30.

La necesidad de filtros de armónicas depende básicamente de la obligatoriedad de cumplir normas más o menos exigentes sobre distorsión de tensión. De un punto de vista práctico, es posible, en gran parte de los casos, instalar los bancos de capacitores sin filtros, desde que se tome la precaución de desplazar la frecuencia de resonancia paralelo de las principales frecuencias armónicas. La necesidad de instalar filtros de armónicas es inevitable cuando existen compensadores estáticos (SVC), ya que estos al poseer dispositivos de estado sólido controlados por la variación del ángulo de disparo provocan elevados niveles de armónicas.

$$I_{sh} = I_h \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}}$$

$$V_h = I_h \frac{Z_{fh} Z_{sh}}{Z_{fh} + Z_{sh}}$$

- Los filtros presentan un camino de menor impedancia que la red, para la frecuencia de la armónica que se desea eliminar.
- De este modo la corriente armónica se va por el filtro preferentemente y la impedancia total equivalente del sistema a esa frecuencia determinada es menor.
- Como la corriente armónica produce una caída de tensión menor en la impedancia de la red, ello significa que la distorsión de tensión disminuye.

Figura 48. **Filtro de 3a armónica instalado en Sidegua**



Fuente: Planta Sidegua, filtros de armónicos.

### 3.3.1. Tipos de filtros

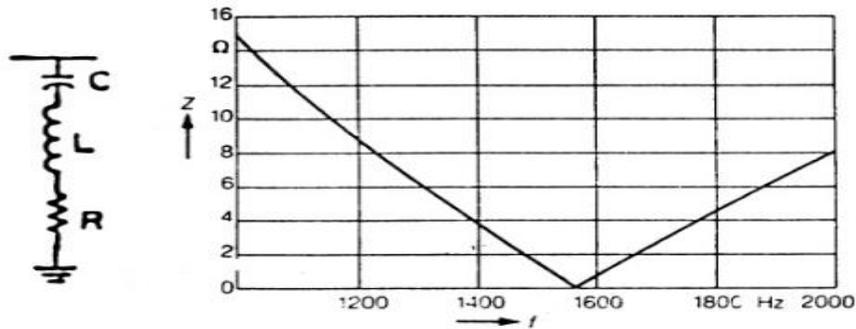
#### a) Filtro sintonizado simple

Éste es el filtro más simple y consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor. Ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar.

#### Características generales

- Se usan para eliminar una armónica determinada.
- Se llama frecuencia de sintonía a la frecuencia de resonancia del filtro.
- El filtro se sintoniza a aquella frecuencia que se desea eliminar.
- A la frecuencia de sintonía (resonancia) la impedancia del filtro es mínima.
- El factor de calidad del filtro  $Q_0 = X_0/R$  es alto [30 - 60] y hace que la característica de impedancia sea más o menos estrecha o abrupta.
- Es utilizado en instalaciones con rectificadores, inversores PWM y hornos de arco en casos específicos.

Figura 49. **Gráfica de un filtro simple**

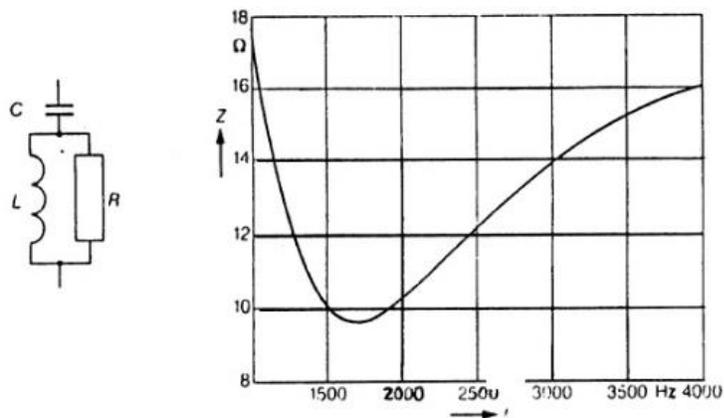


Fuente: Saloem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 12.

b) Filtro pasa alto de primer orden

De los filtros de característica amortiguada es el más común. La conexión de una resistencia en paralelo con el inductor le da un comportamiento amortiguado para un amplio rango de frecuencias.

Figura 50. **Gráfica de un filtro pasa alto**



Fuente: Saloem, Juka. Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva. p. 12.

## Características generales

- Se usan para eliminar un amplio rango de armónicas.
- Se emplean cuando las armónicas no tienen una frecuencia fija, lo que sucede comúnmente en los ciclo conversores u hornos de arco.
- Estos filtros también tienen una frecuencia de sintonía.
- Presentan una alta impedancia para frecuencia bajo la sintonía y una baja impedancia para frecuencias superiores a la de sintonía.
- En estos filtros el factor Q es bajo y se define como  $Q = R/X_o$ .

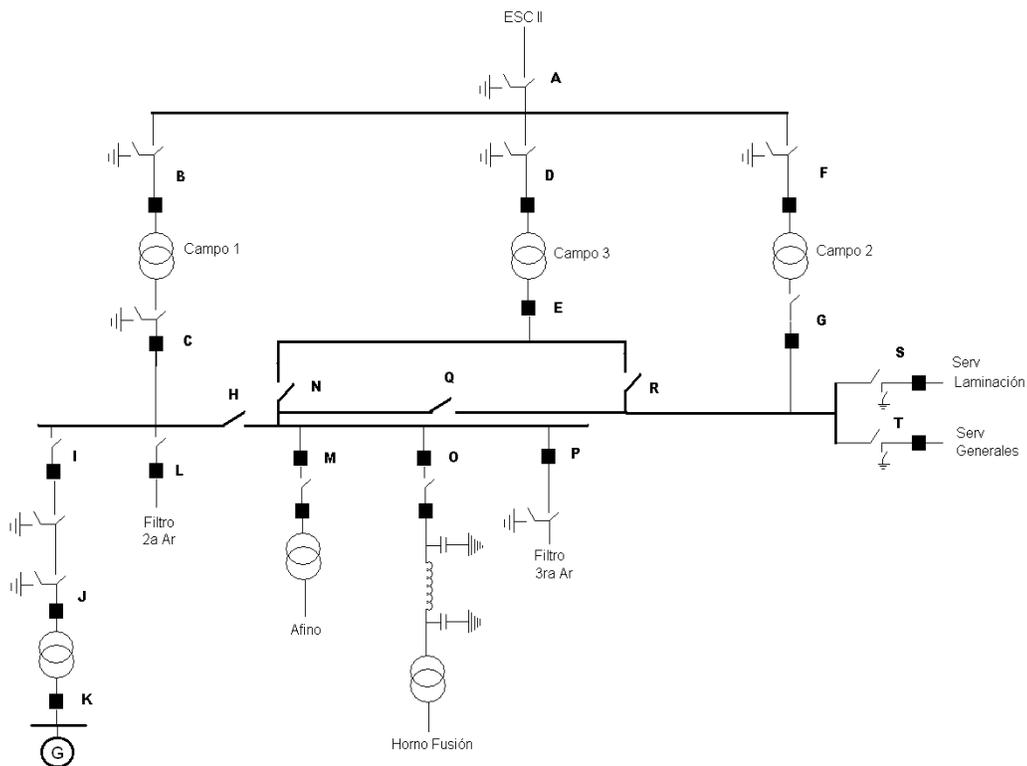


## 4. RESULTADOS DE MEDICIONES REALIZADAS EN LA PLANTA DE SIDEGUA

### 4.1. Diagrama unifilar simplificado

Se muestra un diagrama reducido de los elementos eléctricos que componen el proceso de acero al carbón en la planta.

Figura 51. Unifilar simplificado de la planta Sidegua



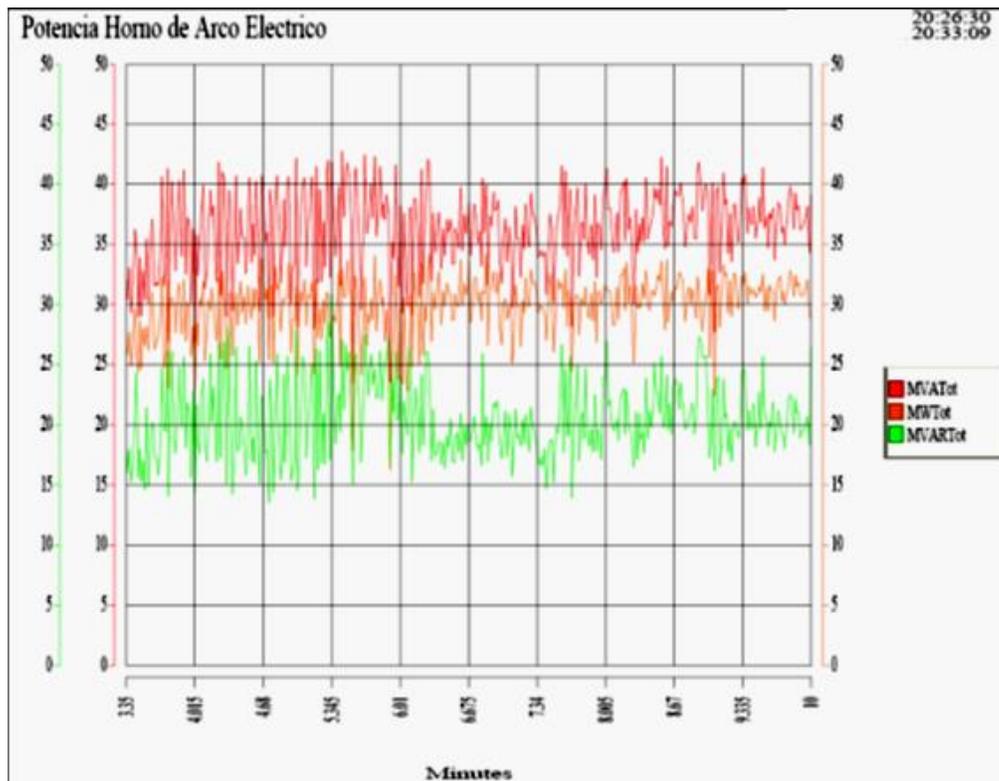
Fuente: Esquema unifilar Sidegua, 2012.

