



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ESTUDIO SOBRE FALLAS EN TRANSFORMADORES PARA
HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN INDUSTRIA SIDERÚRGICA**

CARLOS ROLANDO CURIEL ORTEGA

Asesorado por Ing. Jhony A. Sandoval Espino

Guatemala, septiembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO SOBRE FALLAS EN TRANSFORMADORES PARA HORNO
DE ARCO ELÉCTRICO EN INDUSTRIA SIDERÚRGICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS ROLANDO CURIEL ORTEGA

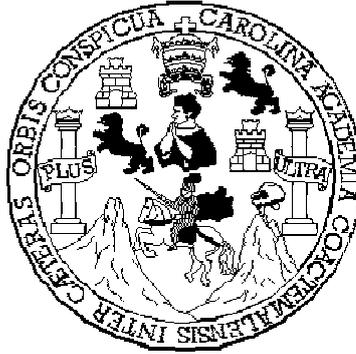
ASESORADO POR EL ING. JHONY A. SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexánder Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Ing. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Edgar Florencio Montúfar
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo M.
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Villeda Vásquez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO SOBRE FALLAS EN TRANSFORMADORES PARA HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN INDUSTRIA SIDERÚRGICA

Tema que me fue asignado por la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Mecánica con fecha junio de 2003

Carlos Rolando Curiel Ortega

ACTO QUE DEDICO

A:

DIOS	Fuente de sabiduría, amor y corrección
MIS PADRES	Armando Curiel y Corina Ortega de Curiel, por su esfuerzo para ayudarme a alcanzar esta meta
MIS HERMANAS:	Liliana, Paty y Cori, con especial cariño
MI ESPOSA	Maria Elena, por su constante apoyo y amor
MIS HIJAS	Sara Jimena y Ana Valeria, que me inspiraron a esforzarme
MIS SOBRINOS	Alejandra, Mimi, Héctor, Lily y Gener
MI FAMILIA EN GENERAL	
MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE TRABAJO	

AGRADECIMIENTOS

A Ing. Jhony Sandoval Espino Por su valiosa asesoría prestada para la realización del presente trabajo

Al personal de SIDEGUA Por la colaboración y apoyo brindados, especialmente a David Alecio

Al Ing. Gustavo Orozco Por la valiosa revisión de este trabajo

A mi esposa Maria Elena Por su constante apoyo e insistencia

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

A la Facultad de Ingeniería, especialmente a la Escuela de Mecánica Eléctrica

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma me brindaron su ayuda

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
GLOSARIO	VII
OBJETIVOS	IX
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	
1.1. Esquema de un horno de arco eléctrico	1
1.2. Principio de operación	2
1.3. Características eléctricas del horno de arco	4
1.3.1. Eficiencia eléctrica	7
1.3.2. Reactancia de operación	7
1.3.3. Potencia eléctrica del horno	10
1.3.4. Factor de potencia	14
1.4. Sistemas de abastecimiento de potencia para hornos de arco	15
1.5. Compensador estático	16
1.5.1. Ubicación y funcionamiento del compensador estático	18
2. TRANSFORMADORES PARA HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	
2.1. Características nominales de servicio	20
2.2. Circuito externo secundario	22
2.3. Disposición de los devanados	23
2.4. Enfriamiento del transformador	25

2.4.1.	Enfriamiento de transformadores para hornos de arco eléctrico	26
2.5.	Condición de sobrecarga	26
2.6.	Regulación de tensión bajo carga	29
2.6.1.	Filtrado del aceite del variador de tap	30
2.7.	Protección del transformador	31
2.7.1.	Relevador buchholtz	31
2.7.2.	Relevador de flujo contrario (RS 1000)	33
2.7.3.	Relevador de temperatura	33
2.7.4.	Dispositivo de alivio de presión	34
2.7.5.	Relevador de sobre presión	34
2.7.6.	Relevador de corriente	34
2.7.7.	Relevador de voltaje	35
2.7.8.	Control de presión de agua de enfriamiento	35
2.7.9.	Transformadores de corriente	35
2.7.10.	Transformadores de potencial	36
3.	ANÁLISIS DE TRANSFORMADORES PARA HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO DAÑADOS DURANTE SU OPERACIÓN	
3.1.	Datos nominales de transformadores dañados	37
3.2.	Dinámica de la ocurrencia de las averías	38
3.3.	Inspección visual de los transformadores después de las fallas	41
3.4.	Comportamiento de transformadores diseñados para 50 hertz, y operados en servicio a 60 hertz	42
3.4.1.	Inducción en el núcleo	42
3.4.2.	Pérdidas en el transformador	43
3.4.3.	Sobre tensiones anormales en redes con neutro aislado	43
3.5.	Sobre tensiones provocadas por desconexión constante de la carga	44
3.5.1.	Cómo proteger a los transformadores de los fenómenos	

	transitorios	45
	3.5.1.1. Pre inserción de resistencias	46
	3.5.1.2. Circuito RC de fase a tierra	46
	3.5.1.2. Pararrayos conectados de fase a tierra	48
3.6.	Operación con carga desbalanceada	49
3.7.	Esfuerzos de corto circuito	50
4.	MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES PARA HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO	
4.1.	Tareas de inspección y limpieza de equipo	58
	4.1.1. Medidores de temperatura	59
	4.1.2. Dispositivos de alivio de presión	60
	4.1.3. Transformadores de corriente y de voltaje	60
	4.1.4. Válvulas	60
	4.1.5. Conectores de tierra	60
	4.1.6. Tanque conservador de aceite	60
	4.1.7. Relé buchholtz	61
	4.1.8. Medidores de nivel de aceite	62
	4.1.9. Refrigeradores	62
	4.1.10. Instalación de filtrado con transformador en servicio	63
4.2.	Ensayos de campo	63
	4.2.1.. Ensayos eléctricos	64
	4.2.1.1. Resistencia de aislamiento	64
	4.2.1.2. Relación de transformación	66
	4.2.1.3. Prueba de factor de potencia	66
	4.2.1.3.1. Análisis de resultados de pruebas de factor de potencia	69
	4.2.2. Ensayos del aceite	69
	4.2.2.1. Rigidez dieléctrica	71
	4.2.2.2. Contenido de humedad	71