**4.2. Resultados de mediciones en la planta de acero de Sidegua en un punto cercano al horno de arco eléctrico (punto o), no afectadas directamente por el compensador estático de reactiva y filtros de armónicas**

**4.2.1. Gráfica de potencia**

Comparación en un punto cercano al horno de las potencias en un determinado tiempo.

Figura 52. **Gráfica potencia en un punto cercano al horno sin filtros**

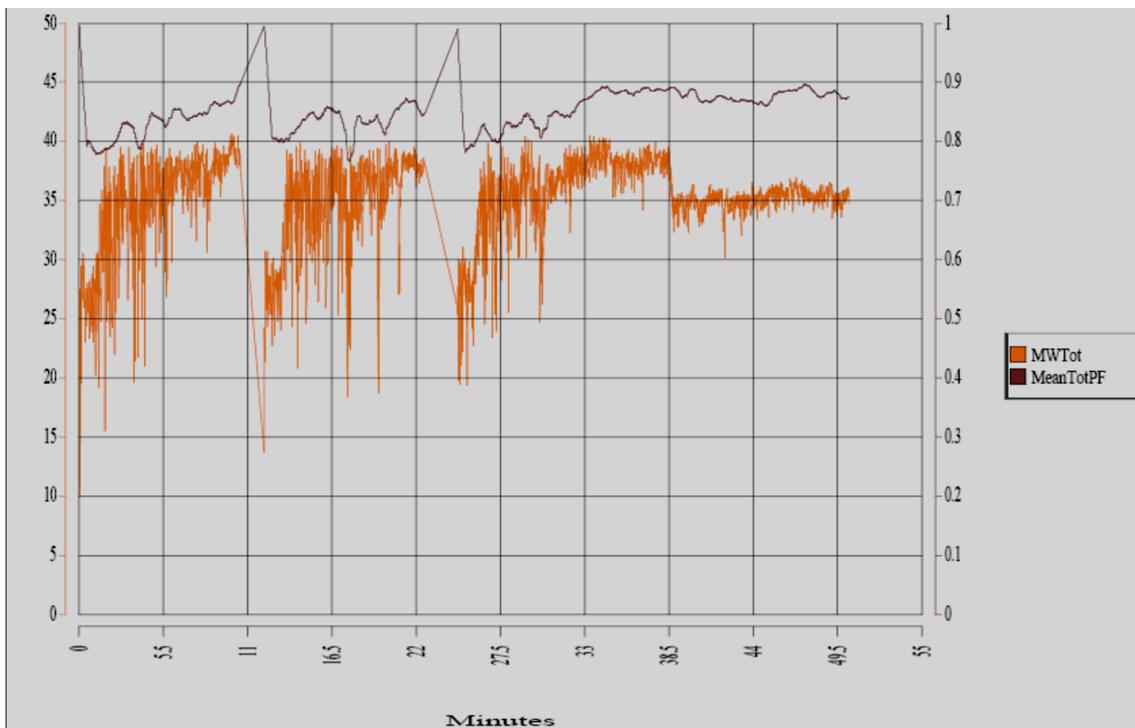


Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.2.2. Factor de potencia

Relación del factor de potencia a lo largo de una colada en un punto cercano al horno.

Figura 53. **Gráfica del factor de potencia en un punto cercano al horno**

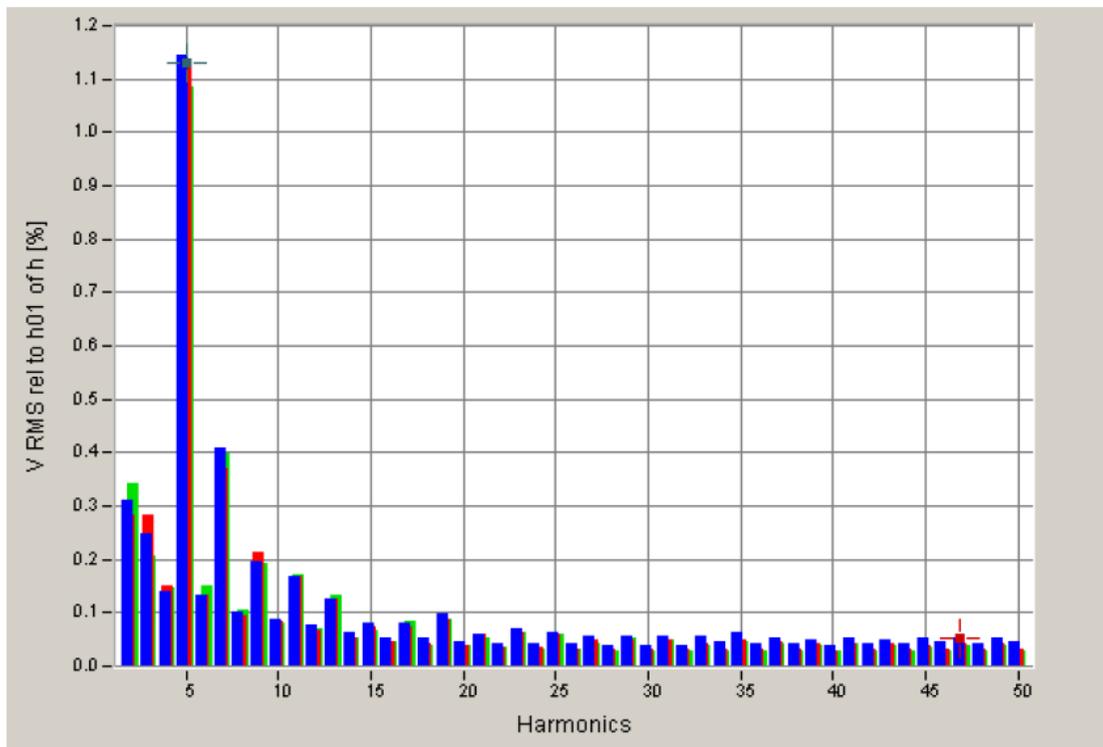


Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

### 4.2.3. Comportamiento de armónicas

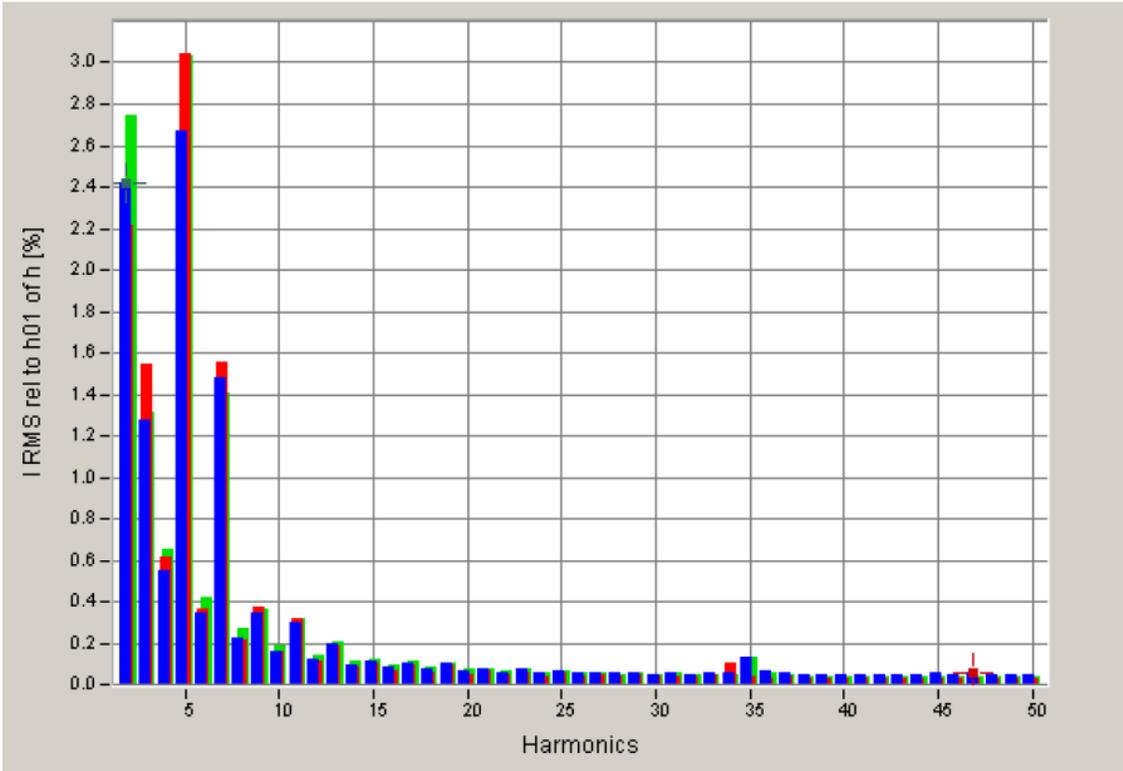
Gráfica de armónicas de tensión medidas en la subestación de línea 22,8 kV (atenuadas por el SVC).

Figura 54. Gráfica armónicas atenuadas por el SVC en línea 22,8 kV



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 55. **Gráfica de armónicas de corriente medidas en línea de 22,8 kV**

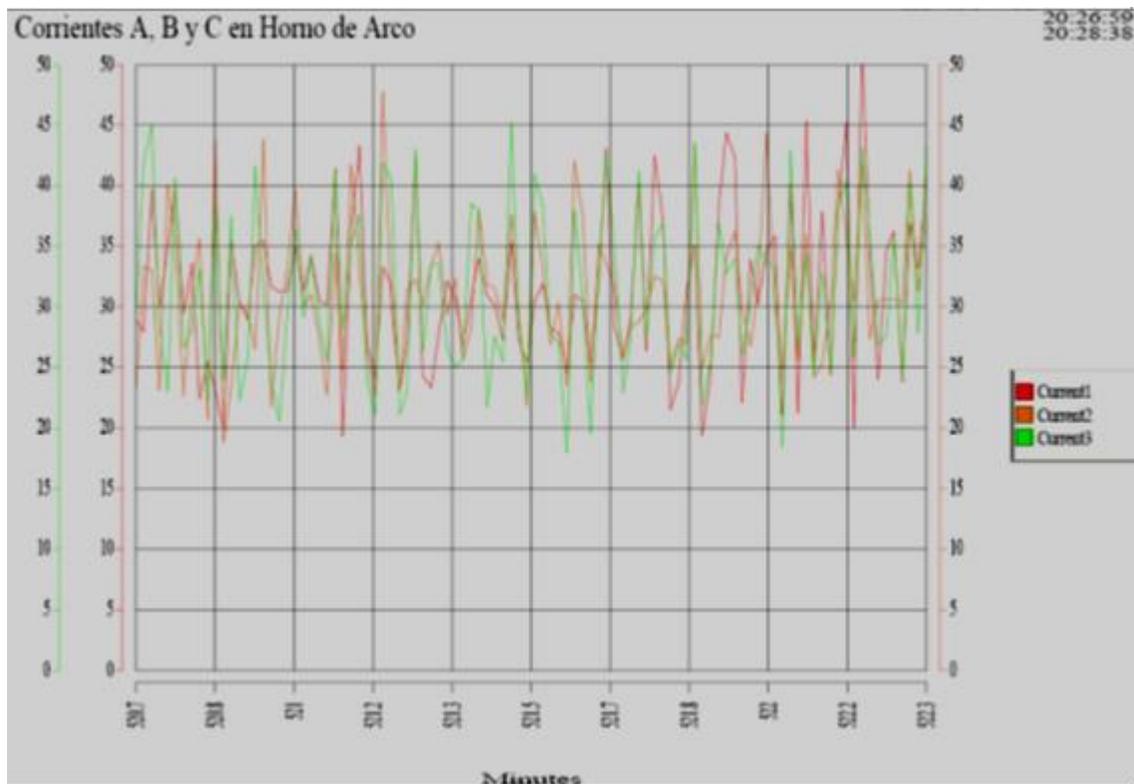


Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.2.4. Balance de corrientes A, B y C en un punto cercano al horno de arco

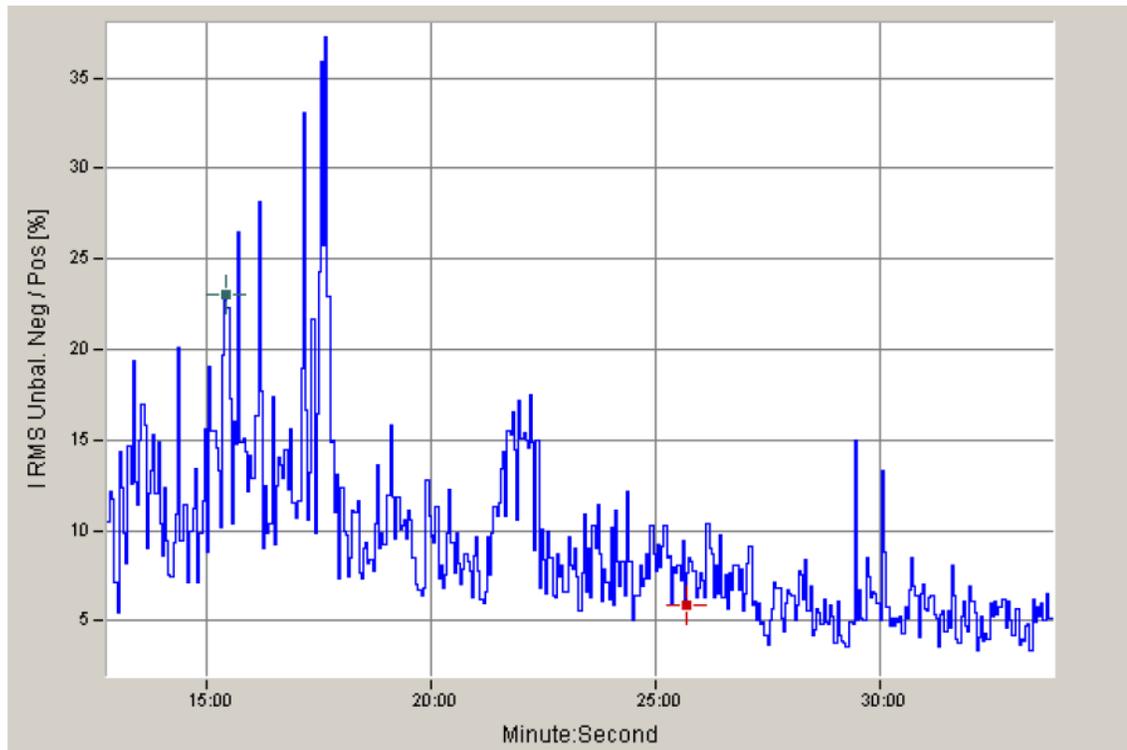
Gráficas de muestras de desbalances entre fases de líneas que alimentan el horno.

Figura 56. Gráfica corrientes de fases en punto cercano al horno



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 57. **Gráfica desbalance de corriente en línea 22,8 kV**



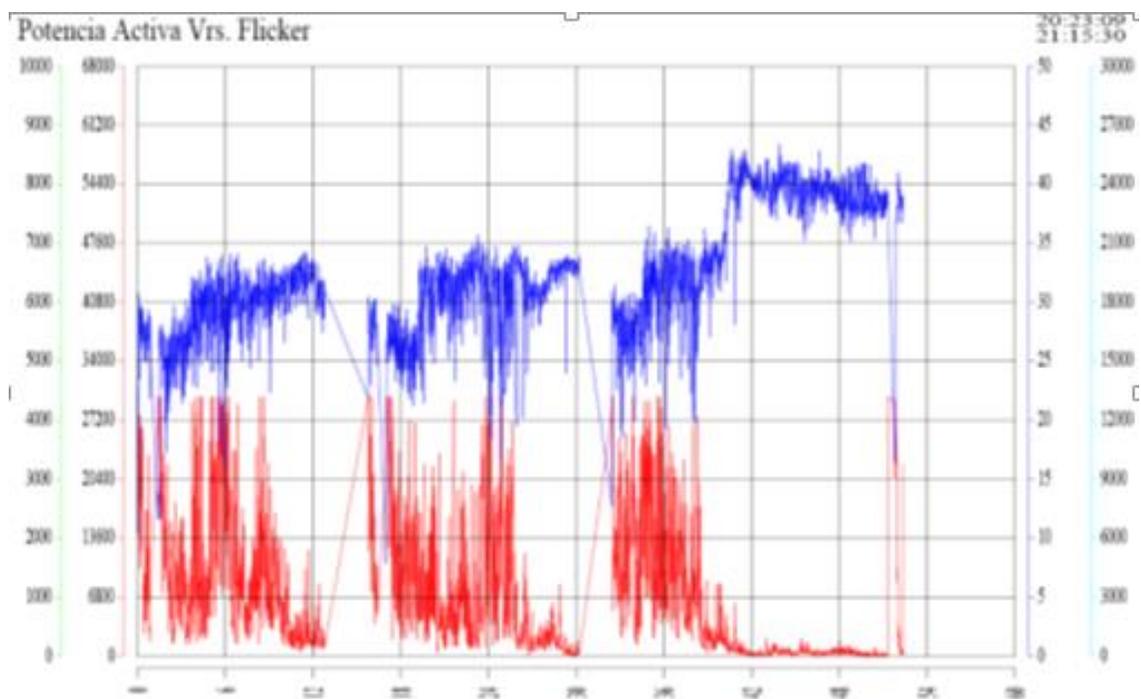
Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Desbalance de corriente en % medido en la línea de 22,8 kV.