4.2.2.3.	Factor de potencia	72
4.2.2.4.	Tensión interfacial	72
4.2.2.5.	Peso específico	73
4.2.2.6.	Número de neutralización	73
4.2.2.7.	Color	73
4.2.2.8.	Gravedad específica	74
4.2.2.9.	Viscosidad	74
4.2.2.10.	Cromatografía de gases	74
4.2.2.11.	Análisis de furanos	80
4.3.	Acondicionamiento del aceite dieléctrico en planta	80
4.3.1.	Equipo para desgasificación y filtrado de aceite aislante	81
4.3.2.	Pasos a seguir para un correcto tratamiento del aceite	83
4.3.3.	Propósito de la aplicación de vacío a transformadores	84
4.4.	Mantenimiento del variador de tap	84
5.	CONCLUSIONES	86
6.	RECOMENDACIONES	89
7.	BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema general de un horno de arco eléctrico y sus componentes	1
2.	Diagrama unifilar simplificado de los hornos de arco eléctrico y el compensador estático, instalados en Siderúrgica de Guatemala	3
3.	Comportamiento de la frecuencia durante 24 horas en Sidegua	5
4.	Comportamiento de la potencia activa durante 24 horas, en Sidegua	5
5.	Comportamiento de la potencia activa durante 24 horas, en Sidegua	6
6.	Comportamiento del factor de potencia durante 24 horas en Sidegua	6
7.	Reactancia Normalizada versus factor de potencia	10
8.	Potencia durante una colada estándar en el horno de arco eléctrico	12
9.	Curvas de potencia	13
10.	Arrollamiento concéntrico en un devanado tipo columna	24
11.	Potencia activa respecto a la corriente, en función del tap	30
12.	Vista de falla detectada en transformador para horno de arco eléctrico marca Tamini, instalado en Sidegua	39
13.	Vista interna de los devanados y variador de tap, de transformador para horno de arco eléctrico, instalado en Sidegua	40
14.	Filtro RC conectado en el primario del transformador utilizado para atenuar los transientes de sobre tensión	47
15.	Comportamiento de la corriente de corto circuito, respecto al tiempo en un transformador	50
16.	Fuerzas de corto circuito entre fases de un transformador	51
17.	Filtradora de aceite dieléctrico	82

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
kv	Kilo voltio
kw	Kilo vatio
B	Densidad de flujo magnético
I	Corriente eléctrica
f	Frecuencia
X	Reactancia
MVA	Mega voltamperios
N	Número de espiras
T	Temperatura
R	Resistencia
L	Inductancia
C	Capacitancia
μ_0	Permeabilidad del espacio libre
F	Fuerza

GLOSARIO

Siderurgia	Tecnología relacionada con la producción de hierro y sus aleaciones.
Acero	Una aleación formada principalmente por hierro y carbono.
Arco eléctrico	También llamado arco voltaico, tipo de descarga Eléctrica continua que genera luz y calor intensos, formada entre dos electrodos. Fue descubierto y demostrado por primera vez por el químico británico Humphry Davy en 1800.
Electrodos	Postes de grafito comprimido, utilizados como Medio conductor, ubicados justamente donde se realiza el arco eléctrico para fundir el material ferroso.
Colada	Término que define una cantidad específica de acero en proceso de fabricación, correspondiente a la capacidad de acero líquido del horno.
Chatarra	Materia prima para la fabricación de acero, compuesta de restos metálicos.

Refractario

Material no metálico, resistente al calor, compuesto básicamente de magnesio y calcio, capaz de soportar temperaturas hasta de 3000 grados Celsius.

Escoria

Residuo impuro formado por calcio, hierro, aluminio y silicato de magnesio, que es parte de el proceso de producción de acero, pero que al final se desecha.

OBJETIVOS

General

Establecer las causas más importantes que pueden provocar fallas en transformadores para horno de arco eléctrico, debido a las condiciones críticas de operación a las que se ve sometido durante el proceso de fabricación de acero

Específicos

1. Conocer las características constructivas de los transformadores para hornos de arco, así como los diferentes equipos auxiliares del mismo, tanto de protección como de operación
2. Comprender la importancia del mantenimiento básico preventivo, al que debe ser sometido el transformador para hornos de arco, así como la relevancia de las diferentes pruebas eléctricas, fisicoquímicas y cromatográficas a las cuales debe someterse, para tener un panorama más completo sobre el estado interno de los diferentes componentes del mismo, y poder así estar preparados para ejecutar las medidas preventivas o correctivas necesarias
3. Describir el funcionamiento del horno de arco eléctrico utilizado en la industria siderúrgica y los equipos relacionados con los mismos, de tal manera, que pueda ser comprendido por profesionales y técnicos del área, para aumentar sus conocimientos respecto al mayor consumidor de energía eléctrica del país, como lo es la industria del acero

RESUMEN

La información recopilada en el presente trabajo es una descripción general del funcionamiento del horno de arco eléctrico, sus componentes principales y las características eléctricas de los equipos, especialmente del transformador. Se hace mención de la necesidad de un sistema de abastecimiento de energía robusto, para poder soportar las variaciones de consumo de grandes potencias solicitadas por la industria siderúrgica. Así mismo, se analiza la importancia del uso de compensadores estáticos, utilizados para filtrar las corrientes armónicas, compensar la potencia reactiva y atenuar el *flicker*. Se analizaron los factores que influyen en la vida útil de los transformadores para horno de arco eléctrico, entre los que sobresalieron: el manejo de elevadas corrientes desbalanceadas, las cuales provocan fuerzas electrodinámicas asimétricas en los devanados y la estructura del transformador, los transientes de sobretensión debidos a elevadas maniobras de apertura en vacío del interruptor y la gran cantidad de cambios de *tap* bajo carga durante el proceso de producción.