#### 4.2.5. *Flicker* versus potencia activa en una colada

Medición en un punto cercano al horno donde se muestra que las variaciones de potencia afectadas por el *Flicker* de la colada.

Figura 58. **Gráfica potencia activa versus *Flicker***



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

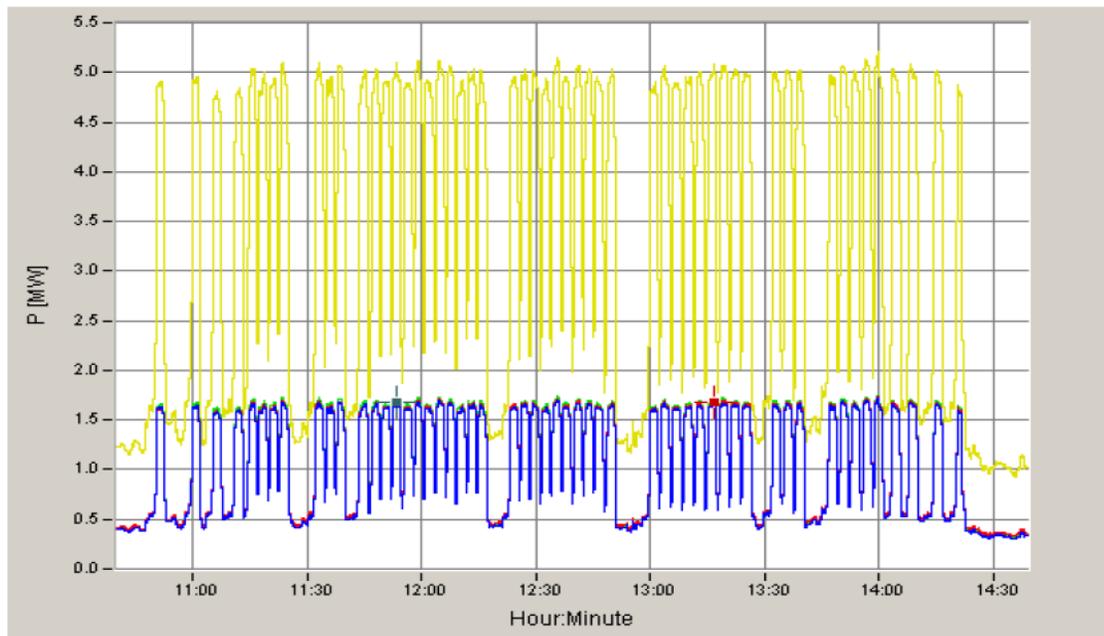
### 4.3. Mediciones realizadas en línea de 22,8 kV desde la subestación principal

Esta gráfica muestra las variables eléctricas medidas desde la subestación principal de la planta.

#### 4.3.1. Mediciones realizadas en nodo de 22,8 kV en la planta de laminación (punto S)

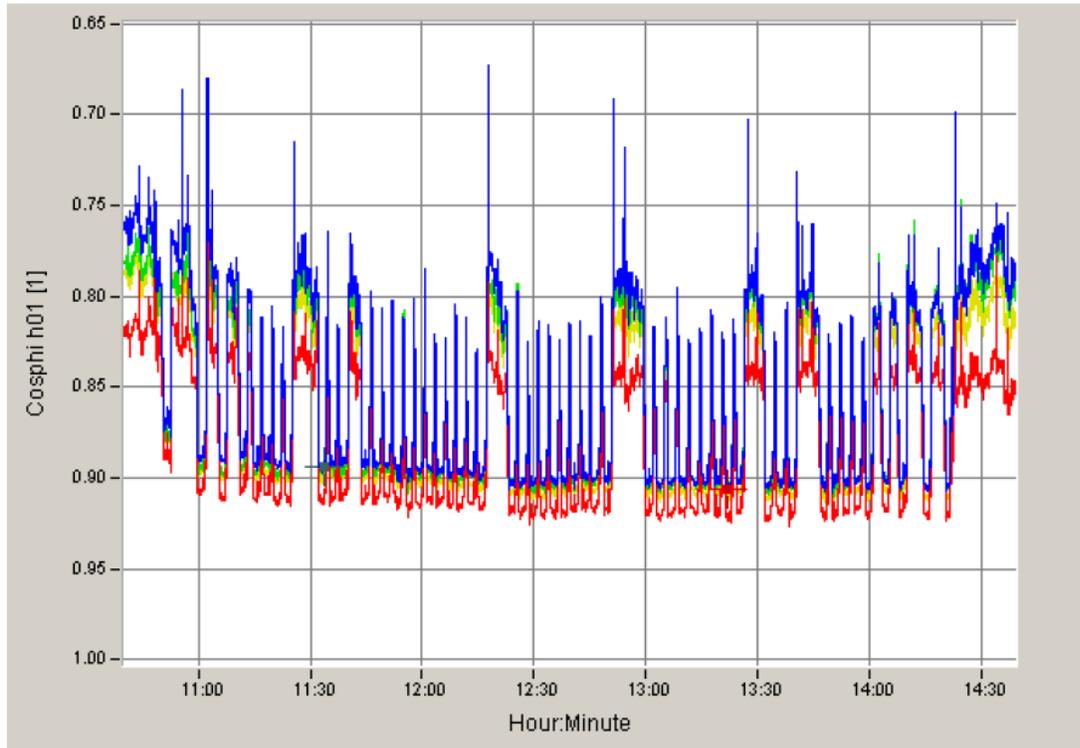
Medición realizada en el punto de laminación de la potencia activa.

Figura 59. Potencia activa y reactiva, planta de laminación



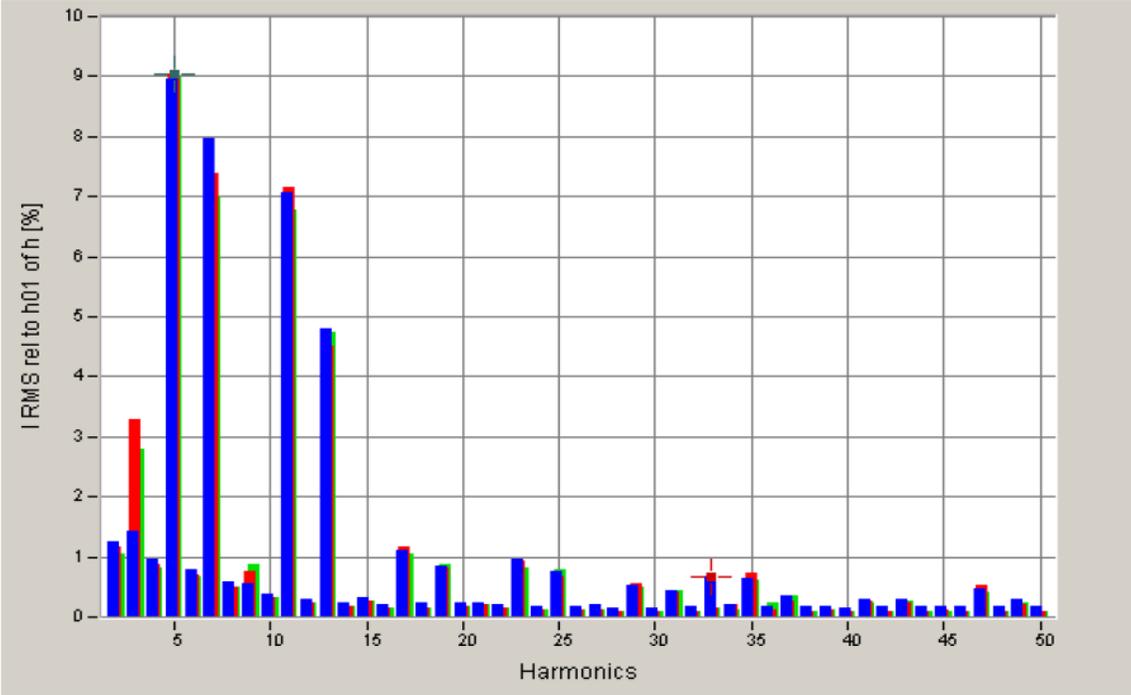
Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 60. **Factor de potencia planta laminación**



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 61. Armónicas de voltaje planta laminación

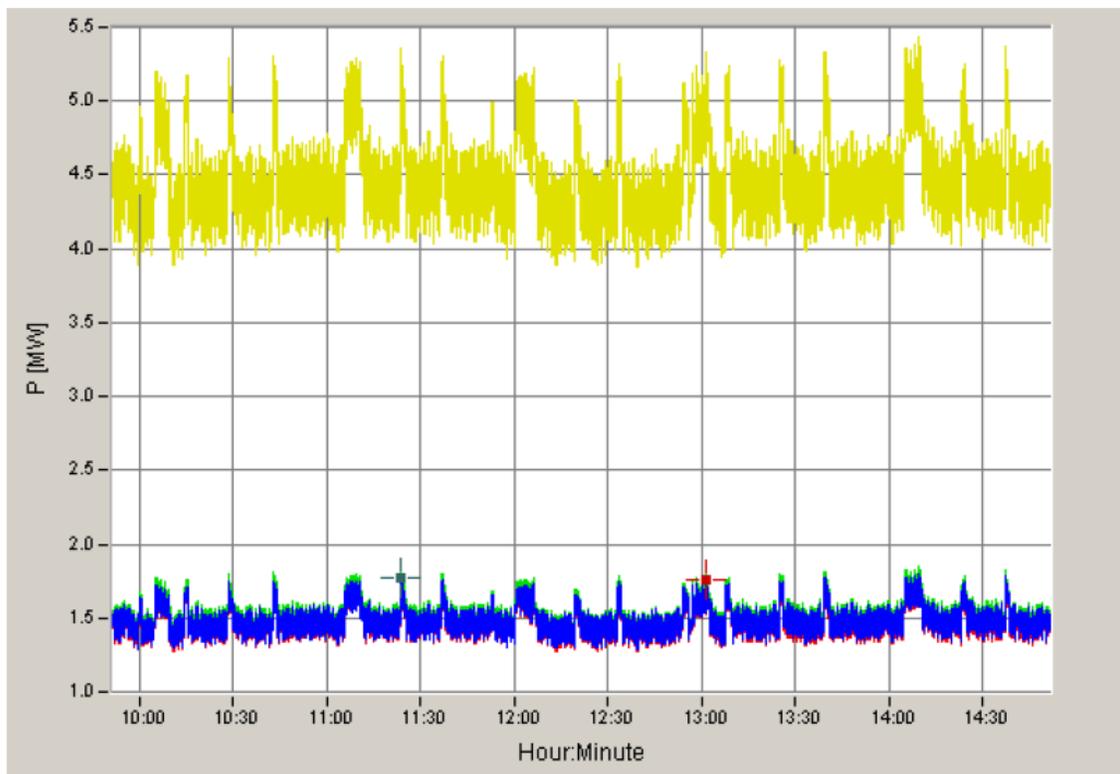


Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

### 4.3.2. Resultados de las mediciones en área servicios de acería (Punto T)

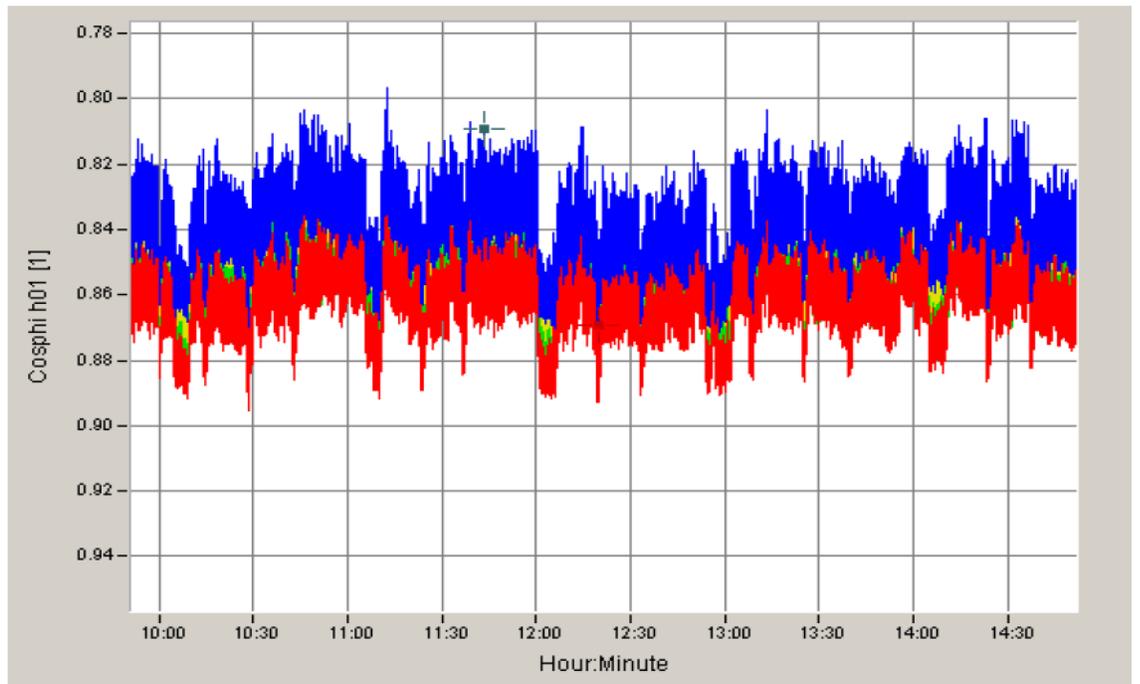
Medición de la potencia activa y reactiva en tiempo de una colada en el punto T.

Figura 62. Potencia activa y reactiva servicios acería



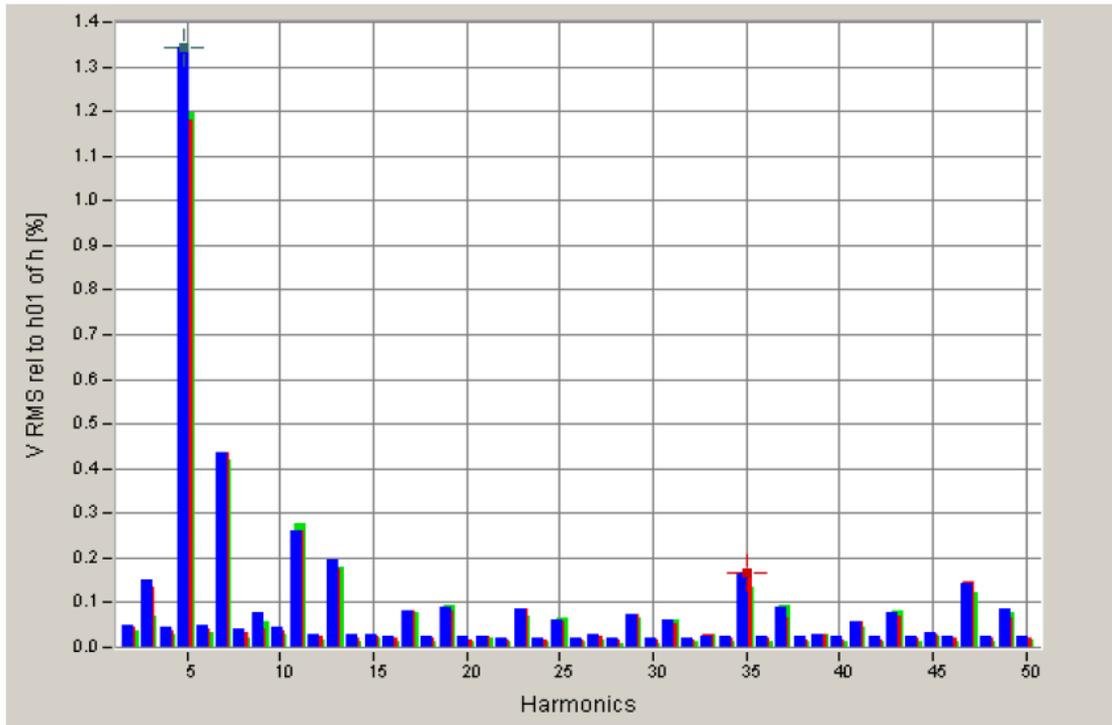
Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 63. Factor de potencia línea de servicios acería 22,8 kV



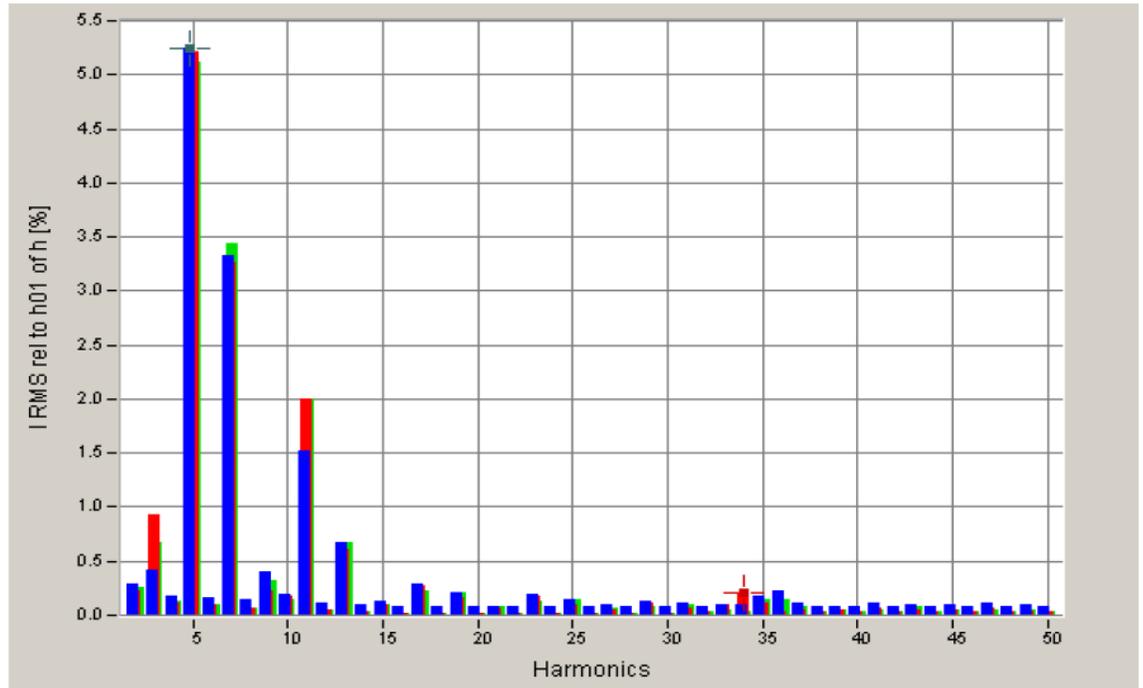
Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 64. Armónicos de voltaje línea servicios acería 22,8 kV