Se evaluaron las fallas ocurridas a un grupo de transformadores instalados en Siderúrgica de Guatemala, así como las posibles razones que pudieron provocarlas, haciendo énfasis en la importancia de la programación de un estricto mantenimiento preventivo, por medio de la realización de ensayos no destructivos, que incluyen pruebas eléctricas y fisicoquímicas, puntualizando la importancia de contar con un historial de las mismas, para tener una base de datos más completa, que permita a la persona responsable de estos equipos tomar la decisión más adecuada respecto a las medidas correctivas que deban tomarse. Hay muchos tipos de aplicaciones de los transformadores eléctricos, pero aquí solo analizaremos los utilizados en hornos de arco eléctrico.

INTRODUCCIÓN

El uso de hornos de arco eléctrico de alta potencia, utilizados por la industria metalúrgica para la producción de aceros al carbón, sigue creciendo alrededor del mundo, siendo casi imposible prescindir de ellos si se pretende competir en un mercado en el cual la incorporación de los constantes avances tecnológicos y la productividad juegan un papel determinante.

Es importante resaltar que en muchas partes del mundo, 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, generalmente dentro de un rango de 25 a 100 MW; por lo tanto, debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar las severas fluctuaciones de potencia reactiva MVAR que produce el horno de arco, a fin de evitar provocarles trastornos a otros usuarios en la misma línea.

Además, los equipos eléctricos que intervienen en este proceso deben estar 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. Este transformador es la parte más importante del sistema eléctrico que permite al horno funcionar adecuadamente. Por esta razón, en el presente trabajo se orientó la atención al análisis de los fenómenos eléctricos normales y críticos que intervienen en su funcionamiento, así como la estrategia de mantenimiento que debe seguirse para prolongar hasta donde sea posible su vida útil.

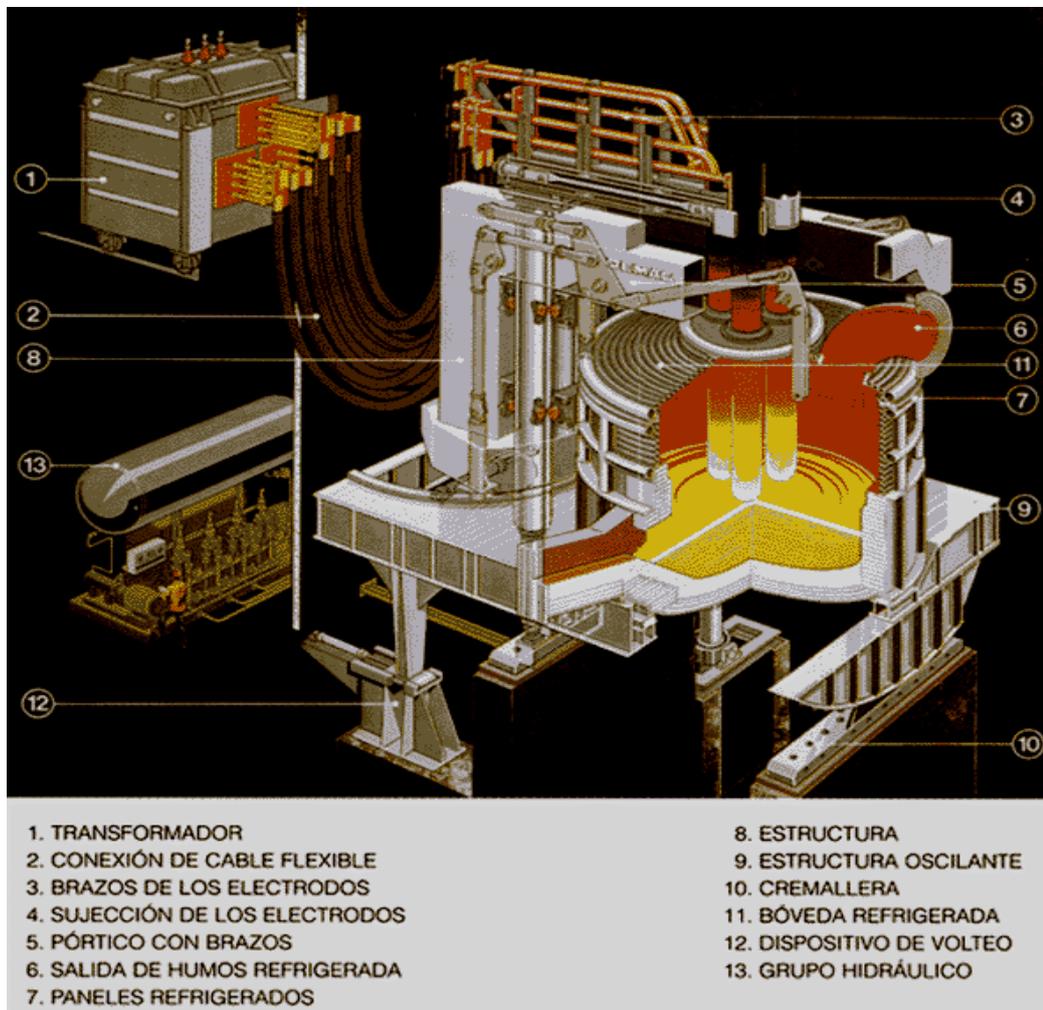
Además, se mencionan el comportamiento y la importancia de cada uno de los elementos auxiliares tanto de operación como de protección, que son parte vital para la operación adecuada del transformador.

En las páginas siguientes, se describe y analiza un serio problema suscitado en la industria siderúrgica guatemalteca respecto a averías sufridas por algunos transformadores de horno de arco, lo cual provocó grandes pérdidas económicas no solo por el valor que representa el equipo dañado, sino por el tiempo perdido de producción, por lo cual se estudiaron las posibles causas de estos siniestros, realizando un análisis de cada una de ellos, y la manera como pudieron afectar la operación del transformador del horno de arco.

1 EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

1.1 Esquema de un horno de arco eléctrico

Figura No. 1: Esquema general de un horno de arco eléctrico y sus componentes



Fuente: Internet www.metalurgia.com

En la figura No. 1, se observa el esquema completo de un horno de arco eléctrico con sus componentes básicos como lo son: el transformador, el sistema hidráulico, los electrodos de grafito, los brazos porta electrodos, los paneles y cables flexibles refrigerados; además, en la figura No. 13, puede apreciarse la estructura interna del transformador.

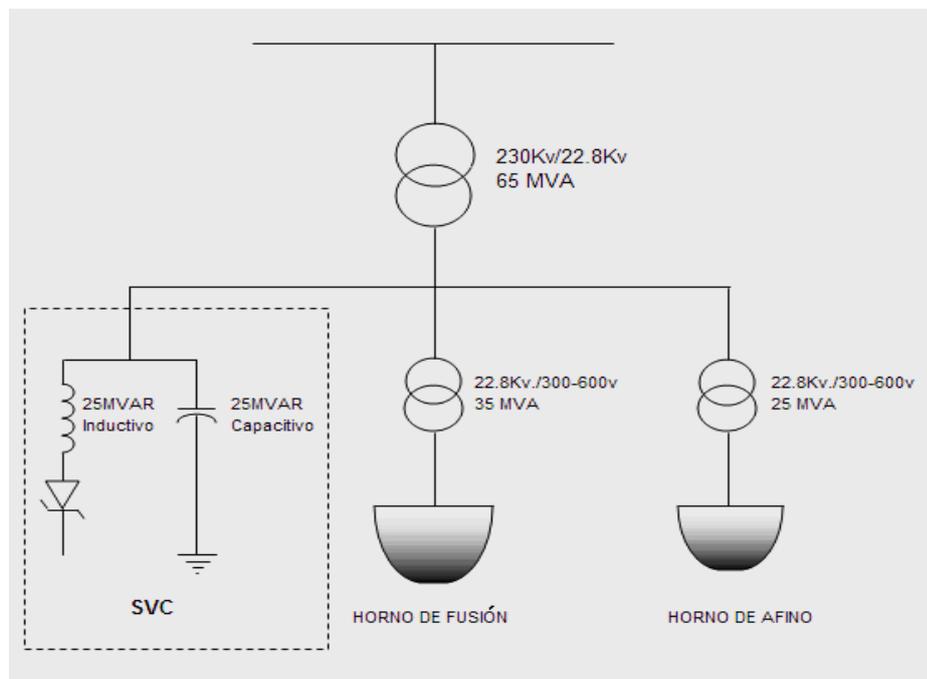
1.2. Principio de operación

El horno de arco eléctrico es, esencialmente, una coraza de acero con fondo esférico recubierto internamente con material refractario, y en la parte superior de la cuba, consta de paneles refrigerados montados en la parte alta de las paredes y en la bóveda (tapadera). Tiene un mecanismo de volteo y un agujero en el fondo del piso corrido hacia un extremo, el cual sirve para vaciar el acero líquido, que se encuentra a una temperatura de 1600 grados Celsius. El horno instalado en nuestro país tiene una capacidad de 60 toneladas de acero líquido. La tapa del horno es cóncava, constituida de paneles refrigerados con tres orificios en una disposición triangular para permitir la entrada de las columnas de electrodos de grafito, una por cada fase. La potencia que alimenta al horno de arco eléctrico es suministrada por un transformador de 35 MVA, 22800/250:650 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.

El circuito secundario del transformador se conecta a los electrodos del horno a través de cables flexibles refrigerados, alimentados constantemente por un flujo de agua. El voltaje secundario varía entre 250 y 650 voltios, dependiendo el *tap* de operación seleccionado. El cambio de voltaje se efectúa por medio de un cambiador de derivaciones bajo carga en el circuito primario.

Después de que el horno ha sido cargado con chatarra, se energiza, sin que los electrodos hagan contacto con la chatarra. El sistema de control automático hace que los electrodos bajen hasta que se hace contacto con la carga, y se crea el arco eléctrico; en ese instante el control trata de mantener una corriente constante y balanceada, lo cual es bastante difícil, debido a que la forma y densidad de la chatarra no es homogénea. Por lo tanto, durante todo este proceso de fusión el arco es irregular, con corrientes fluctuantes en un rango que va desde corto circuito, cuando los electrodos tienen contacto físico con la chatarra, hasta la condición de circuito abierto, cuando se extingue el arco y los electrodos se han separado del material ferroso. Debido a la baja densidad de la chatarra, el horno debe ser cargado varias veces hasta completar el peso deseado (para el caso en mención, por cada colada de sesenta toneladas de acero, se realizan aproximadamente cinco recargues de chatarra).

Figura No. 2: Diagrama unifilar simplificado de los hornos de arco eléctrico y el compensador estático, instalados en Siderúrgica de Guatemala