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 65. **Armónicas de corriente línea de servicios acería  
22,8 kV**



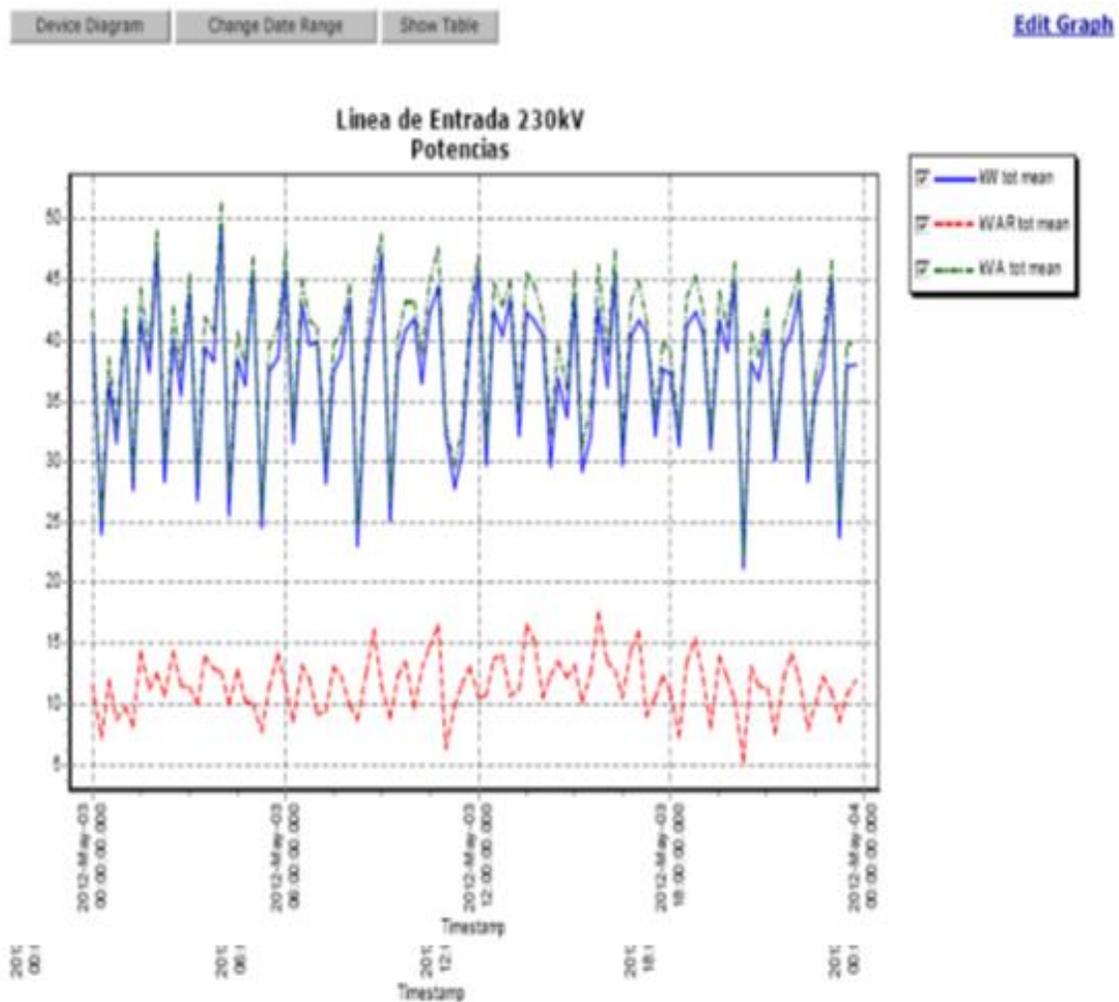
Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.4. Medición en nodo de conexión 230 kV con el sistema nacional (punto A)

##### 4.4.1. Gráfica de potencia y factor de potencia

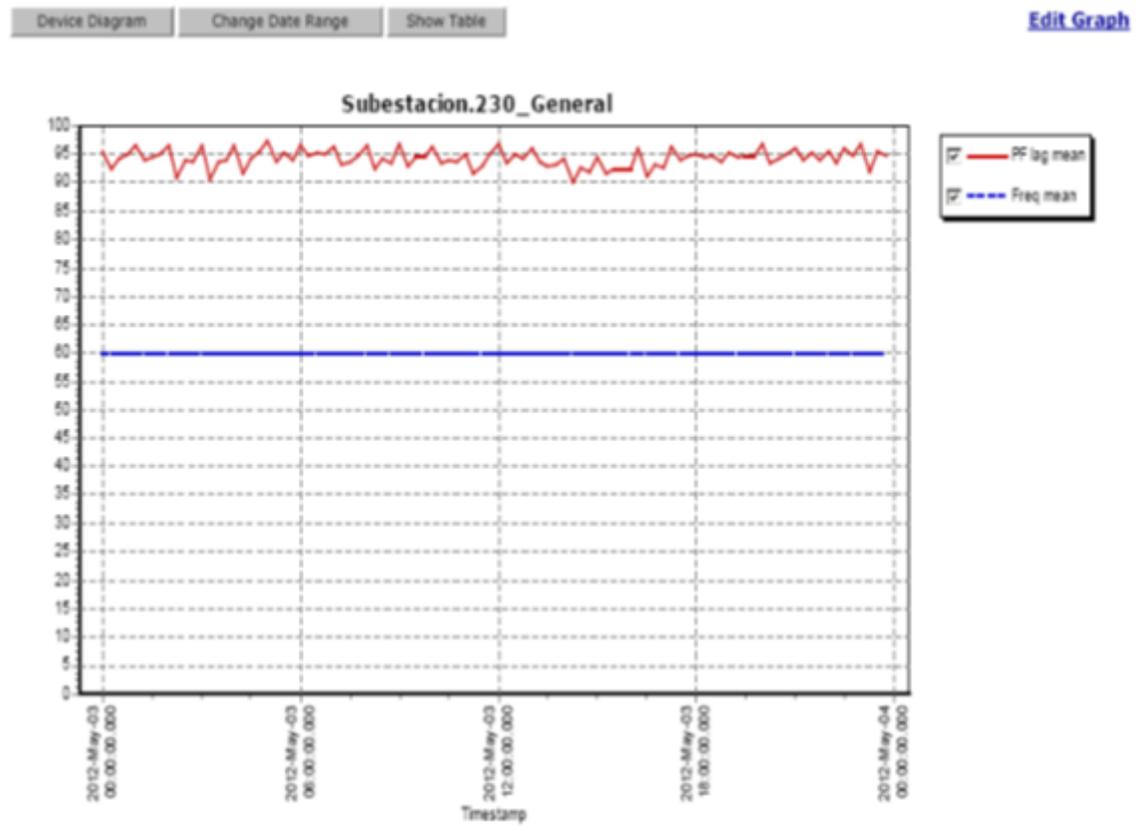
Medición de la potencia activa, reactiva y aparente en el punto A.