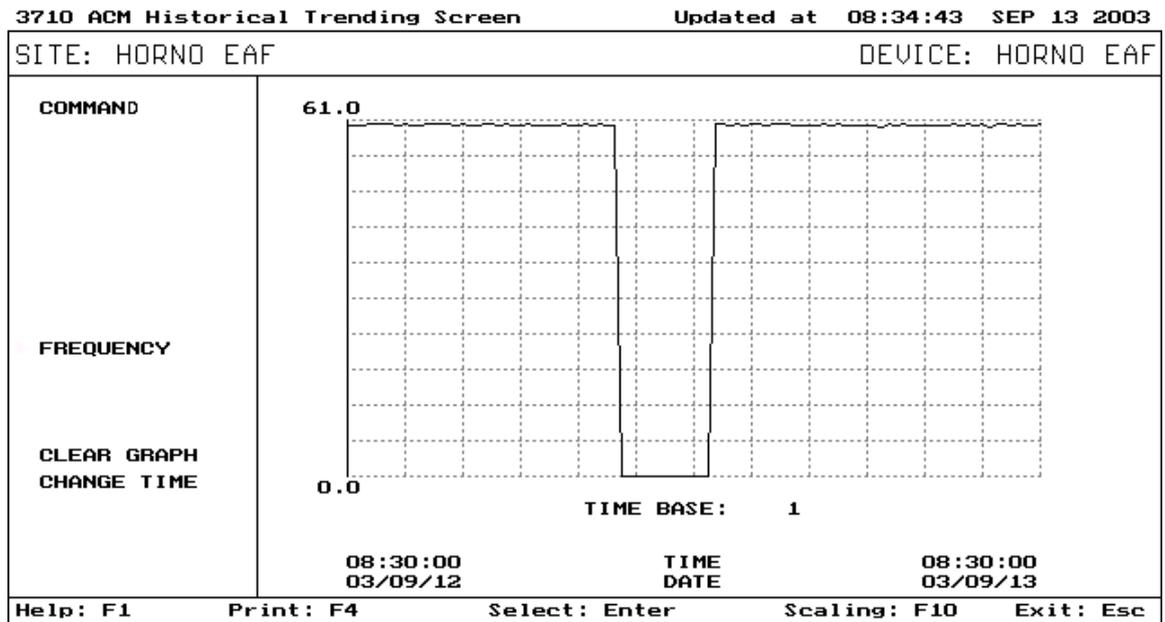
Cuando el proceso de fusión se ha completado y la chatarra se ha fundido en su totalidad, los arcos se estabilizan y las corrientes tienden a ser más estables, iniciándose en este momento el proceso de preafinación, en el cual el acero ya se encuentra en estado líquido. Por lo tanto, las corrientes son más constantes y se reduce notablemente el desbalance de la carga (ver gráfica de potencia promedio, figura No. 8). Durante este proceso de preafinación en el cual el arco es más estable, se selecciona el voltaje a un nivel más bajo (por medio del variador de *tap*), debido a que se necesita un arco más corto, una corriente más alta, y consecuentemente, una potencia más constante, para elevar la temperatura de las sesenta toneladas de acero líquido a 1600 grados Celsius, para luego vaciarlo en una olla, la que será trasladada al horno de afinación, el cual tiene el mismo principio eléctrico que el horno de fusión, salvo que es de menor potencia, y solo opera con acero líquido. El tiempo requerido para hacer una colada de acero de 60 toneladas, en el horno de fusión, es aproximadamente de 100 minutos.

1.2 Características eléctricas del horno de arco eléctrico

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.

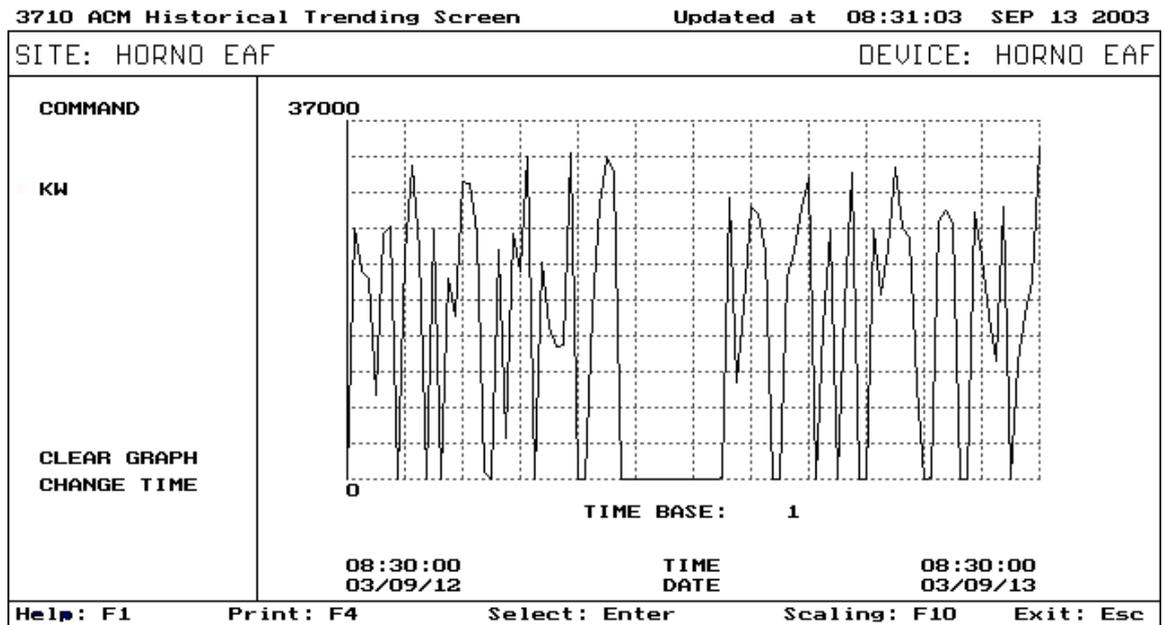
El valor instantáneo de voltaje de cada una de las fases depende de la distancia entre el electrodo de grafito y la carga; esta longitud cambia rápida y constantemente en forma no predecible y errática, por lo que el sistema de regulación (posicionamiento de electrodos) no puede prevenir estas variaciones de voltaje. En las ilustraciones No. 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 No. 3: Comportamiento de la frecuencia durante 24 horas en Sidegua



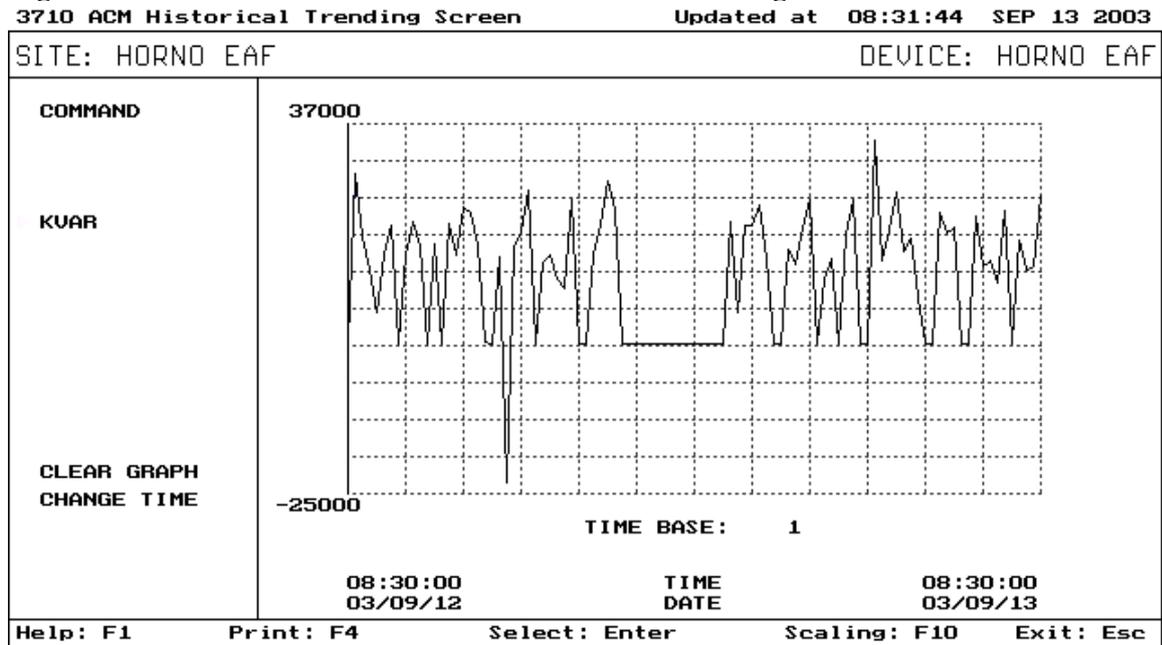
Fuente: Sistema de monitoreo LSCADA instalado en Sidegua.

Figura No. 4: Comportamiento de la potencia activa durante 24 horas, en Sidegua



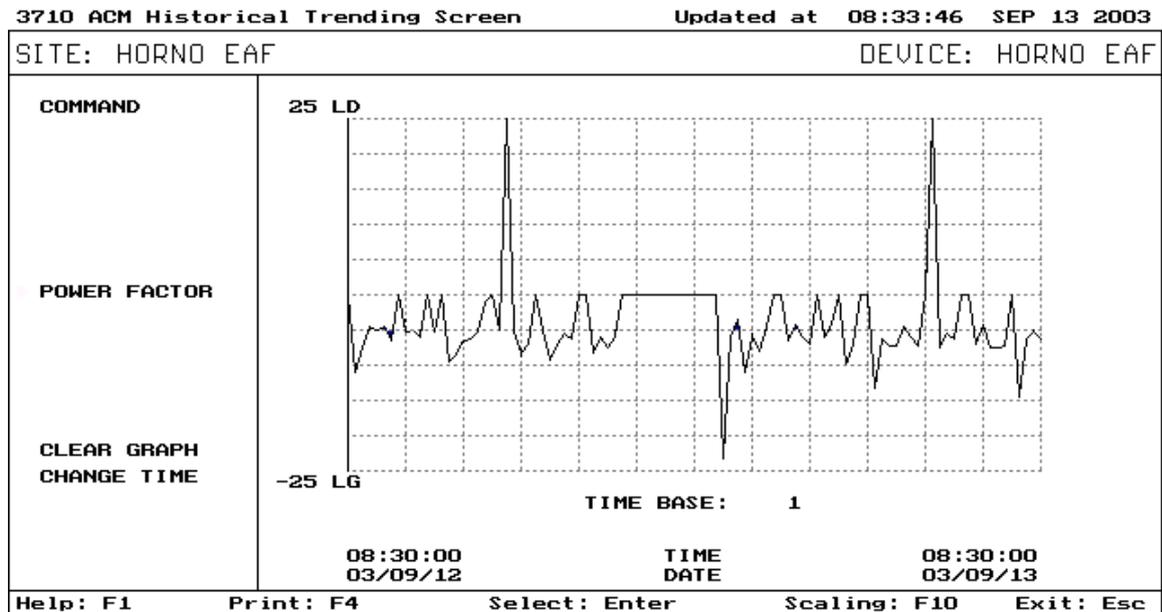
Fuente: Sistema de monitoreo LSCADA instalado en Sidegua.

Figura No. 5: Potencia reactiva durante 24 horas en Sidegua



Fuente: Sistema de monitoreo LSCADA instalado en Sidegua.

Figura No. 6: factor de potencia durante 24 horas en Sidegua



Fuente: Sistema de monitoreo LSCADA instalado en Sidegua.

1.3.1. Eficiencia eléctrica

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. Así mismo, 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. Por lo tanto, la eficiencia térmica del horno se encuentra en el orden del 60%.

Es importante mencionar que el elemento 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 530 kWh.

1.3.2. Reactancia de operación

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:

$$X_{op}/X_{sc} = (1-F) + F(I_{sc}/I)^2$$

Donde:

- 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.