Figura 66. Gráfica de potencia en línea 230 kV



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 67. Gráfica de factor de potencia en línea 230 kV subestación

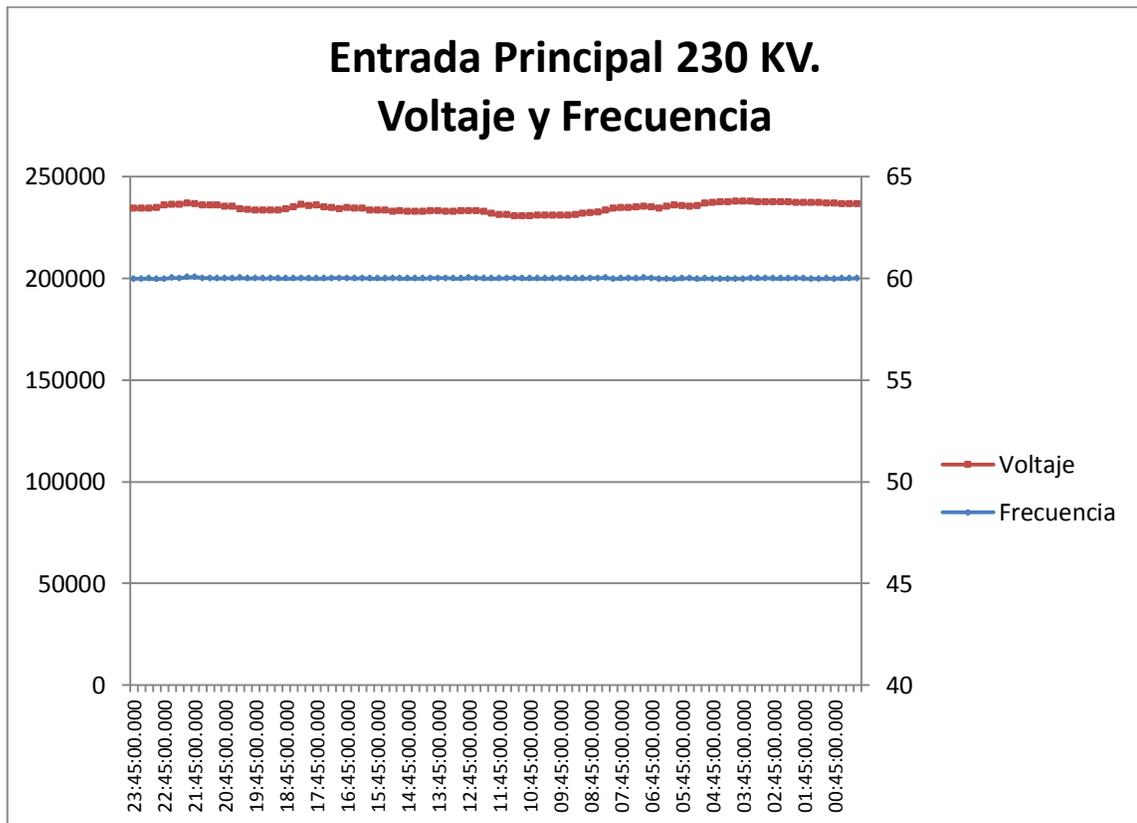


Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.4.2. Gráfica de frecuencia y voltaje en línea de 230 kV

Comparación del voltaje y la frecuencia en el punto A.

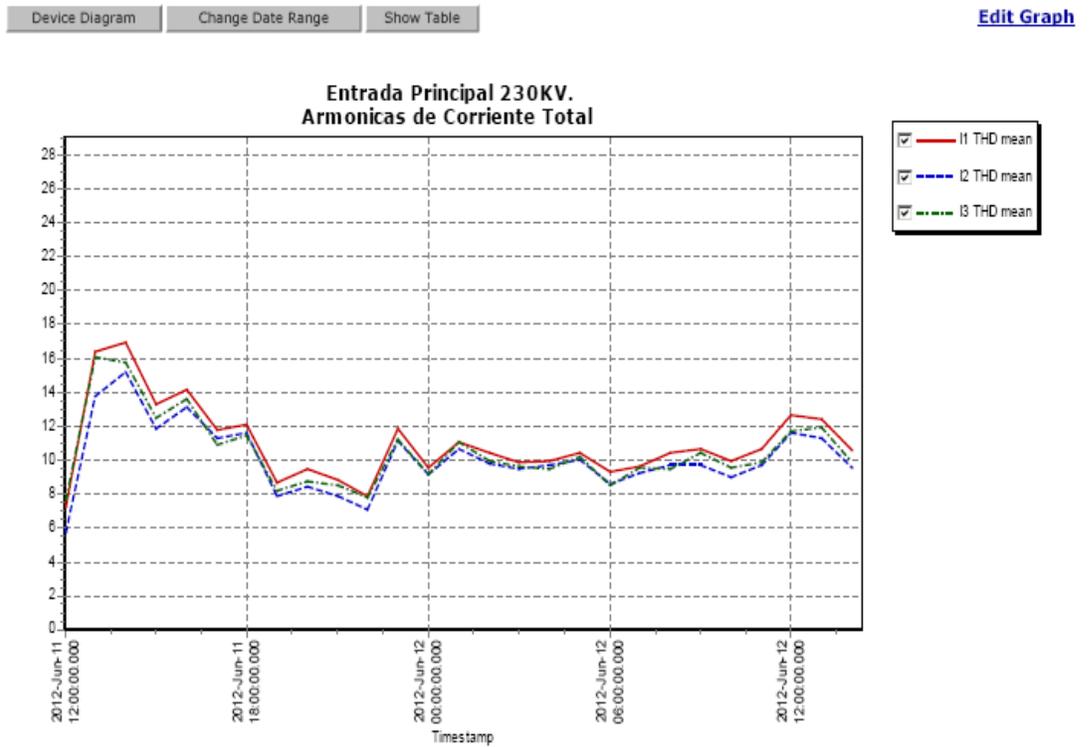
Figura 68. Gráfica de voltaje y frecuencia en línea de 230 kV



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.4.3. Gráfica de comportamiento de las armónicas en la línea de 230 kV

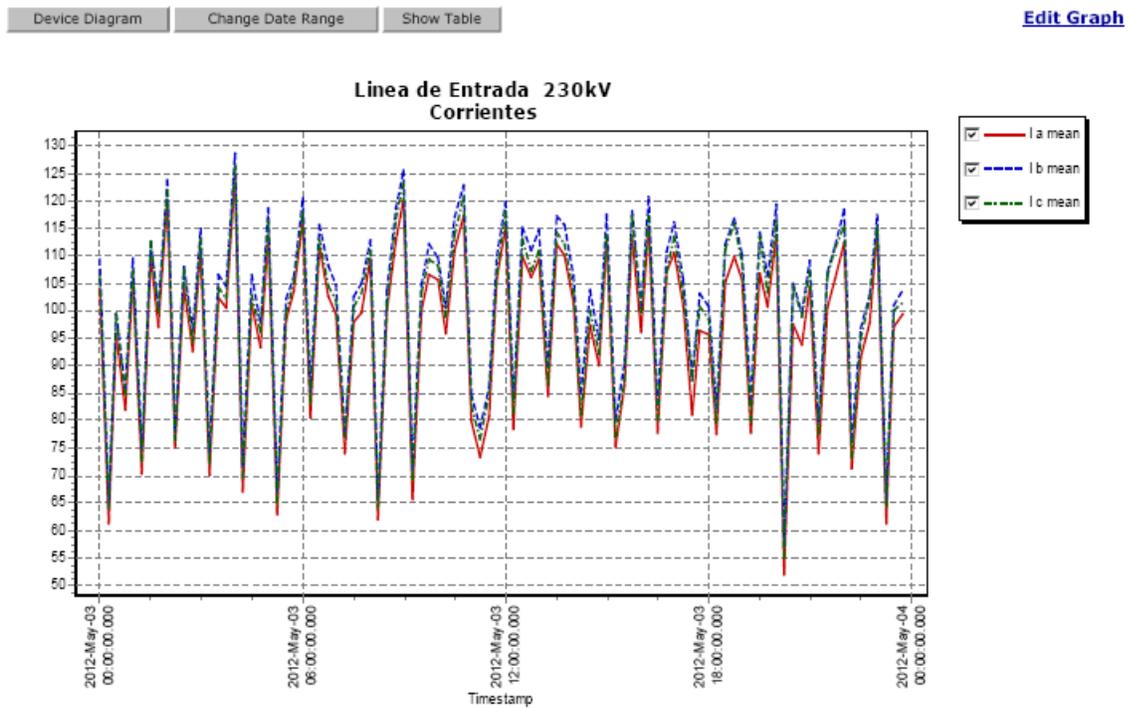
Figura 69. Gráfica de armónicos en línea 230 kV, entrada principal



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.4.4. Gráfica de corrientes A, B, C en línea 230 kV

Figura 70. Gráfica de corrientes de entrada en línea 230 kV (línea de entrada)

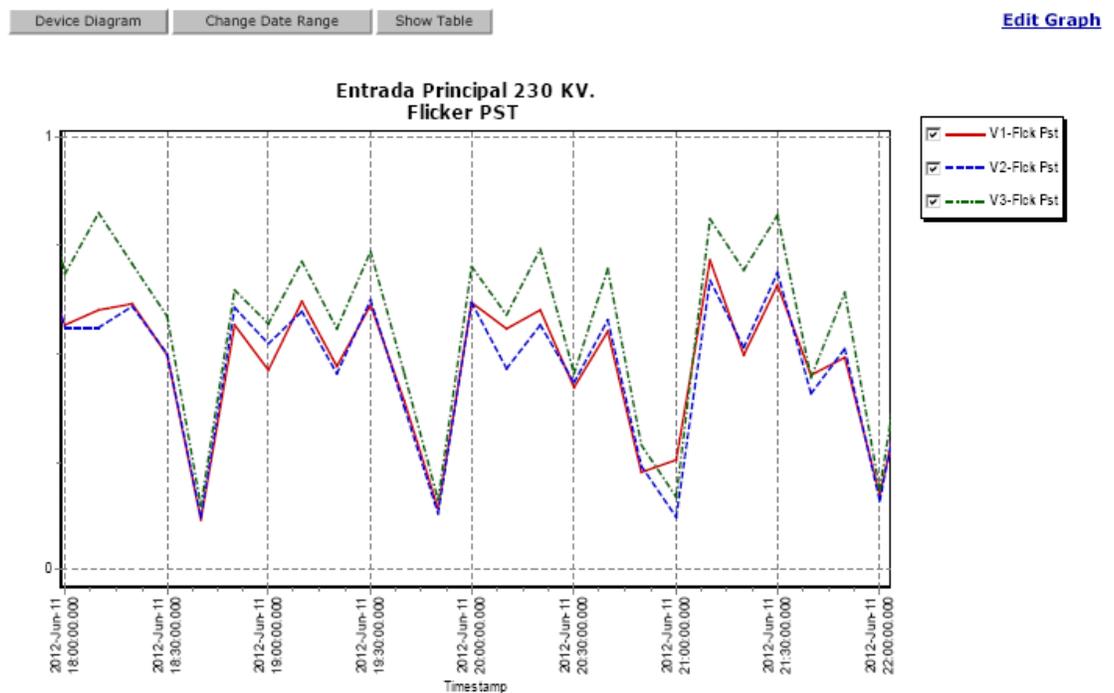


Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

#### 4.4.5. *Flicker* en línea de 230 kV

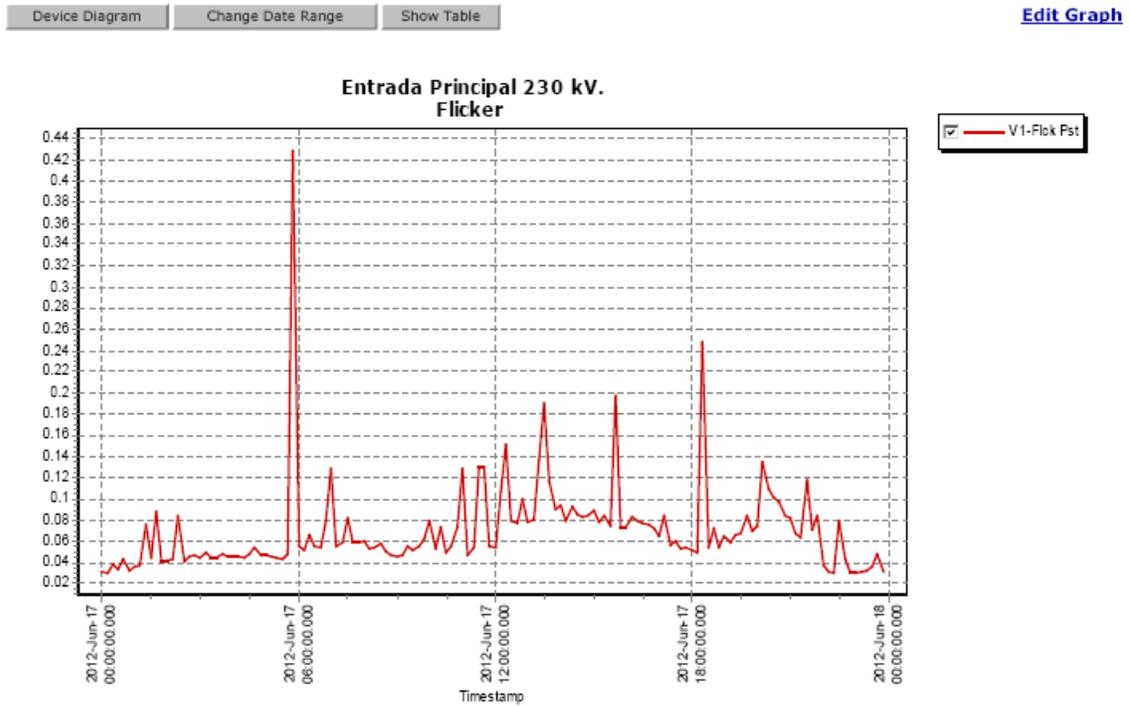
Comparación de *Flicker* en el voltaje de las tres fases de entrada en el punto de la entrada principal.

Figura 71. Gráfica de *Flicker* PST en línea 230 kV, entrada principal



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

Figura 72. Gráfica de *Flicker* en línea 230 kV, entrada principal



Fuente: elaboración propia, con 5001 IOS ENTERPRISE, Nokia.

## CONCLUSIONES

1. Como se observa en la gráfica 67, la potencia reactiva es muy variable, por lo que en definitiva es necesario el uso del compensador estático para la atenuación de esta fuerte variación, pero la capacidad máxima de control de reactiva del SVC es de 25 MVAR, por lo que arriba de esta potencia reactiva al compensador le será imposible realizar su tarea de control.
2. Se observó que el proceso de fabricación de una colada de acero de 60 toneladas se divide en dos pasos básicos: fusión (arco con chatarra solida) y afinación (arco de acero con liquido); concluyendo así que definitivamente es el proceso de fusión en donde se dan las perturbaciones más fuertes y en donde mayormente es afectado el factor de potencia, así como las variaciones bruscas de potencia, las corrientes armónicas y *Flicker*.
3. Se determinó que una pieza fundamental del sistema eléctrico interno de Sidegua es el relevador, ya que éste al detectar una falla en el nodo de 230 kV en variaciones de frecuencia, automáticamente desconecta el horno para ayudar a la recuperación del sistema y así, evitar la apertura de los interruptores provocando que el proceso se detenga y existan pérdidas económicas.
4. El uso del compensador estático de reactiva en Sidegua mejora la estabilidad y capacidad de transporte de la línea, así como el control instantáneo de la reactiva.

5. El compensador estático de reactiva trae consigo la mejora del factor de potencia y la mitigación del *Flicker* producido por el horno de arco eléctrico.
6. En la gráfica 58 se muestra que a pesar de utilizar el compensador estático de reactiva se ven valores que en algún momento podrían llegar a afectar al horno si se incrementara la producción.
7. Los valores detectados de corrientes armónicas más significativos del horno son las del orden de la segunda, tercera y quinta, pero el sistema está diseñado para filtrar solo la segunda y la tercera.
8. Debido a la operación del horno de arco que conecta y desconecta su carga varias veces al día, es imposible que esta variación de potencia no la perciba el sistema debido a que son 40 MW en total.
9. El proceso interno de Sidegua contiene una parte donde el SVC no están dentro de su cobertura como lo son: la planta de laminación y la alimentación de los servicios internos.

## RECOMENDACIONES

1. Aumentar en un futuro la capacidad del SVC, ya que en un futuro que aumente la capacidad del horno, este no podrá controlar en un 100 % las variaciones. Actualmente el factor de potencia en el nodo de conexión con la red en 230 kV oscila entre 0,9 y 0,96 haciendo un valor aceptable por el momento.
2. Se propone la instalación de un filtro para la 5ta armónica ya que en caso llegara a aumentar la potencia del horno, ésta podría llegar a afectar el sistema interno.
3. Es importante que el sistema nacional cuente con la potencia rodante necesaria para soportar las variaciones de carga producidas por el horno de arco.
4. Es necesario que exista una revisión periódica del buen funcionamiento del sistema de regulación del horno, ya que éste es el que se encarga de mantener la estabilidad del arco eléctrico.
5. Implementar la supervisión periódica del sistema hidráulico que se utiliza para el movimiento de los electrodos, ya que así se evitan movimientos erráticos y desbalances exagerados que producirían perturbaciones no controladas.

6. Mantener en supervisión constantes los equipos de protección ya que bajo ninguna circunstancia es aceptable dejar trabajando al horno solo con dos fases.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BASCOTECNIA GROUP. *Diseño y construcción de equipos Siderúrgicos*. España: Revista Bascotecnia Empresas Agrupadas. 1980. 47 p.
2. FINK, Donald; BEATY, Wayne H. *Manual de ingeniería eléctrica*. 13a ed. México: McGraw-Hill, 1995. 304 p.
3. HILTY, D.C.; et al. *Electric Furnace Steel Making*. 2 vols. USA: Metalurgical Society of AIME, 1967. 276 p.
4. MAZON ZAMORA, A.J.; SAENZ SAGASTABEITIA J.R. *Proyecto de diseño de un equipo limitador de distorsión armónica producida por una acería*. España: Departamento de Ingeniería ESI de Bilbao, 1996. 69 p.
5. NAVARRO CRESPO, Alfredo. *Corrientes armónicas*. México: Técnica Salgar, 1994. 172 p.
6. PALMER, A. *Horno de acero de la acería*. [en línea]. Allegheny Ludlum Pennsylvania. <[www.hdl.loc.gov/loc.pnp/fsac.1a35062](http://www.hdl.loc.gov/loc.pnp/fsac.1a35062)> [Consulta: 8 de marzo de 2013].
7. SALONEM, Juka. *Manual de operación y funcionamiento del compensador estático de reactiva*. Finlandia: Nokia Capacitors, 1997. 315 p.

8. SAWABE, Hiroshi. *Fluctuación del voltaje-Flicker en el horno de arco eléctrico*. México: Boletín Técnico UCAR número 8, 1995. 177 p.
9. \_\_\_\_\_. *Horno de arco eléctrico - curvas de potencia*. México: Boletín Técnica UCAR número 3, marzo, 1994. 128 p.  
<[www.hdl.loc.gov/loc.pnp/fsac.1a35062](http://www.hdl.loc.gov/loc.pnp/fsac.1a35062)>. [Consulta: 8 de marzo de 2012]. 98 p.