En la figura No.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 mega vatios (MW), megavolta amperios reactivos y voltajes del primario y secundario del transformador

$$X_{op} = \frac{MVAR(V_{sr} * V_{pr}/V_{pn}^2)}{(MW^2 + MVAR^2)}$$

Donde:

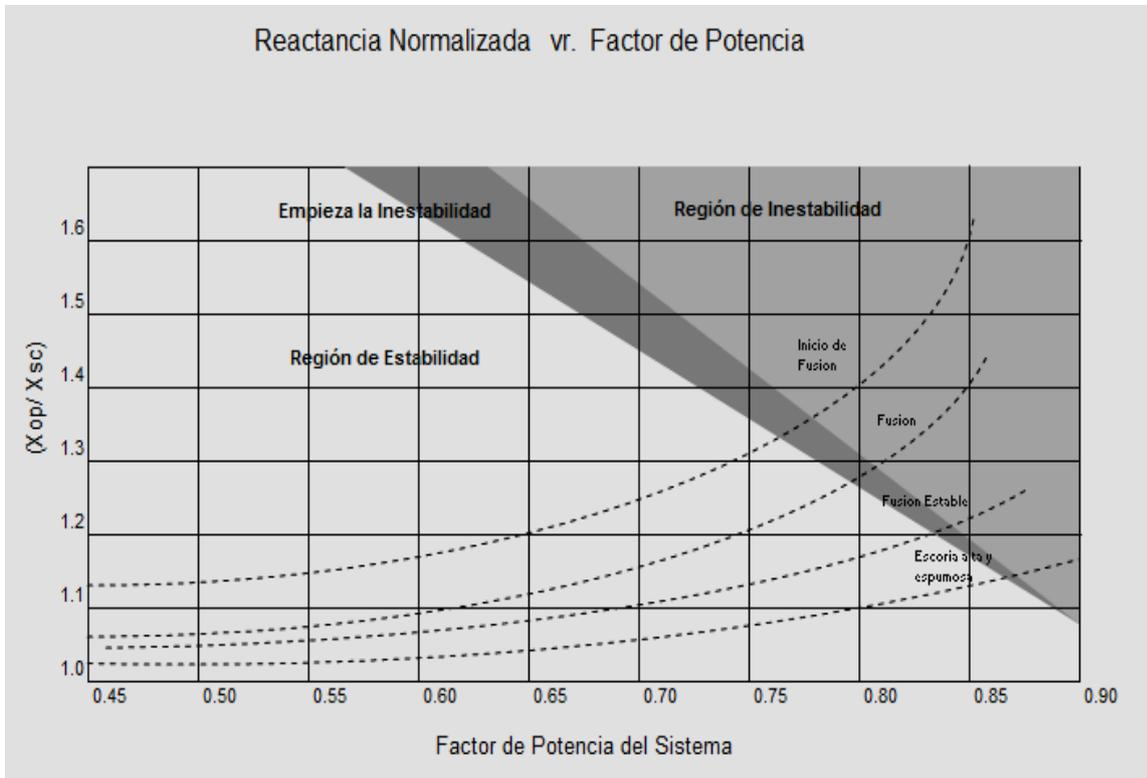
V_{sr} voltaje real del secundario

V_{pr} voltaje real del primario

V_{pn} voltaje nominal del primario

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 No. 7).

Figura No. 7: Reactancia normalizada versus factor de potencia



Fuente: Internet: <http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/cme>.

1.3.3. Potencia eléctrica del horno

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 si 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:

$$\text{Potencia Aparente MVA} = K * D^2$$

Donde:

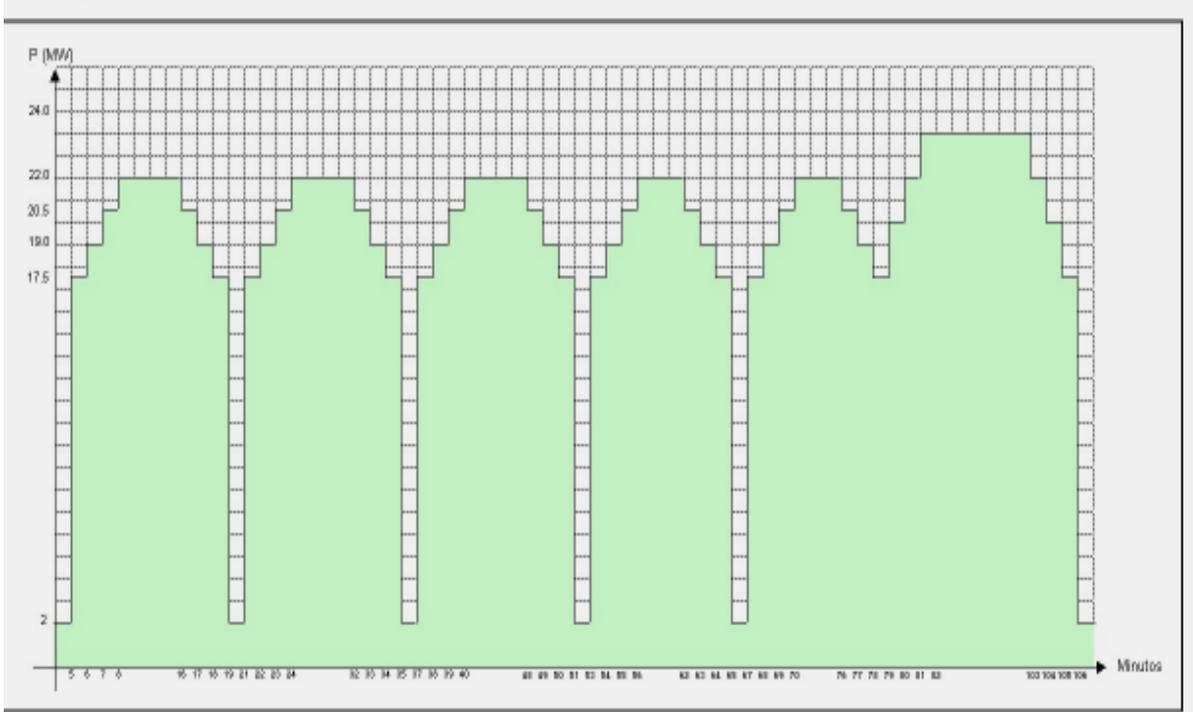
MVA	Potencia aparente del transformador
K	2.4 para paneles y 1.8 paredes de refractario
D	diámetro entre paredes del horno en metros

Así que un horno como el instalado en Siderúrgica de Guatemala, con paredes de paneles enfriados por agua (ver figura No. 1), permite mejorar considerablemente el uso de una potencia mayor.

Si:	D = 4.4 metros
entonces	MVA = 2.4 X (4.4) ²
	MVA = 2.4 X 19.36
por lo tanto	MVA = 46

El horno de fusión con el que se cuenta en Siderúrgica de Guatemala es alimentado actualmente por un transformador de 35 MVA. Además, tiene una capacidad volumétrica de 60 toneladas de acero líquido, y produce un promedio de 650 toneladas diarias de acero. La fusión se lleva a cabo a una potencia promedio de 25 megavatios, la cual oscila de acuerdo a las necesidades del proceso y al tipo de chatarra que se está utilizando (ver figura No. 8).

Figura No. 8: Potencia durante una colada estándar en el horno de arco eléctrico



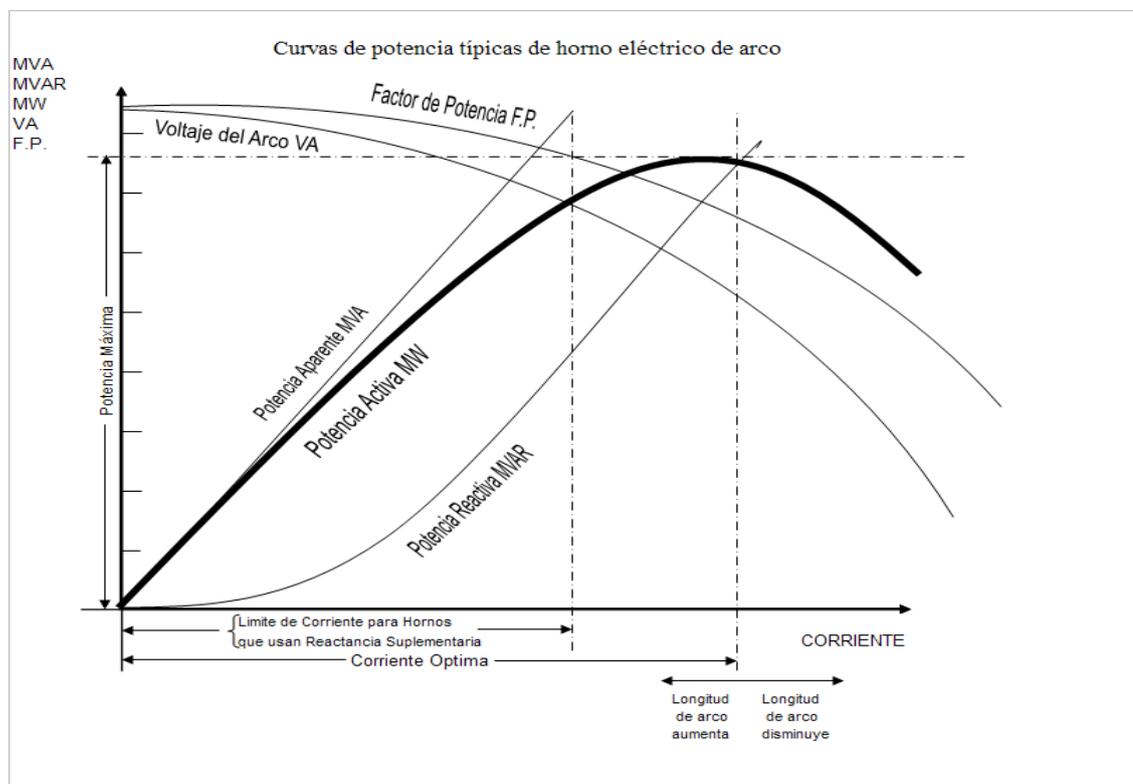
Una colada de 60 toneladas de acero se realiza en un tiempo de 100 minutos, durante los cuales se hacen de 5 a 6 recargues de aproximadamente 13 toneladas cada uno, hasta completar el total de la carga, para, luego, proceder a su preparación química y elevación de la temperatura, para el posterior vaciado en la olla, donde continúa otra parte del proceso.

Durante la operación del horno de arco eléctrico existen tres elementos importantes que debemos 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 esta 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 ilustraciones No. 4 y No. 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, gráfica No.9).

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 No.3).

Figura No. 9: Curvas de potencia



Fuente: **Boletín Técnico UCAR**, número 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 periodo 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.

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

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, así mismo, 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 No. 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 No. 7).

1.4 Sistemas de 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:

- 1) Características de la red de alimentación
- 2) Restricciones de las perturbaciones de la red, *flicker* y armónicas
- 3) Demanda de energía eléctrica para la fusión
- 4) Costo de la energía eléctrica
- 5) 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 No.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

El propósito de este equipo es compensar las fluctuaciones causadas por la carga (el horno de arco), mejorar el factor de potencia de la línea y reducir el *flicker*. 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 la válvula de tiristores. 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:

- 1) Banco de capacitores (25 MVAR capacitivos)
- 2) Banco de reactores (25 MVAR inductivos)
- 3) Grupo de válvula de tiristores (uno por cada fase)
- 4) Sistema de enfriamiento para la válvula de tiristores
- 5) Cubículo de control y medición
- 6) Filtro de segunda armónica
- 7) Filtro de tercera armónica

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

- 1) Procedimientos de marcha - paro del sistema de enfriamiento del compensador estático
- 2) Procedimientos de marcha-paro del compensador
- 3) Operaciones de interruptor del compensador
- 4) Funciones de alarma y disparo
- 5) Enclavamientos para el procedimiento de marcha
- 6) 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.

1.5.1. Ubicación y 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 No. 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, 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 25 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 No.8, Potencia vrs. tiempo).

2. TRANSFORMADORES PARA HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO