



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

DISEÑO DE UN FILTRO DE ABSORCIÓN DE CORRIENTES
ARMÓNICAS PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
ÁREA: ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA

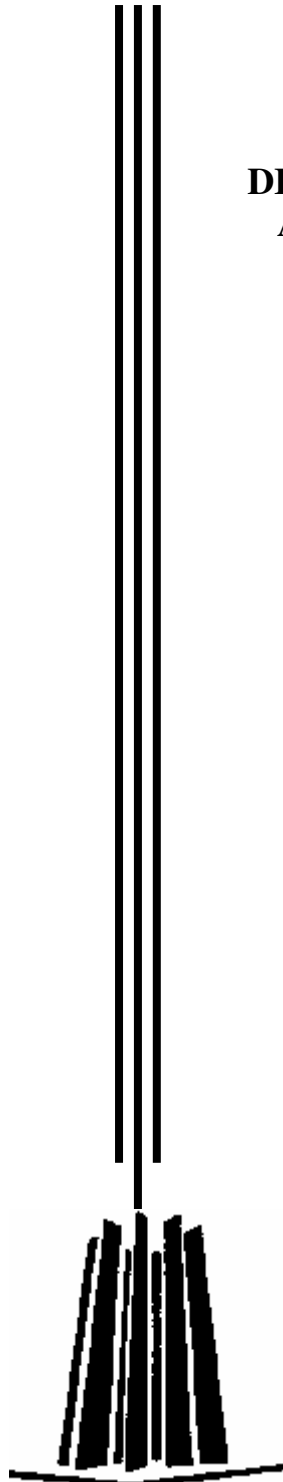
PRESENTA:

HERNÁNDEZ ATLAHUA JUAN CARLOS

ASESOR:

M. en ING. DAVID FRANCO MARTÍNEZ

SAN JUAN DE ARAGÓN, ESTADO DE MÉXICO, OCTUBRE DEL 2007





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN U.N.A.M. SECRETARÍA ACADÉMICA 12 SEP 2007 RECIBIDO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: FESAR/JAME/586/07.

ASUNTO: Sinodo

LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO PRESENTE.

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los profesores que sugiero integren el Sínoo del Examen Profesional del alumno: JUAN CARLOS HERNÁNDEZ ATLAHUA con número de cuenta: 09851712-1, con el tema de tesis: "DISEÑO DE UN FILTRO DE ABSORCIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO"

PRESIDENTE:	ING. ESTEBAN ARELLANO RIVERA	FEBRERO	97
VOCAL:	M. en I. DAVID FRANCO MARTÍNEZ	JULIO	98
SECRETARIO:	ING. JOSÉ LUIS GARCÍA ESPINOSA	AGOSTO	98
SUPLENTE:	ING. RAMÓN PATIÑO RODRÍGUEZ	AGOSTO	03
SUPLENTE:	ING. EDGAR ALFREDO GONZÁLEZ GALINDO	FEBRERO	05

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el M. en I. David Franco Martínez, quien esta incluido basándose en lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de ésta Facultad.

ATENTAMENTE "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU" Bosques de Aragón, Estado de México 10 de septiembre del 2007. EL JEFE DE CARRERA

M. en I. ULISES MERCADO VALENZUELA

c.c.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa de Servicios Escolares. c.c.p. M. en I. David Franco Martínez- Asesor. c.c.p. Alumno. UMV/scd

Dedicatoria a:

Mi madre:

Martha Atlahua Montalvo

Mis tíos, primos y sobrinos:

Catalina Atlahua Montalvo
Daniel Martínez Vázquez
Erika, Arturo, Olivia, Daniel,
Daniela, Ernesto

La familia Serrano Rojas:

Cirilo, Piedad,
Gustavo, Lucia, Liliana, Fernanda,
Fernando, Liliana, Mauricio, Fernanda,
Elena, Rodolfo, Nayeli, Rodolfo,
Guadalupe, Samuel, Yazareth, Yamile, Samuel
Guillermo, Soledad, Guillermo, Luis, Giovanni,
Y a todos los nuevos integrantes de esta maravillosa familia

Agradecimientos a:

Dr. en Ing. Alfredo Navarro Crespo
Escuela Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad de Madrid, España
Director general de TNV Consulting Co

Gracias por su amistad, por transmitirme los conocimientos necesarios para la elaboración del presente trabajo y por su paciencia ante mi ignorancia. Y por ser el director de esta tesis.

M. en I. David Franco Martínez
Universidad Nacional Autónoma de México
Jefe del Laboratorio de Diagnostico Energético, Centro Tecnológico Aragón, UNAM

Y también:

Mónica Velásquez
Leticia Chávez
Alejandro Guevara
Manuel Arroyo
Maricarmen Mathey
Igmarr M. Mathey
Sra. Mari Tora
Israel Martínez
Rafael Trevilla

Por mi raza hablara el espíritu

Octubre del año 2007

INDICE

CAPITULO I

1.- HORNO DE ARCO ELECTRICO: DESCRIPCION GENERAL Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	1
Introducción	2
1.1.- Clasificación de hornos de arco, de acuerdo al refractario empleado	6
1.2.- Generalidades sobre el funcionamiento de un horno de arco	6
1.3.- Descripción de la instalación de una acería con un horno de arco	7
1.4.- Componentes del horno, propiamente dicho	9
1.5.- Componentes del sistema eléctrico del horno	13
1.6.- Tablero con instrumentos de medida y regulación, eléctrica	16
1.7.- Sistemas auxiliares	17
1.8.- Principales procesos efectuados durante un ciclo de fundición del horno de arco eléctrico	20
1.8.1.- Proceso de fundición	21
1.8.2.- Proceso de afino	22
1.8.3.- Colada del acero	26

CAPITULO II

2.- FACTOR DE POTENCIA Y DISTURBIOS ELECTRICOS PROVOCADOS POR UN HORNO DE ARCO ELECTRICO	27
Introducción	28
2.1.- Factor de potencia en un horno de arco	28
2.1.1.- Comportamiento del factor de potencia	28
2.1.2.- Necesidad de corregir el factor de potencia	36
2.2.- Corrientes armónicas producidas durante la operación de un horno de arco	36
2.2.1.- Espectro típico de corrientes armónicas	37
2.2.2.- Efectos provocados por las corrientes armónicas	38
2.2.3.- Limites de distorsión armónica permitidos por la normatividad	42
2.3.- Parpadeo (ó flicker) en la onda de voltaje, provocado por un horno de arco	44
2.4.- Inestabilidad de la tensión por falta de linealidad en el arco voltaico	45
2.5.- Disturbios provocados por problemas de operación de electrodos y fallas a tierra	48

CAPITULO III

3.- METODOS DE COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA Y FILTRADO DE CORRIENTES ARMONICAS EN UN HORNO DE ARCO ELECTRICO	49
Introducción	50
3.1.- Compensación con un banco de capacitores	50
3.1.1.- Arreglo y configuración del banco	50
3.1.2.- Componentes principales	52
3.1.3.- Máxima compensación del factor de potencia permisible en la práctica	55
3.1.4.- Beneficios con este tipo de compensación	56
3.1.5.- Limitaciones de este tipo de compensación	56
3.1.6.- Compensación con un banco de capacitores, caso real	57
3.2.- Compensación con un filtro capacitivo de corrientes armónicas	63
3.2.1.- Arreglo y configuración del filtro	63
3.2.2.- Componentes principales del filtro	64
3.2.3.- Operación del filtro	66
3.2.4.- Beneficios con este tipo de compensación	67
3.2.5.- Limitaciones de este tipo de compensación	67
3.2.6.- Recomendaciones para la corrección del factor de potencia y filtrado de corrientes armónicas en una acería	68
3.2.7.- Compensación del factor de potencia y filtrado de corrientes armónicas con un filtro capacitivo, caso real	68
3.3.- Compensación con un compensador estático	73
3.3.1.- Principio de operación de un compensador estático	73
3.3.2.- Componentes del compensador estático	74
3.3.3.- Beneficios con este tipo de compensación	75
3.3.4.- Limitaciones de este tipo de compensación	76

CAPITULO IV

4.- DISEÑO DE UN FILTRO DE ABSORCIÓN DE CORRIENTES ARMONICAS PARA UN HORNO DE ARCO ELECTRICO DE 27, 000 KVA, 13.8 KV, 3F, 60 Hz	77
Introducción	78
4.1.- Valores nominales del sistema eléctrico del horno	78
4.2.- Emisión de corrientes armónicas durante la operación del horno	79
4.3.- Determinación del tamaño del filtro en KVAR's totales	80
4.4.- Arreglo y configuración general del filtro	81
4.5.- Procedimiento de diseño de filtros de absorción de corrientes armónicas, para hornos de arco eléctrico de fundición de acero	82
4.5.1.- Cálculo de los parámetros eléctricos de una sección de filtrado n	85

4.6.- Diseño de un filtro de absorción de corrientes armónicas de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F, 60 Hz, con secciones de filtrado de 2ª, 3ª y 4ª armónica, para el horno de arco de 27, 000 KVA, 13.8 KV, 3F	87
4.6.1.- Cálculo de los parámetros eléctricos de la sección de 2ª armónica	87
4.6.2.- Calculo de los parámetros eléctricos de la sección de 3ª armónica	96
4.6.3.- Calculo de los parámetros eléctricos de la sección de 4ª armónica	99
4.6.4.- Potencia reactiva y corriente, a frecuencia fundamental del filtro	102
4.7- Especificación de los componentes del filtro de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F,60 Hz	103
4.7.1.- Capacitores	103
4.7.2.- Reactores	104
4.7.3.- Fusibles de potencia tipo expulsión para protección individual	105
4.7.4.- Equipo de protección por desbalance del neutro	109
4.7.5.- Equipo de protección general	113
4.7.6.- Cuchilla de aislamiento de operación sin carga	114
4.7.7.- Equipo de conexión y desconexión con carga (en vacío)	115
4.8 – Diagramas y planos eléctricos del filtro de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F, 60 Hz	116
4.8.1.- Diagrama unifilar general	117
4.8.2.- Diagrama de protecciones	118
4.8.3.- Diagramas de control	119
4.9.- Lista de los principales materiales del filtro de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F, 60 Hz	129

CAPITULO V

5.- COMPROBACION DE RESULTADOS, A TRAVES DE MEDICIONES DE CAMPO TOMADAS EN UN CASO REAL	131
Introducción	132
5.1.- Contenido de las mediciones eléctricas que se analizarán, en cada caso de operación del horno	133
5.2.- Mediciones eléctricas efectuadas durante la operación del horno sin equipo de compensación	134
5.3.- Mediciones eléctricas efectuadas durante la operación del horno con un banco de capacitores	139
5.4.- Mediciones eléctricas efectuadas durante la operación del horno con el filtro de absorción de corrientes armónicas, cuyo diseño es motivo de esta tesis	144
5.5.- Evaluación de los resultados	149
CONCLUSIONES	153

ANEXO A
FUSIBLES DE POTENCIA TIPO EXPULSIÓN PARA LA PROTECCIÓN
INDIVIDUAL DE LOS CAPACITORES DE UNA SECCIÓN DE FILTRADO 155

ANEXO B
SOBREVOLTAJE EN LOS CAPACITORES DE UNA SECCIÓN DE FILTRADO
CONECTADA EN ESTRELLA CON NEUTRO FLOTANTE Y LA CORRIENTE
DEL NEUTRO, QUE PROVOCA LA FALLA DE UNO O MAS DE SUS
CAPACITORES CAPACITORES UNITARIOS 161

ANEXO C
FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRAN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UN
FILTRO DE ABSORCIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS DE 14,404 KVAR,
13.8 KV, 3F, 60 Hz, OBJETO DE DISEÑO EN LA PRESENTE TESIS 171

BIBLIOGRAFÍA 188

OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene por objeto mostrar el diseño de un filtro de absorción de corrientes armónicas capacitivo, aplicado a la compensación del factor de potencia y el filtrado de corrientes armónicas en un horno de arco eléctrico, para fundición de acero, de 27 MVA, a 13.8 kV, 60 Hz.

Se explican los criterios de diseño del filtro y la metodología a seguir para el cálculo completo del mismo y la selección de sus componentes. Además de consideraciones teóricas, se presentan también criterios de diseño basados en la experiencia. Este trabajo se realizó con objeto de que sirva como instrumento de divulgación tecnológica, para los practicantes de la Ingeniería Eléctrica, en general y, especialmente, para los ingenieros de la industria siderúrgica.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Uno de los recursos esenciales para las sociedades contemporáneas es la energía eléctrica y de la falta o disponibilidad de éste recurso, depende su nivel de desarrollo y de autonomía. Para su buen aprovechamiento, se necesita que dicho recurso sea de buena calidad, de lo contrario, una buena parte del mismo se perderá, sin producir trabajo.

En México, el gobierno ha empezado a tomar medidas en cuanto a mejorar la calidad de la energía eléctrica, al exigir a los usuarios modernizar sus instalaciones, con equipos que permitan reducir el desperdicio de energía eléctrica y minimicen disturbios eléctricos, dañinos para el sistema eléctrico de la compañía suministradora y sus clientes.

Uno de los grandes consumidores de energía eléctrica en alta, media y baja tensión, es la industria metalúrgica. Ésta industria agrupa a las distintas operaciones que tienen por objeto: extraer metales a partir de minerales, elaborar aleaciones a partir de los metales extraídos y, dar tratamientos químicos, térmicos y mecánicos a dichos metales o aleaciones.

Al conjunto de operaciones efectuadas para fabricar aleaciones a base de hierro, se le denomina Siderurgia, cuyo objeto esencial, es la obtención de aceros. Para esto, prácticamente toda la industria siderúrgica actual utiliza hornos de arco eléctrico, ya que éstos equipos permiten fabricar aceros de alta calidad de manera rápida, limpia para el medio ambiente y con un bajo costo económico.

El horno de arco eléctrico, para su operación, requiere del consumo de energía eléctrica para trasformarla en energía calorífica por medio de intensos arcos voltaicos y así de esta manera fundir chatarra metálica o arrabio con que se fabrica el acero. La energía eléctrica que demanda un horno de arco durante su operación, se divide en energía activa y en energía reactiva. La primera de estas energías, es proporcionada en prácticamente todos los casos por la compañía eléctrica suministradora, mientras que la segunda energía, de acuerdo a la normatividad vigente en México, debe ser suministrada en su mayor parte por el usuario. Esto último se cuantifica por medio del factor de potencia, cuya definición se proporciona en el capítulo correspondiente, del presente trabajo. En general, a medida que el valor del factor de potencia tiende a la unidad la demanda de energía reactiva proveniente de la compañía eléctrica suministradora es cada vez menor, y viceversa.

Por otra parte, el horno de arco durante su operación genera una amplia variedad de disturbios eléctricos, que desde el punto de vista de la calidad de la energía eléctrica, son las corrientes armónicas uno de los disturbios eléctricos más dañinos, para los equipos de otros procesos de la acería, para los equipos de plantas vecinas e incluso para los equipos de otros usuarios localizados a grandes distancias (cientos de kilómetros) del foco emisor, el horno de arco.

Para mantener el factor de potencia a un valor próximo a la unidad, durante la operación de un horno de arco y reducir a valores no dañinos las corrientes armónicas emitidas durante su operación, el equipo más utilizado en la actualidad es el filtro de absorción de corrientes armónicas.

La información escrita, sobre filtros de absorción de corrientes armónicas y compensación del factor de potencia para hornos de arco eléctrico, es muy escasa y la existente aborda el tema de manera somera. Si bien el aspecto teórico de los filtros de absorción de corrientes armónicas podría

considerarse como algo ya divulgado (aunque poco conocido en la práctica por compañías de ingeniería e ingenieros responsables de la operación de hornos de arco para fundición de acero), el aspecto de “know how” (criterios de diseño) ha sido muy poco divulgado, porque se reserva como propiedad de cada una de las pocas empresas poseedoras de tecnología confiable, a nivel mundial, que ofrecen al mercado de plantas siderúrgicas este tipo de producto: el filtro de absorción de corrientes armónicas y compensación de potencia reactiva del horno.

CAPITULO I

1.- HORNO DE ARCO ELECTRICO: DESCRIPCION GENERAL Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Introducción

En los últimos años del siglo XIX, los aceros finos de alta calidad para herramientas y otros usos especiales se fabricaban exclusivamente en hornos de crisol.

Como los crisoles se manipulaban a mano y eran de pequeña capacidad (unos 30 Kg. cada uno), en ocasiones, cuando se deseaba fabricar lingotes de gran tamaño, había que emplear hornos capaces de calentar 30, 50 ó 100 crisoles a la vez. Pero, como la fabricación de acero en hornos de crisol exigía mucha mano de obra y además no se vislumbraba la posibilidad de poder aumentar sensiblemente su capacidad de producción, había un gran interés en desarrollar nuevos procedimientos.

Uno de los problemas más difíciles de resolver en aquellos años era el alcanzar en los hornos muy altas temperaturas, del orden de 1650 °C. Debido al gran desarrollo que alcanzó la electricidad a finales del siglo XIX, se pensaba que el arco eléctrico que produce temperaturas elevadísimas, superiores a 3000 °C, quizá se podría utilizar para ese fin.

Los primeros experimentos, utilizando electricidad en la fabricación de metales, datan del año 1810, en Inglaterra, cuando Sir Humphry Davy, empleando la corriente eléctrica, fabricó por primera vez, metales alcalinotérreos por electrolisis y también fue el primero que empleó el arco eléctrico para la extracción y fusión de metales.

En los años siguientes, tanto en Inglaterra, como en Francia, Alemania e Italia entre otros países, continuaron los experimentos. En Alemania, en el año 1870, los hermanos Werner y William Siemens comenzaron sus trabajos para aplicar la electricidad a la metalurgia y en el año 1878, William Siemens patentó el primer horno eléctrico de arco con electrodos horizontales para fabricar acero (figura 1.1) y, en 1879 patentó otro segundo con dos electrodos verticales, uno superior que atravesaba la bóveda y otro inferior que atravesaba la solera del horno (figura 1.2). En ambos casos la energía eléctrica se suministraba por un dinamo.

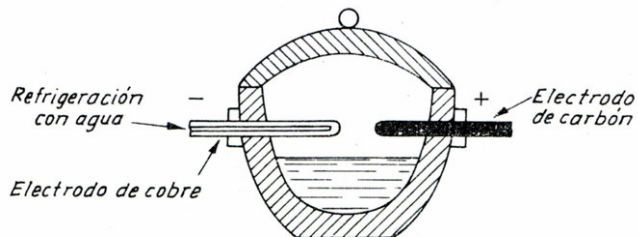


Figura 1.1.- Horno eléctrico Siemens de arco con electrodos horizontales.*

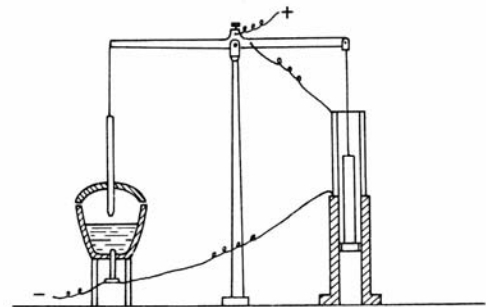


Figura 1.2.- Horno eléctrico Siemens de arco con electrodos verticales.*

* Imágenes tomadas del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, tomo II. José Praiz Barreiro.

En Francia, Paúl Heroult, que había descubierto en el año 1886 el procedimiento de fabricación de aluminio por electrolisis ígnea de alúmina, que lleva su nombre, derivó su atención hacia aplicaciones más amplias de la electrometalurgia. En un principio Heroult se especializó en la construcción de hornos para fabricar ferroaleaciones y carburo de calcio, que eran simples hornos eléctricos de arco fijos, con un electrodo vertical y solera conductora (figura 1.3).

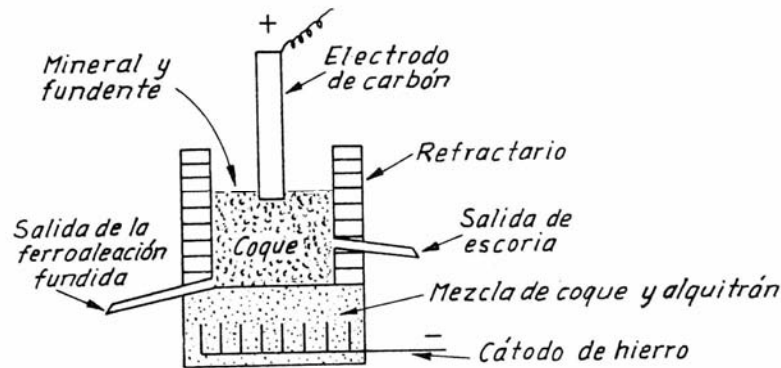


Figura 1.3.- Horno Heroult de solera conductora para fabricar ferroaleaciones (imagen tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, tomo II, José Apraiz Barreiro)

Luego comenzó a interesarse por la fabricación de acero y, modificando un poco el horno para ferroaleaciones, obtuvo por primera vez industrialmente acero en un horno de arco eléctrico en el año 1900. En 1901 mejora el horno, haciéndolo basculante en vez de fijo para facilitar la salida del acero y la separación de la escoria.

En los primeros hornos eléctricos de Siemens y Heroult, y en la mayoría de los que luego se han utilizado en el siglo XX, el calor necesario en la operación es suministrado por el arco que salta entre los electrodos y la chatarra.

De los diferentes y numerosos tipos de hornos eléctricos que se construyeron y ensayaron en los últimos años del siglo XIX, para fabricar acero, solamente el horno ideado por Heroult con tres electrodos verticales ha tenido universal aceptación. Todos los hornos eléctricos de arco que se utilizan en la actualidad son muy similares a los primeros construidos por Heroult en aquellos años. En la actualidad, los hornos eléctricos de arco tienen tres electrodos verticales y el arco salta sobre aquéllos y la chatarra.

Los hornos eléctricos de arco, a partir de los primeros años del siglo XX, sustituyeron rápidamente a los hornos de crisol, que para los años cincuenta quedaron completamente abandonados. Estas primeras versiones, estaban limitadas en tamaño y potencia, debido básicamente a las dificultades para suministrar energía eléctrica en grandes cantidades y a la falta de electrodos de calidad. A lo largo de la década de los años cincuenta, estos inconvenientes habían sido superados, lo que permitió fabricar hornos cada vez de mayor capacidad, iniciándose así su expansión.

Las figuras 1.4 y 1.5, muestran dos de los primeros hornos de arco con tres electrodos, cuyas características son muy similares a los del horno mostrado en la figura 1.6, que es uno de los hornos utilizados actualmente en la industria siderúrgica.

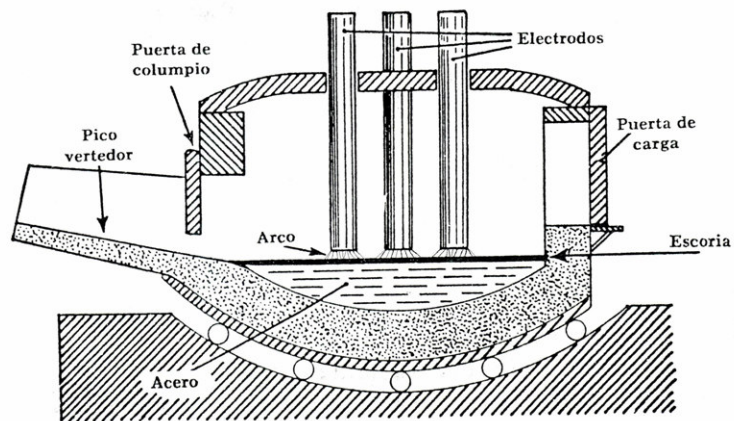


Figura 1.4.- Horno Heroult de arco eléctrico (imagen tomada del libro: Fabricación de Hierro Aceros y fundiciones, tomo II. José Apraiz Barreiro)

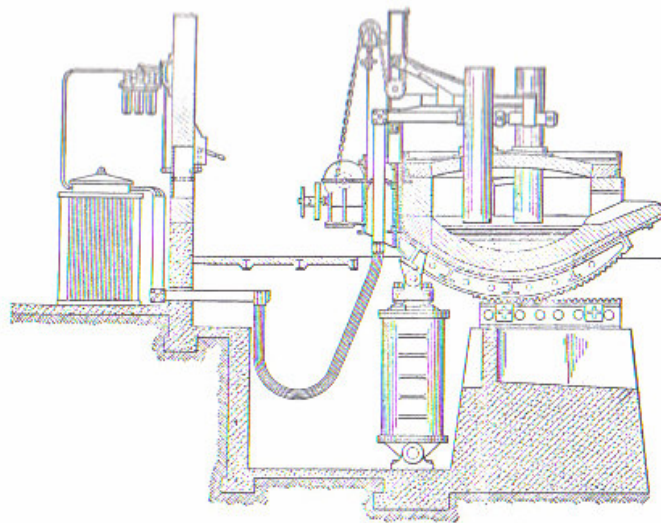


Figura 1.5.- Horno Heroult de tres electrodos (imagen tomada del libro: Fabricación de Hierro Aceros y fundiciones, tomo II. José Apraiz Barreiro).

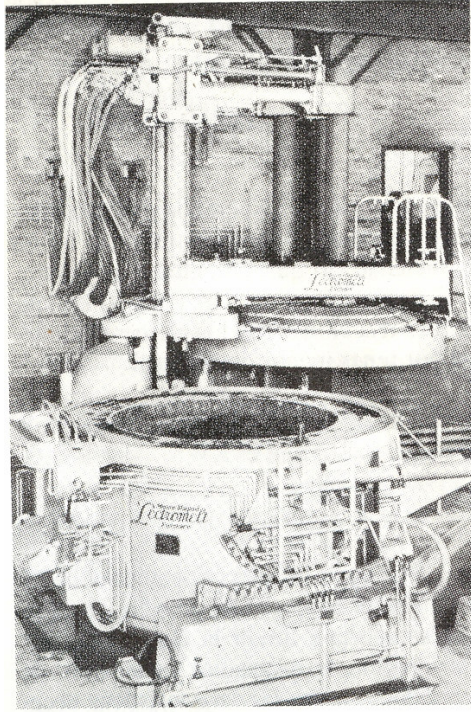


Figura 1.6.- Horno de arco eléctrico típico empleado en la industria siderúrgica, actual (imagen tomada del libro: Hornos para fundir metales y sus aleaciones, José Maria de la Poza Lleida)

1.1.- Clasificación de hornos de arco, de acuerdo al refractario empleado

Los hornos de arco, de acuerdo con la clase de revestimiento empleado, se clasifican en los siguientes grupos:

- Hornos básicos, que son los mas importantes y también los mas empleados para fabricar aceros de calidad, y en los que la solera se prepara con magnesia o dolomía.
- Hornos ácidos, en los que la solera es de arena siliciosa. Se emplean mucho menos que los anteriores y se usan casi exclusivamente para fabricar piezas de acero moldeado.

En todos los hornos eléctricos básicos, la bóveda y la parte superior de las paredes que no están en contacto con el baño se construyen generalmente, con ladrillos refractarios altos en alúmina ($Al_2O_3 > 70\%$). Ver figura 1.6.

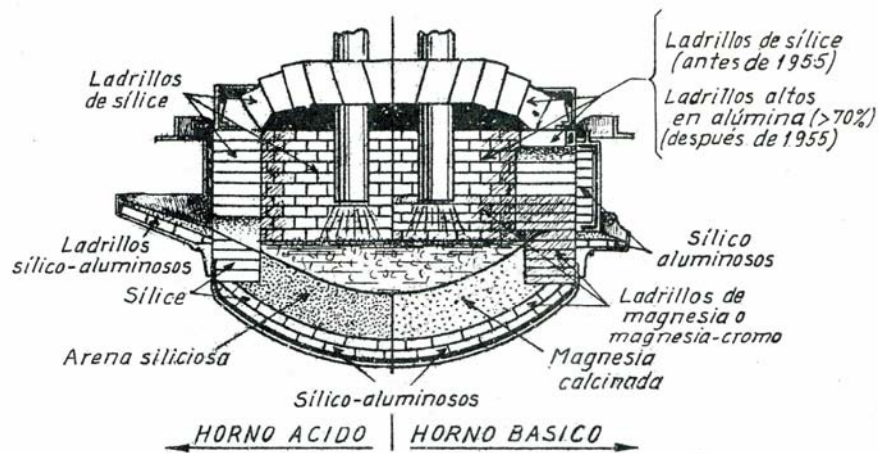


Figura 1.7.- Diferentes calidades de refractarios utilizados en hornos de arco, ácidos y básicos (figura tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, José Apraiz Barreiro)

Por otra parte, los hornos de arco se han empleado en la fusión de metales ferrosos bajo las siguientes formas:

- Hornos de acción indirecta, en los que el arco salta entre dos electrodos situados encima del baño y sin atravesar el metal (horno de arco libre).
- Hornos de acción directa, en los que el arco salta de uno a otro electrodo pasando a través del baño.

1.2.- Generalidades sobre el funcionamiento de un horno de arco

La finalidad del horno de arco es producir acero, usando energía eléctrica que convierte en energía calorífica para la fundición, a través de intensas descargas eléctricas en forma de arcos voltaicos (comúnmente conocidos como arcos eléctricos). Por medio del arco voltaico, es posible conseguir una temperatura extraordinariamente elevada (mas de 3,000 °C), haciendo pasar una corriente eléctrica a través de la chatarra metálica ó arrabio (que es la materia prima con que se fabrica el acero) que se comporta como una resistencia situada entre dos a más electrodos.

El arco eléctrico, se genera cuando rigidez dieléctrica del medio aislante (aire) que separa a un electrodo de la chatarra se anula (electrodos y chatarra prácticamente en contacto), entonces el circuito trifásico de potencia se cierra, y la corriente fluye. Cuando los electrodos suben o no están en contacto con la carga metálica, el circuito de potencia se abre, y la corriente deja de fluir. Durante el tiempo de la descarga se produce una luminosidad muy intensa y un gran desprendimiento de calor.

El horno de arco eléctrico es utilizado para la fabricación de todo tipo de aceros, desde aceros con bajo contenido en carbono hasta aceros de alta aleación a partir de chatarra o materiales ferrosos con bajo o alto contenido de carbono. El tipo más conocido de esta clase de hornos, es el horno de Heroult, que consiste esencialmente de un crisol, tres electrodos y un transformador de potencia, diseñado especialmente para soportar la generación de los arcos eléctricos entre cada fases, a este transformador usualmente se el conoce como transformador del horno.

Los procesos llevados a cabo en una planta acerera son básicamente dos: el primero de ellos es el de fundición, en el que se realiza la fundición total de la chatarra con que se alimenta el horno de arco, a través de varias recargas de chatarra sucesivas, y el segundo, es el proceso de afino, en él cual se aportan minerales a la fundición, que hacen que el acero cumpla con una especificación determinada. Al concluir dichos procesos, se inicia un tercer proceso denominado colada del acero, consistente en la extracción del acero ya aleado, para darle forma de barras o de tochos, que se llevarán a sucesivos procesos de laminación, extrusión y otros.

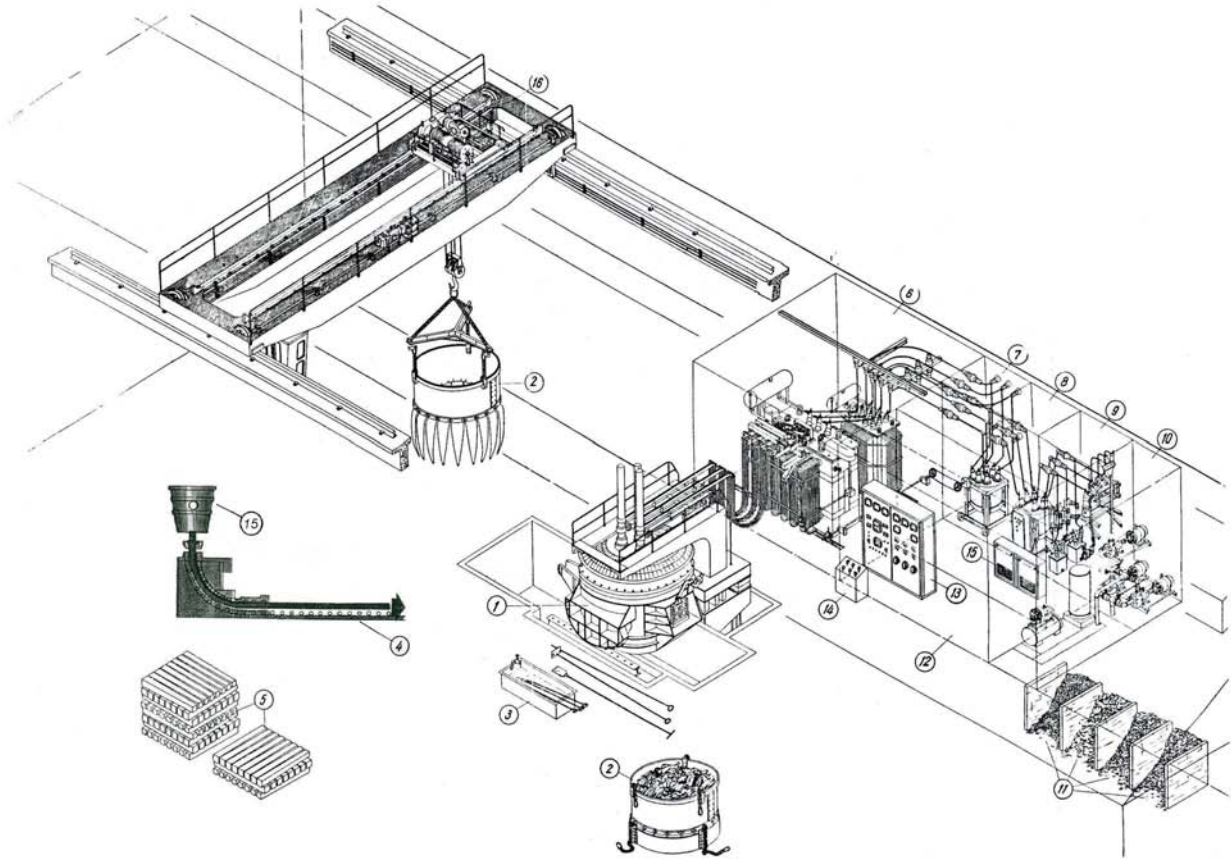
1.3.- Descripción de la instalación de una acería con un horno de arco

Las acerías suelen estar constituidas por una nave principal de gran tamaño y otras más pequeñas. En la principal se encuentran instalados el horno y el pozo de colada. La nave debe ser de suficiente altura para instalar grúas para la colada del acero y para el movimiento de las cargas de materias primas, de cucharas y lingoteras, colocación de electrodos en los hornos, etcétera.

Los transformadores y otros elementos auxiliares (desconectores, contactores, interruptores, etc.) se colocan en naves laterales. El parque de chatarra suele estar situado junto a la nave de hornos. Con esta disposición se facilita mucho del movimiento de la chatarra, materiales refractarios, cuchara con el acero líquido, lingotes de acero, etc.

Para las cargas de los hornos se utilizan generalmente cestas especiales que deben de introducirse en los hornos por arriba después de retirar la bóveda. La colada se hace en la zona donde se dispone del pozo de colada, cuyas grúas manipulan las cucharas, lingotes y, cuelan el acero líquido de la cuchara en la maquina de colada continua.

La figura 1.8, muestra una acería con horno de arco eléctrico, cuyos componentes se listan a continuación:



COMPONENTES DE LA ACERIA	
REF.	DESCRIPCION
1	Horno eléctrico, con accionamientos hidraulicos para elevar y girar la bóveda y para el basculamiento.Regulación de electrodos magneto-hidráulica.
2	Cesta de carga preparada sobre su base de protección
3	Enfriadero para el herramental del horno
4	Maquina de colada continua
5	Tochos (barras de acero) preparados
6	Caseta con transformador del horno y la bobina de reactancia
7	Celda del interruptor y de la reactancia con mando a distancia por volante
8	Interruptor principal de alta tensión
9	Celda de medida conteniendo los transformadores de medida de alta tensión
10	Celda de medida conteniendo los transformadores de medida de alta tensión
11	Silos para adiciones
12	Tablero general de mando y control
13	Pupitre conteniendo los mandos hidráulicos para elevación de la bóveda y vuelco del horno, así como los mandos neumáticos para las pinzas de los electrodos.
15	Cuchara equipada con valvula en la base, para regular la cantidad de acero a verter en el molde de colada continua.

Figura 1.8.- Esquema de una acería con horno de arco eléctrico (figura tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, tomo II, José Apraiz Barreiro)

1.4.-Componentes del horno, propiamente dicho

A la estructura donde se efectúa la fabricación del acero, es a la que usualmente se le conoce como horno de arco y consiste de los siguientes componentes esenciales.

- a) Crisol o cuba
- b) Solera
- c) Paredes
- d) Bóveda
- e) Electrodo
- f) Mecanismo de basculación

a) Crisol o cuba

Se construye con un revestimiento de chapa de acero dulce, soldada, revestida interiormente con un material refractario. Es básicamente un recipiente donde se deposita el metal a fundir, esta provisto de dos puertas, una de ellas, se usa para vigilancia de la colada y para la adición de los elementos formadores de escoria, elementos de aleación y desoxidantes. La otra es un canal o piqueta de colada, a través del cual sale el acero que se cuela en la cuchara, cuando se bascula (inclina) el horno. Ver figura 1.9.

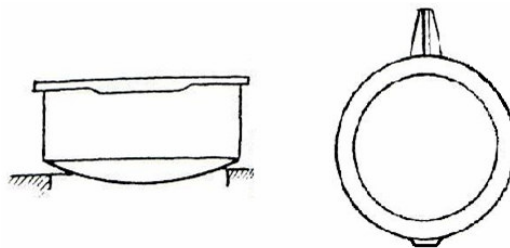


Figura 1.9.- Esquema general de un crisol, vistas lateral y superior

En seguida se describen los componentes que integran al crisol

- Solera

En los hornos básicos la solera, que suele tener de 400 a 700 mm de espesor, se prepara siempre con material básico. Puede ser de dolomía de fina granulometría, apisonada en seco, o de dolomía alquitranada o polvo de magnesia fuertemente apisonada. De todas formas, siempre debajo de la dolomía o de la magnesia hay un revestimiento de seguridad de ladrillos de magnesia (figura 1.10). En los hornos ácidos, la solera se prepara con arena de sílice.

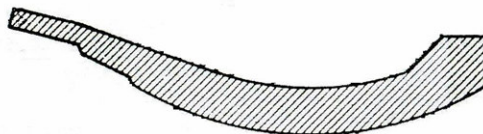


Figura 1.10.- Vista lateral de la solera

- Paredes

Para su fabricación, se emplean ladrillos de magnesia o de magnesia-cromo, ladrillos de dolomía y bloques apisonados de dolomía.

En la zona de la escoria se suelen utilizar ladrillos de magnesia que son los que mejor resisten el ataque químico de las escorias de óxido de hierro, en la parte de la piqueta de colada, se emplean materiales electrofundidos de alto contenido en alúmina. Ver figura 1.11.

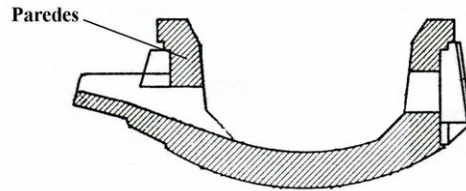


Figura 1.11.- Paredes (construidas a partir de sobre los bordes de la solera)

- Bóveda

Se construye con ladrillos refractarios con alto contenido en alúmina ($Al_2 O_3$) de formas especiales sobre un anillo metálico generalmente refrigerado, que luego se apoya sobre la cuba. Suele tener cuatro agujeros, tres de los cuales son simétricos para que, a través de ellos pasen los electrodos, el cuarto agujero es utilizado para la extracción de gases que van a la estación de depuración. Esta cubierta es movable, ya que la carga del horno se realiza por la parte superior del crisol. Ver figura 1.12.

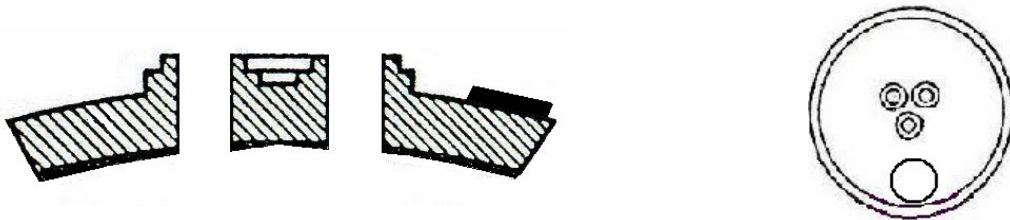


Figura 1.12.- Vista lateral y superior de la bóveda

b) Electrodo

Normalmente se emplean electrodos de grafito, cuyo diámetro varía desde 60 mm para hornos de 5 toneladas hasta 800 mm para hornos de 350 toneladas. Su longitud varía de 2 a 3 metros y se unen unos con otros, a medida que se van gastando, por medio de unas piezas troncocónicas roscadas que se colocan entre cada dos electrodos. Los electrodos se sujetan con mordazas de cobre refrigeradas por agua a unas barras horizontales, ver figura 1.13.

Este tipo de electrodos son conductores de corriente suficientemente fuertes para soportar temperaturas extremadamente altas (hasta $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$) y los cambios bruscos de esta. Son alimentados por corriente trifásica, unidos por uno de sus extremos a la instalación eléctrica (admiten densidades de corriente que varía desde $10\text{ a }40\text{ A/cm}^2$), mientras que en el otro, tras haber atravesado el techo del horno se produce el arco.

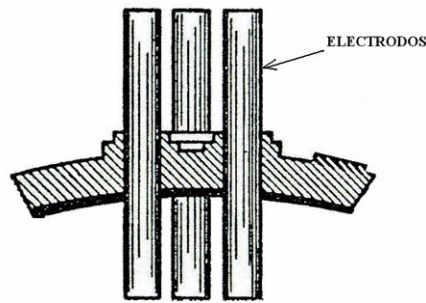


Figura 1.13.- Electrodos y solera

c) Mecanismo de basculación

Cuando la colada se ha terminado, es necesario bascular el horno para pasar el acero a la cuchara, ó para vaciar la escoria (figura 1.14). Se emplean mecanismos hidráulicos o eléctricos que, haciendo girar al horno, permiten que salga el acero a través el agujero de colada y caiga a la cuchara que se encuentra siempre a un nivel inferior. Luego, el acero se pasa de la cuchara a la maquina de colada continua.

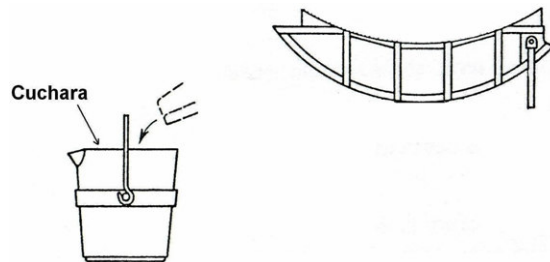


Figura 1.14.- Vista lateral del mecanismo de basculación y de la cuchara

La figura 1.15, muestra las partes descritas anteriormente, formando la estructura, comúnmente conocida como horno de arco.

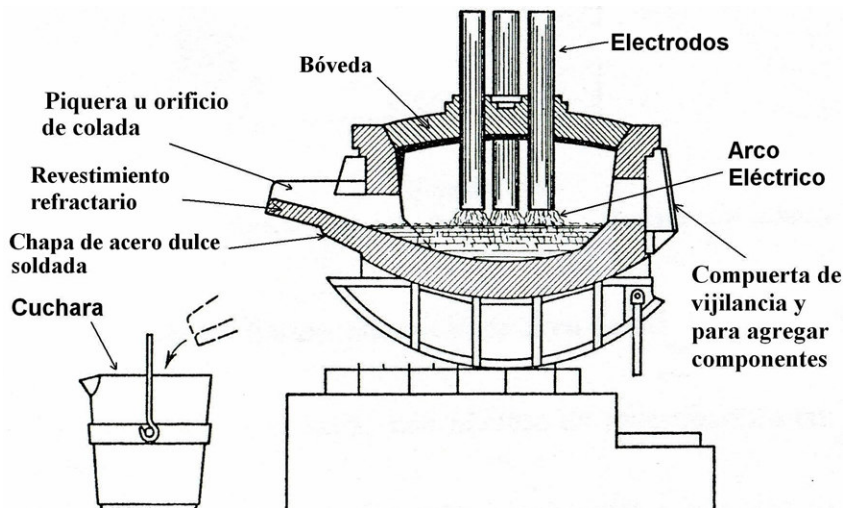


Figura 1.15.- Esquema simplificado de un horno eléctrico de arco con tres electrodos

Las figuras 1.16 y 1.17, muestran la operación de dos hornos de arco utilizados en la actualidad en la industria siderúrgica.



Figura 1.16.- Horno de arco eléctrico, de 27,000 kVA, 13.8 kV, 3F, durante su operación (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)



Figura 1.17.- Horno de arco eléctrico durante su operación (figura tomada de la página de internet: www.rhi.com)

1.5.- Componentes del sistema eléctrico del horno

Es el encargado de proporcionar al horno la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento. A continuación se enumeran los principales componentes:

- a) Subestación de alta tensión
- b) Transformador de acometida
- c) Reactancia para estabilización del arco (bobinas de inducción)
- d) Seccionadores de aislamiento de operación sin carga
- e) Interruptor con capacidad de protección por sobrecorriente y cortocircuito
- f) Equipos de conexión y desconexión con capacidad para operar con carga
- g) Equipo para la compensación de energía reactiva y reducción de disturbios eléctricos
- h) Transformador del horno

a) Subestación de alta tensión

La energía eléctrica se recibe en las acerías a alta tensión variable, generalmente 33,000 a 220,000 V. A la llegada se dispone, de una central de transformación fuera de la acería, que generalmente es propiedad del usuario, la cual baja esa alta tensión a otras más bajas (media tensión), al nivel de distribución de la acería. En esta subestación, usualmente se encuentra instalado el transformador de acometida del horno de arco.

b) Transformador de acometida

Proporciona alimentación al sistema eléctrico del horno para esto reduce la alta tensión a un nivel de tensión que suele ser de 13.8 KV, 23 KV y 33 KV. La capacidad en KVA de este transformador depende de la capacidad del horno a instalar.

c) Reactancia para estabilización del arco

El objeto de las bobinas de inducción es aumentar la impedancia del circuito, para estabilizar el nivel de voltaje del sistema eléctrico del horno, durante la generación del arco voltaico. Así también, se logra limitar y regular las fluctuaciones instantáneas de la corriente, que demanda el arco voltaico

d) Seccionadores de aislamiento de operación sin carga

Sirven para aislar alguna sección del sistema eléctrico del horno o el sistema eléctrico en su totalidad, de la red exterior de alta tensión. De esta forma, se puede trabajar con seguridad en caso de reparaciones, averías, etc. El seccionador suele ser de cuchillas simples, accionadas manualmente por medio de una pértiga o por un mecanismo de accionamiento. El accionamiento de éstos equipos, se debe efectuar, únicamente cuando el horno de arco, se encuentre desenergizado junto con cualquier otra carga o equipo de compensación del factor de potencia, que este conectado al sistema eléctrico de dicho horno.

e) Interruptor con capacidad de protección por sobrecorriente y cortocircuito

Son aparatos que interrumpen automáticamente el paso de la corriente, cuando esta alcanza valores peligrosos o cuando se presenta un evento de cortocircuito. A diferencia del seccionador que acciona sólo de tarde en tarde el interruptor actúa con mucha más frecuencia, en los casos en que por causas imprevistas hay corrientes anormales en el circuito (suelen presentarse corrientes cuyo valor es de unas cuatro veces el valor de la corriente nominal).

Suele emplearse uno en el lado primario y otro en el lado secundario del transformador de acometida. Además de las funciones antes mencionadas también sirven como medios de conexión del transformador de acometida y del transformador del horno.

El valor de la impedancia de las bobinas se puede regular durante el proceso, sobre todo cuando a partir de la fusión de la carga conviene disminuir la tensión de trabajo.

f) Equipo para la compensación del factor de potencia y reducción de disturbios eléctricos

El filtro de absorción de corrientes armónicas capacitivo, es actualmente, el equipo más utilizado para compensar el factor de potencia y filtrar corrientes armónicas emitidas por la operación del horno. Este equipo se describe ampliamente en el capítulo tres del presente trabajo.

g) Equipo de conexión y desconexión con capacidad para operar con carga

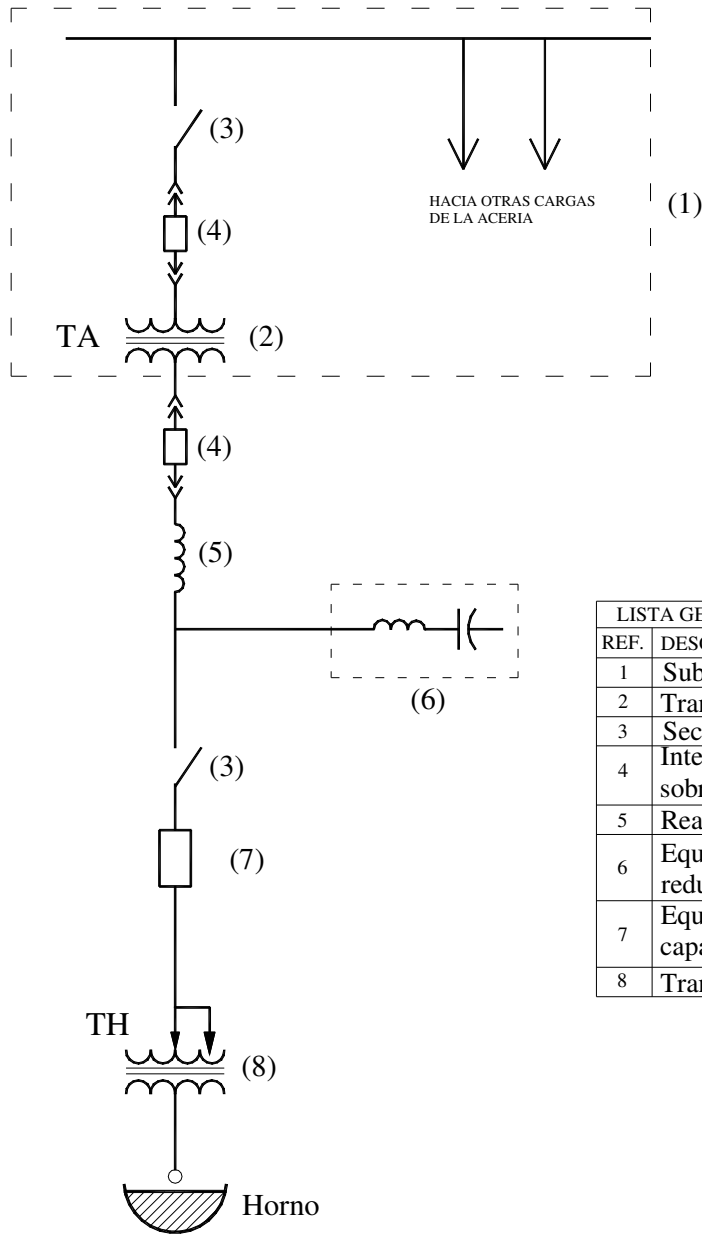
Conectan y desconectan al transformador del horno varias veces por día, debido a que al realizar ciertas maniobras en el horno, se requiere que no exista un potencial entre los electrodos. Los contactores en vacío, son los más utilizados para este fin, ya que están diseñados para soportar miles de maniobras de conexión y desconexión.

h) Transformador del horno

En las proximidades del horno se encuentra el transformador principal del mismo con sus elementos complementarios. Es una parte muy importante de la instalación, ya que debe alimentar adecuadamente al horno eléctrico, durante las distintas fases de operación. Se emplean las mayores potencias para la fusión y luego, una vez fundida la carga, se emplean menores.

La alimentación en su lado primarios suele hacerse a 13800 ó a 33,000 V, y a la salida hay varias tomas con voltajes variables de 80 a 500 V, que son las más adecuadas para el proceso, pudiendo trabajar, por lo tanto, durante la colada con diferentes tensiones según convenga.

En la figura 1.18, se muestra un diagrama unifilar con los principales componentes del sistema eléctrico de un horno de arco, a partir de la red de alta tensión de la compañía suministradora.



LISTA GENERAL DE COMPONENTES	
REF.	DESCRIPCION
1	Subestación de alta tensión
2	Transformador de acometida
3	Seccionadores de aislamiento de operación sin carga
4	Interruptor con capacidad para protección por sobrecorriente y cortocircuito
5	Reactancia para estabilización del arco
6	Equipo de compensación del factor de potencia y reducción de disturbios eléctricos
7	Equipo de conexión y desconexión con capacidad para operar con carga
8	Transformador del horno

Figura 1.18.- Diagrama unifilar general del sistema eléctrico de un horno de arco eléctrico (imagen cortesía de TNV, Consulting Co.)

1.6.- Tablero con instrumentos medida y regulación, eléctrica

En las proximidades del horno hay dispuesto un cuadro, donde se encuentran todos los instrumentos de medida eléctricos y los mandos para actuar sobre el movimiento de los electrodos y sobre la marcha eléctrica del horno. Los instrumentos más importantes son-. Amperímetros, voltímetros, medidores de consumo de energía, conectadores, reóstatos, llaves de regulación, etc. Aunque su disposición en el cuadro varía según los fabricantes, la figura 1.19 señala una distribución de instrumentos muy utilizada.

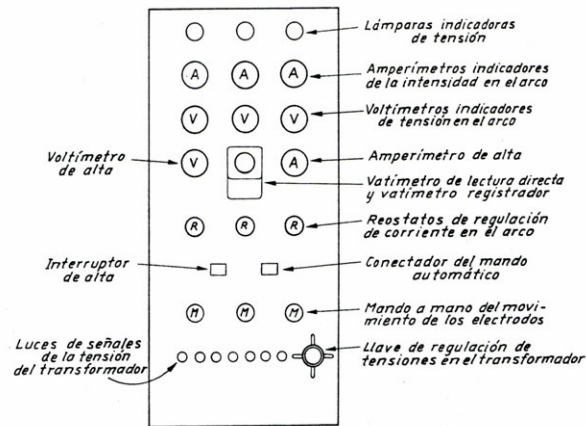


Figura 1.19.- Cuadro de instrumentos de medida y regulación (figura tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, tomo II, José Apraiz Barreiro)

La figura 1.20 muestra los puntos donde son instalados los transformadores de corriente y potencial, encargados de proporcionar muestras de corriente y voltaje, a los diferentes dispositivos del sistema de control y protección.

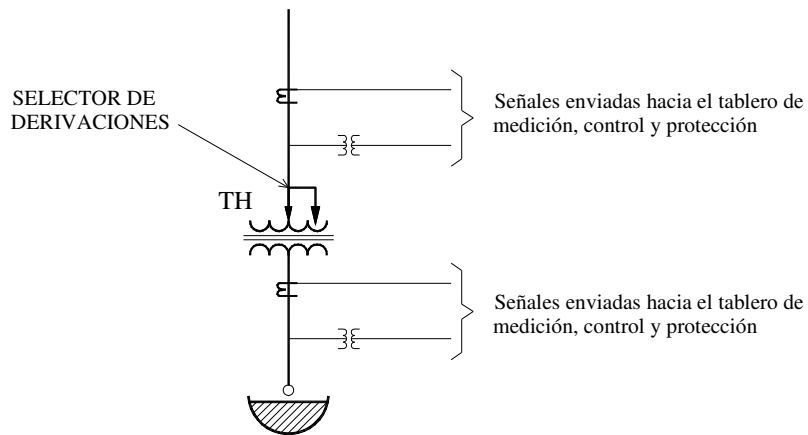


Figura 1.20.- Puntos de conexión de los transformadores de corriente y potencial.

1.7.- Sistemas auxiliares

En seguida se mencionan algunos de los sistemas auxiliares esenciales, necesarios para el funcionamiento del horno.

- a) Sistema de regulación de electrodos
- b) Sistema de enfriamiento
- c) Sistema de colada continua

a) Sistema de regulación de electrodos

Para conseguir una buena marcha de los hornos eléctricos de arco, es fundamental contar con una buena regulación de los electrodos. Durante el trabajo, varía la distancia entre los electrodos y la chatarra, o entre los electrodos y el baño, por ello, es necesario disponer de mecanismos que regulen esas distancias para conseguir uniformizar la intensidad o la potencia del arco.

En un principio, las regulaciones de los electrodos servían para igualar la corriente en cada electrodo y se utilizaban mecanismos hidráulicos. Posteriormente se construyeron regulaciones con movimientos de los electrodos por medio de motores eléctricos. En ambos casos, el mando sobre los sistemas de movimiento de los electrodos era simplemente manual y se conseguía mover verticalmente los electrodos, observando el operador, constantemente las lecturas de los amperímetros y procurando mantener un valor constante.

Las regulaciones modernas funcionan, generalmente, para conseguir una potencia constante. En función de la intensidad y la tensión actúan automáticamente por medio de los correspondientes transformadores de tensión y de intensidad sobre los circuitos auxiliares de regulación, consiguiéndose así trabajar a potencia constante.

Para conseguir en un horno de arco la fusión en el tiempo mas corto posible, se ha de trabajar en el horno con una intensidad en el circuito que dé la máxima potencia en el arco. Esta intensidad se llama intensidad óptima, y un aumento o una disminución de la misma origina un decrecimiento de la potencia del arco.

b) Sistema de enfriamiento

Consiste en hacer circular agua, en el interior o exterior según sea el caso, de los componentes expuestos al calor generado por el arco eléctrico, o por la circulación de grandes cantidades de corriente. Con esto se evita que se dañen las partes metálicas del la cuba, bóveda, mordazas de los electrodos, cables, etc.;

c) Sistema de colada continua

Una vez elaborado el acero se transporta en la cuchara al sistema de colada continua, una vez ahí, se vierte el acero desde la cuchara de colada a una artesana intermedia y de ésta pasa el acero liquido de una manera continua e ininterrumpida a unos moldes de cobre sin fondo refrigerados con agua, cuyo hueco central tiene el mismo perfil que se desea obtener. Estos moldes están sometidos a un rápido movimiento vertical de oscilación que facilita el desplazamiento del acero solidificado.

Como los moldes de cobre son abiertos por la parte inferior, al iniciarse la colada es necesario colocar un tope o cabeza móvil (sujeto por abajo con una larga barra vertical llamada falsa barra), que sirve para cerrar la salida del molde y evitar el escape del acero fundido que se cuele en la lingotera.

El acero se solidifica al caer sobre el tope colocado en el interior del molde y el tope se pone en movimiento luego, en el momento oportuno, para que la acumulación y altura del acero fundido en la lingotera sean las adecuadas.

La solidificación de la palanquilla de acero en el molde metálico refrigerado con agua comienza por el exterior y no es completa en la zona interna hasta el cabo de un corto tiempo. Cuando la barra sale del molde, contiene metal fundido en el interior y entonces está constituida por una costra o piel exterior, ya solidificada, y por una zona central donde el acero se encuentra todavía en estado líquido.

La solidificación de la parte central o corazón de la barra se completa fuera del molde por la acción de gran cantidad de agua pulverizada a presión. Esta fase de la operación recibe el nombre de refrigeración secundaria.

Esta refrigeración secundaria, que se realiza con chorros de agua, suele terminar un poco antes de que todo el acero del interior de la barra se haya solidificado y, entonces, comienza el enfriamiento al aire. La barra no se pone en contacto con el mecanismo de arrastre constituido por los rodillos conductores hasta que la solidificación en el interior es completa. En las coladas continuas curvas, los rodillos enderezadores son a la vez rodillos de arrastre.

La figura 1.21 muestra un esquema simplificado de una máquina de colada continua, la figura 1.21a muestra el proceso de vaciado del acero (por la parte inferior de la cuchara) al depósito dosificador de la máquina de colada continua, la figura 1.21 b, muestra el proceso de vaciado del acero (por la parte inferior de dicho depósito dosificador) a los moldes de la máquina de colada continua, la figura 1.21c, muestra la cámara de enfriamiento de la máquina de colada continua y la figura 1.21d, muestra las barras solidificadas durante el proceso de corte.

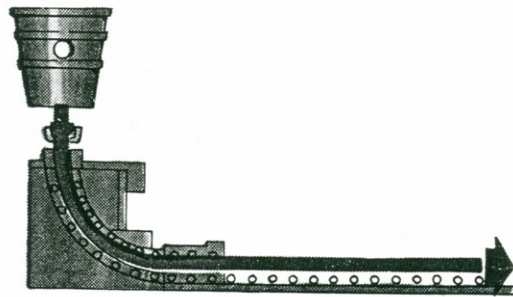


Figura 1.21.- Esquema simplificado de la máquina de colada continúa



Figura 1.21a.-Vaciado del acero al depósito dosificador de la máquina de colada continua (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la Siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)



Figura 1.21b.-Vaciado del acero al molde de la maquina de colada continua (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la Siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)



Figura 1.21c.-Cámara de enfriamiento de la maquina de colada continua, fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la Siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)



Figura 1.21d.- Barras solidificadas durante el proceso de corte (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la Siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)

1.8.- Principales procesos efectuados durante un ciclo de fundición del horno de arco eléctrico

En los hornos de arco eléctrico básico, el procedimiento de doble escoria, ha sido el más clásico y más empleado en la fabricación de aceros de alta calidad o alta aleación. El ciclo de fundición inicia dejando al descubierto el crisol del horno, para esto se desplaza la bóveda mediante un mecanismo hidráulico que permite elevar y girar dicha bóveda, con objeto de poder introducir por la parte superior del crisol, la chatarra y algo de cal o caliza. Luego se vuelve a poner la bóveda en su lugar, se energizan los electrodos, se acercan a la chatarra y se genera el arco voltaico, iniciándose el proceso de fundición de la chatarra. Una vez que se ha fundido la carga de chatarra mencionada, es común agregar dos o tres recargas, más de chatarra. En la figura 1.22a, se observa el depósito de chatarra, en la figura 1.22b, se observa la cesta (cargada con chatarra) siendo transportada por una grúa viajera, y en la figura 1.22c, se observa la misma cesta vaciando su contenido de chatarra al crisol del horno.



Figura 1.22a.- Depósito de chatarra, al fondo se observa el colector de polvos (imagen tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Cordoba Ver.)



Figura 1.22b.- Cesta siendo transportada por una grúa viajera (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)



Figura 1.22c.- Cesta vaciando la chatarra al crisol del horno (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)

En términos generales, durante un ciclo de fundición se efectúan dos procesos, al primero de ellos se le denomina proceso de fundición, mientras que al segundo, usualmente se le denomina proceso de afino. Al concluir dichos procesos, del ciclo de fundición, se inicia con otro proceso denominado colada del acero.

1.8.1.- Proceso de fundición

El proceso de fundición, consiste en fundir por completo una carga de chatarra y dos o tres recargas más. Durante la fundición de la carga de chatarra (primer cesta, agregada al crisol), hay una gran oscilación y movimiento de los electrodos, debido a que el salto del arco entre los electrodos y la chatarra es irregular, ya que la chatarra, al fundir, deja espacios vacíos debajo de los electrodos. Continuamente funciona el regulador, que actúa automáticamente sobre los electrodos haciéndoles subir y bajar para mantener todo el tiempo cebado el arco y con la intensidad conveniente, de forma que los electrodos estén siempre separados de la chatarra a la distancia adecuada para la buena marcha del proceso.

En cuanto se observa que hay acero fundido debajo de los electrodos formando un pequeño charco, debe añadirse una pequeña cantidad de cal o caliza para cubrir superficialmente el baño metálico. A partir de ese momento, el movimiento de los electrodos es más regular que al principio y se suele incrementar entonces el mayor voltaje, que suele variar desde 160 V en los hornos pequeños, hasta 250V, 300V y 500V en los grandes, para que se efectúe la fusión en el menor tiempo posible.

Para la etapa de fundición, de la primer recarga (segunda cesta de chatarra que se vacía al crisol), tanto la operación de los electrodos como el arco eléctrico tienden a estabilizarse. Debido a que en esos momentos, ya se cuenta con un charco de metal fundido en el crisol, cuyo calor irradiado ayuda a fundir la chatarra de la recarga mencionada y así, sucesivamente con las siguientes recargas. La figura 1.22, muestra un horno de arco durante el proceso de fundición.



Figura 1.23.- Horno de arco eléctrico durante el proceso de fundición (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)

1.8.2.- Proceso de afino

Es en éste proceso, donde se dan los tratamientos térmicos químicos al metal fundido para obtener el acero de características deseadas. Para fines prácticos a la explicación de dicho proceso, lo dividiremos en los siguientes periodos:

- a) Periodo Oxidante
- b) Periodo desoxidante

a) Periodo oxidante

Desde que se forma el primer charco de metal fundido, el baño comienza a ser oxidado por la acción del oxígeno del aire y del óxido de hierro que contiene la chatarra. Luego cuando todo el metal se encuentra en estado líquido, o un poco antes, se suele introducir en el horno una cierta cantidad de mineral de hierro que acentúa la oxidación de la escoria y, por lo tanto, del metal. A partir de 1950, en vez de mineral se inyecta oxígeno por medio de un tubo de hierro para acelerar la fase oxidante.

El baño comienza a trabajar o “hervir” debido a la oxidación del carbono que da lugar a un desprendimiento gaseoso de CO. Al mismo tiempo se va formando una pequeña cantidad de escoria negra con cal, un poco de sílice y óxido de hierro. Esa escoria, que cubre el baño metálico, es en realidad la que sirve, como vehículo del óxido de hierro, para la oxidación del acero durante esta fase de la operación.

Para acelerar la oxidación del baño, en los casos en que sea necesario, se añade a lo largo de esta fase pequeñas cantidades de mineral de hierro o se inyecta oxígeno. Asimismo, se hacen adiciones de cal y caliza para facilitar la formación de escoria.

En el baño metálico se oxida primero el hierro, por ser el más abundante, y luego a demás también el silicio, fósforo, manganeso, carbono y algunos otros elementos fácilmente oxidables que pueden existir en las cargas. El óxido de carbono se escapa en forma de gas y quedan los elementos óxidos de P, Si, Mn, etc., que son sólidos, mezclados entre la escoria y el baño. Estos últimos, por tener menor densidad que el acero fundido, tienden a subir a la parte superior del baño y a combinarse con la cal de la escoria, formando compuestos más o menos estables. En esta fase se elimina el fósforo en la escoria, en forma de fosfato tricálcico y tetracálcico.

Al cabo de 30-70 minutos de haber comenzado la oxidación del baño termina esta fase y se saca del horno la escoria negra oxidada, y con ella gran parte del fósforo, silicio, manganeso y otros elementos fácilmente oxidables que contenía la carga metálica. De esta forma, al final de la fase

oxidante se obtiene un baño de acero muy oxidado y de bajo contenido en carbono, manganeso, silicio y fósforo.

En esta fase es interesante destacar que el hervido facilita el desprendimiento y eliminación de gases, así como también, la eliminación del fósforo en la escoria.

La oxidación del fósforo por ser muy exotérmica, se verifica a abaja temperatura y, en gran parte, antes de que comience la oxidación del carbono, que necesita temperatura mas elevada para oxidarse.

En ocasiones, muy especiales en algunas fabricas cuando hay sospecha de que existen fuertes cantidades de fósforo o se desea efectuar muy bien la eliminación del fósforo, se procura que al principio, cuando el baño está todavía relativamente frío, haya abundante oxido de hierro para oxidar el fósforo y, además, también cal suficiente para que el anhídrido fosfórico que sube a la escoria forme rápidamente con la cal fosfatos de calcio.

Luego, antes de que se eleve demasiado la temperatura, se saca fuera del horno la escoria que se ha formado y, con ella, el fósforo queda ya completamente eliminado. Cuando se opera de esta forma (eliminación previa de una parte de la escoria oxidante), se vuelve luego a cargar más cal para formar una nueva escoria y se continúa el periodo oxidante, como antes se ha explicado. En este caso, se forman realmente dos escorias oxidantes.

Al final del periodo de afino, la escoria oxidante negra y espesa que cubre el baño es eliminada (el sistema de basculación inclina el horno y la escoria sale por una de las aberturas) y queda desnudo el baño metálico muy oxidado, con muy bajos porcentajes de C, Mn, Si y P. En la siguiente fase (periodo desoxidante) de trabajo, esa primera escoria oxidada es remplazada por la segunda escoria reductora. Esta posibilidad de cambio de carácter de la escoria es una de las principales características y ventajas de este proceso de fabricación de acero.

b) Periodo desoxidante

En este periodo de trabajo es bastante empírico, y en las acerías se emplean métodos, sistemas y técnicas bastante variables de unos casos a otros. En todos los casos, sin embargo, se cubre el baño con una escoria desoxidante preparada fundamentalmente con tres partes de cal y una de espato flúor, a la que se le añade como elemento desoxidante generalmente una parte de coque o grafito. A veces se añade un poco de carburo de calcio o silicocalcio y también, en algunos casos muy especiales, se suele añadir una pequeña cantidad de ferrosilicio en polvo.

En esta fase se consigue reducir una parte del contenido inicial de oxígeno del acero por simple contacto del baño metálico con la escoria fuertemente reductora que cubre el metal, que cuando se deja enfriar al aire tiene un color blanco característico. Esa escoria, también desulfura el baño metálico.

- Carburación del baño

Antes de hacer las adiciones de los elementos que forman la segunda escoria, se acostumbra añadir al baño desnudo coque o trozos de electrodos de grafito reducidos a tamaño de granos de arroz que realizan dos funciones. Añadido en cantidad conveniente, sirve para elevar el contenido de carbono del metal hasta una cantidad ligeramente inferior a la señalada en la especificación del acero que se desea fabricar y, además, esas adiciones, al aumentar el carbono del baño, realizan automáticamente una parcial desoxidación del baño que facilita luego la acción desoxidante de la escoria. Al tener el acero mas carbono, automáticamente baja su contenido de oxígeno.

A veces, en lugar de añadir coque, se introducen rápidamente los electrodos u momento en el baño desnudo. Sin embargo, esos dos métodos de adición de coque o de introducción de los

electrodos se realizan solo cuando se desea fabricar aceros de alto contenido en carbono, porque así se eleva el porcentaje de carbono del baño metálico y se acerca al límite deseado.

Cuando se fabrican aceros de bajo contenido en carbono, como no es necesario este aumento del contenido en carbono, se añade la segunda escoria formada generalmente con cal, espato y una limitada cantidad de coque (la mitad de la señalada anteriormente), que realizara como ya hemos dicho, una gran parte de la desoxidación del baño.

- Desoxidación parcial por adición de desoxidantes

Otro de los métodos que se sigue, en ocasiones, aunque hay fabricantes que no lo recomiendan, es el de desoxidación parcial previa, con adición de ferromanganeso, ferrosilicio o aluminio al baño desnudo antes de hacer ninguna otra adición. En este caso, el baño absorbe un porcentaje variable de manganeso o de silicio, que realizan una parcial acción desoxidante.

La adición de fuertes cantidades de desoxidantes como ferrosilicio y ferromanganeso al baño desnudo oxidado, aunque es un método de trabajo muy cómodo, no es el más recomendable. Si las adiciones de ferrosilicio se hacen después de que el baño esté suficientemente desoxidado (por contacto con la escoria reductora), es posible obtener acero de mejor calidad (más limpio), desoxidado en el mayor grado posible con la escoria, ya que ésta quita una gran parte de las impurezas (óxidos) en forma análoga a un papel secante, sin introducir otras impurezas o materias no metálicas en el baño, lo cual es una gran ventaja.

Las cantidades de ferrosilicio y ferromanganeso que se suelen añadir para realizar esa primera desoxidación inicial, suelen ser las necesarias para que el acero quede con un 30 a 60 % del silicio y manganeso que se señala en las especificaciones, haciéndose las restantes adiciones de estas ferroaleaciones cuando el proceso está más avanzado y el contenido de oxígeno del baño es muy pequeño.

- Formación de la segunda escoria

Después de realizarse la recarburación y la desoxidación parcial previa, el caso de que se haga, se añade la segunda escoria que realizará, como ya hemos dicho, una parte muy importante de la desoxidación del baño. Cualquiera que sea el método seguido al iniciar el periodo desoxidante, la segunda escoria se forma siempre, como ya se ha indicado antes, con adiciones de cal, espato flúor y un poco de coque o, en algunos casos especiales, con otros elementos desoxidantes. El peso total de la escoria reductora que se añade al baño es de 2 a 3.5 % del acero, dependiendo del tamaño del horno y de la superficie del baño. La mitad del peso de la escoria se suele añadir al principio y el resto luego, en intervalos sucesivos. El peso de la escoria oxidante es aproximadamente el 10 % del peso del acero. La figura 1.24, resume las principales fases de operación mencionadas anteriormente.

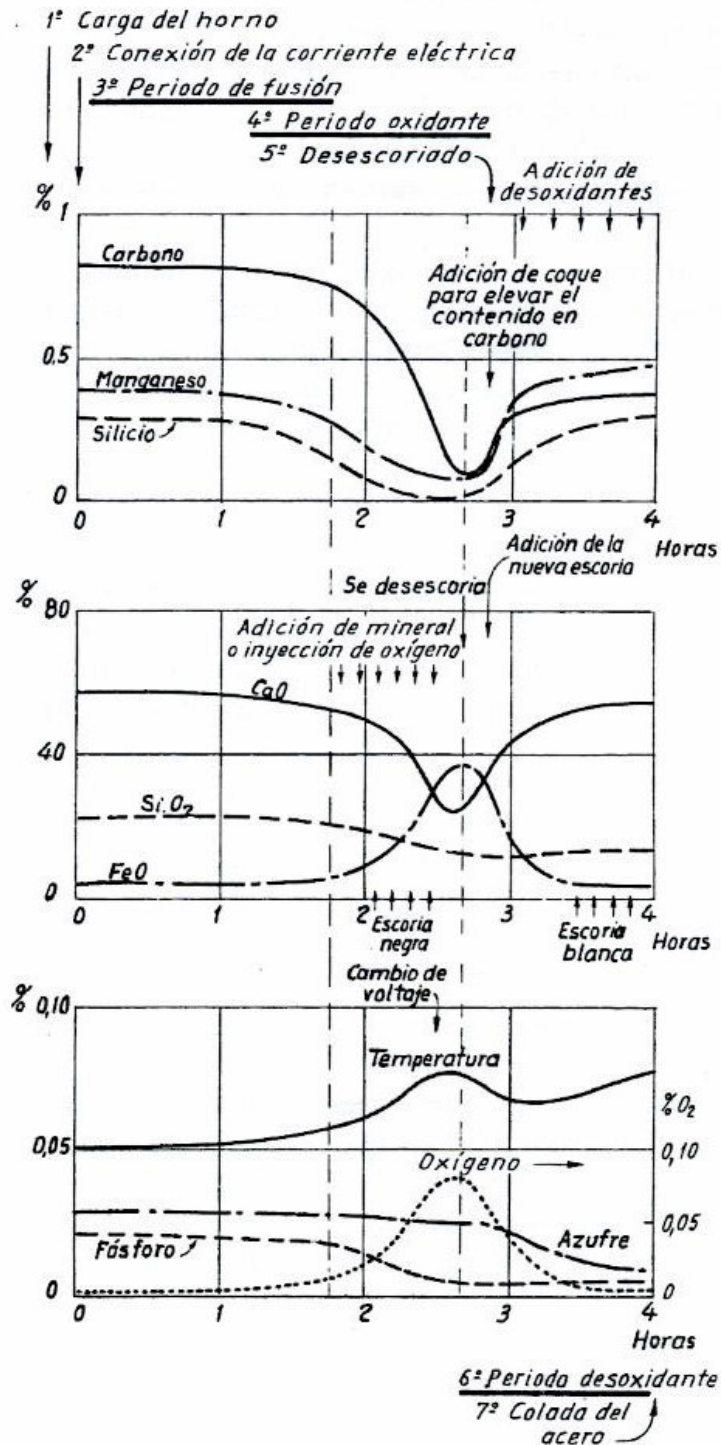


Figura 1.24.- Principales fases de operación, durante un ciclo de fundición de acero, en un horno, con revestimiento básico (figura tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, José Apraiz Barreiro)

1.8.3.- Colada del acero

Después de tener en cuenta los factores citados anteriormente, si la temperatura del baño es la correcta, ya se encuentra el acero listo para la colada que se realiza, abriendo el correspondiente agujero de colar y volcando el horno para permitir a todo el baño de metal y de escoria ser trasvasado a la cuchara (figura 1.25), una vez que se ha terminado de vaciar el acero, el horno vuelve a su posición original. La figura 1.26, muestra la cuchara siendo transportada hacia la maquina de colada continua.



Figura 1.25.- Vaciado del acero a la cuchara (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)



Figura 1.26.- Transporte de la cuchara hacia la máquina de colada continua (fotografía tomada por el autor de la presente tesis, en la siderúrgica: Metaver, Córdoba Ver.)

CAPITULO II

2.- FACTOR DE POTENCIA Y DISTURBIOS ELECTRICOS PROVOCADOS POR UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Introducción

En el presente capítulo, se muestra el comportamiento del factor de potencia de un horno de arco eléctrico y el valor promedio de dicho factor de potencia a lo largo de un ciclo de fundición del mismo horno. La importancia de este factor de potencia promedio, es que sirve como punto inicial de referencia para calcular la cantidad de potencia reactiva que debe ser aportada por un banco de capacitores o bien por un filtro de absorción de corrientes armónicas.

Se describen los efectos provocados por las corrientes armónicas que emite un horno de arco durante su operación, sobre algunos de los equipos y componentes eléctricos, del sistema eléctrico del horno, de la acería y de otros usuarios conectados al sistema eléctrico de la compañía suministradora. Se menciona en forma generalizada, en que consiste el flicker (parpadeo) que genera un horno de arco durante su operación (junto con las corrientes armónicas, el flicker es uno de los disturbios eléctricos más dañinos que emite un horno de arco eléctrico)

Se proporcionan tablas de la norma IEEE-519, que establece los límites máximos, de valor de las corrientes armónicas que pueden fluir de hacia la red eléctrica de la compañía suministradora.

2.1.- Factor de potencia en un horno de arco

Un horno de arco en operación consume una gran cantidad de potencia activa (según el tamaño del horno) y, simultáneamente, una gran cantidad de potencia reactiva, cuyo valor es similar al de la potencia la anterior. La suma fasorial de estas dos magnitudes representa la potencia total, o aparente, que consume el horno.

El coseno del ángulo que mide el desfase entre el fasor potencia activa y el fasor potencia aparente, representa el factor de potencia al que opera el horno, que suele ser muy bajo, debido al alto consumo de potencia reactiva, típico de cualquier arco voltaico.

2.1.1.- Comportamiento del factor de potencia

Los procesos que se efectúan durante un ciclo de fundición del horno, determinan el comportamiento del factor de potencia. Se trata de un proceso de fundición y un proceso de afino (ver inciso 1.6 del capítulo I). Durante ambos procesos el factor de potencia promedio es aproximadamente el mismo, sin embargo, durante el proceso de fundición el factor de potencia se caracteriza por presentar grandes fluctuaciones, que tiende a disminuir a medida que dicho proceso avanza, mientras que durante el proceso de afino, las fluctuaciones del factor de potencia tienden a disminuir notablemente.

El proceso de fundición, consiste en fundir por completo, una primera carga de chatarra y dos o tres, recargas más. Durante las primeras etapas del proceso de fundición, se requiere utilizar arcos muy intensos, debido a que la distribución de la chatarra no es uniforme, a que ésta se encuentra prácticamente entera y al constante rebote de los electrodos que evita mantenerlos a un mismo nivel de altura con respecto a la chatarra. En consecuencia, el consumo de corriente de los arcos eléctricos que se generan entre los electrodos de cada fase y la chatarra, presenta grandes fluctuaciones instantáneas, lo que se ve reflejado en las grandes fluctuaciones instantáneas que presenta el factor de potencia. A medida que el proceso avanza, los inconvenientes antes mencionados son superados y por consiguiente, las fluctuaciones instantáneas de dicho factor tienden a amortiguarse. Por otra parte, como ya se ha mencionado al inicio del presente inciso, el factor de potencia, mantiene un valor promedio similar, a lo largo del ciclo de fundición del horno.

El proceso de afino, en general, consiste proporcionar a la masa fundida la temperatura adecuada y efectuar la mezcla de dicha masa con los materiales agregados que son los que determinan las características del acero a obtener. Durante este proceso, el consumo de corriente de cada arco es muy similar y en consecuencia las fluctuaciones instantáneas del factor de potencia se amortiguan notablemente.

Las figuras 2.1, 2.2 y 2.3, muestran las gráficas del factor de potencia, de la potencia activa trifásica entre fases y la potencia reactiva trifásica entre fases, para un mismo ciclo de fundición. Estas gráficas se han obtenido de mediciones tomadas entre el transformador del horno y el equipo de compensación del factor de potencia instalado en el sistema eléctrico del horno, es decir, representan las demandas reales del horno, sin compensación del factor de potencia. En cada una de estas gráficas se observan cuatro etapas bien definidas del ciclo de fundición del horno, las primeras tres etapas y media corresponden al proceso de fundición de una carga de chatarra junto con tres recargas más de la misma, mientras que la segunda mitad de la cuarta etapa, corresponde al proceso de afino.

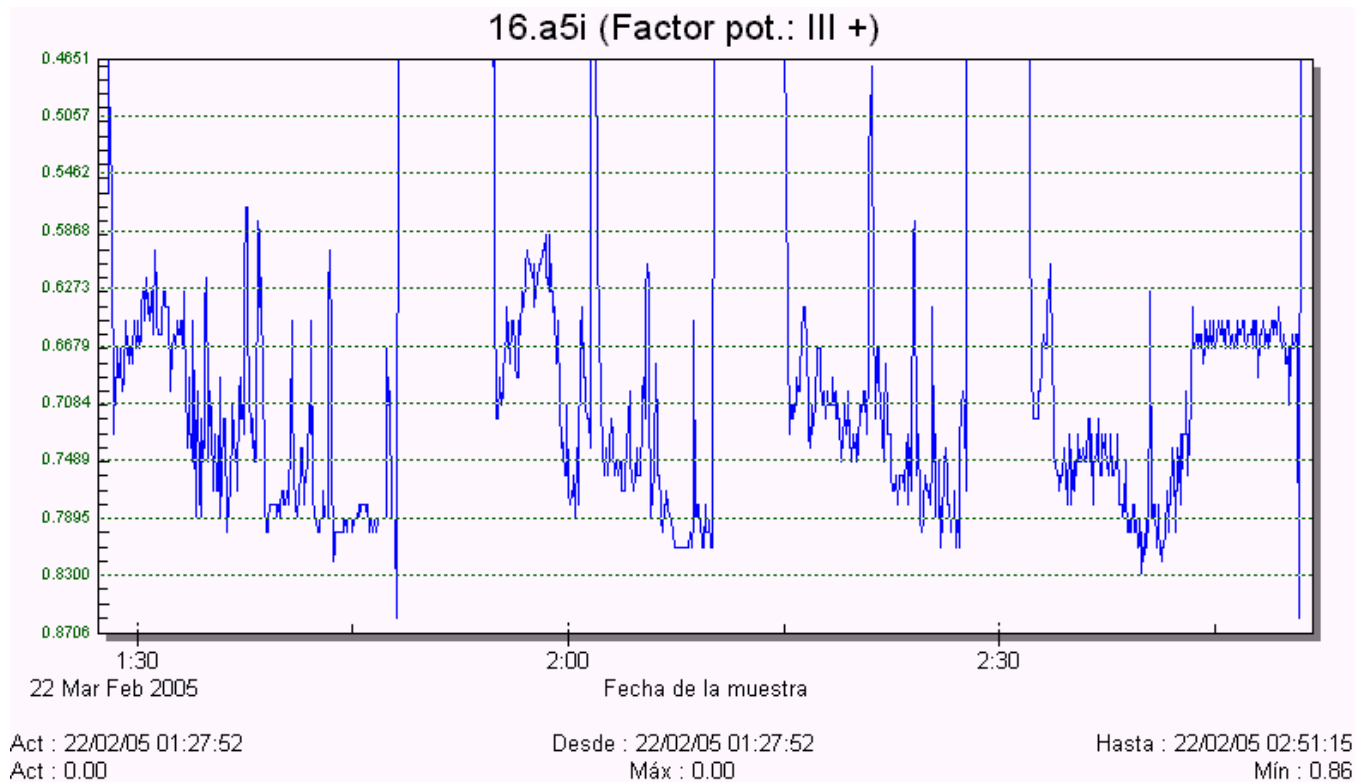


Figura 2.1.- Factor de potencia durante un ciclo de fundición del horno (medición cortesía de TNV Consulting Co)

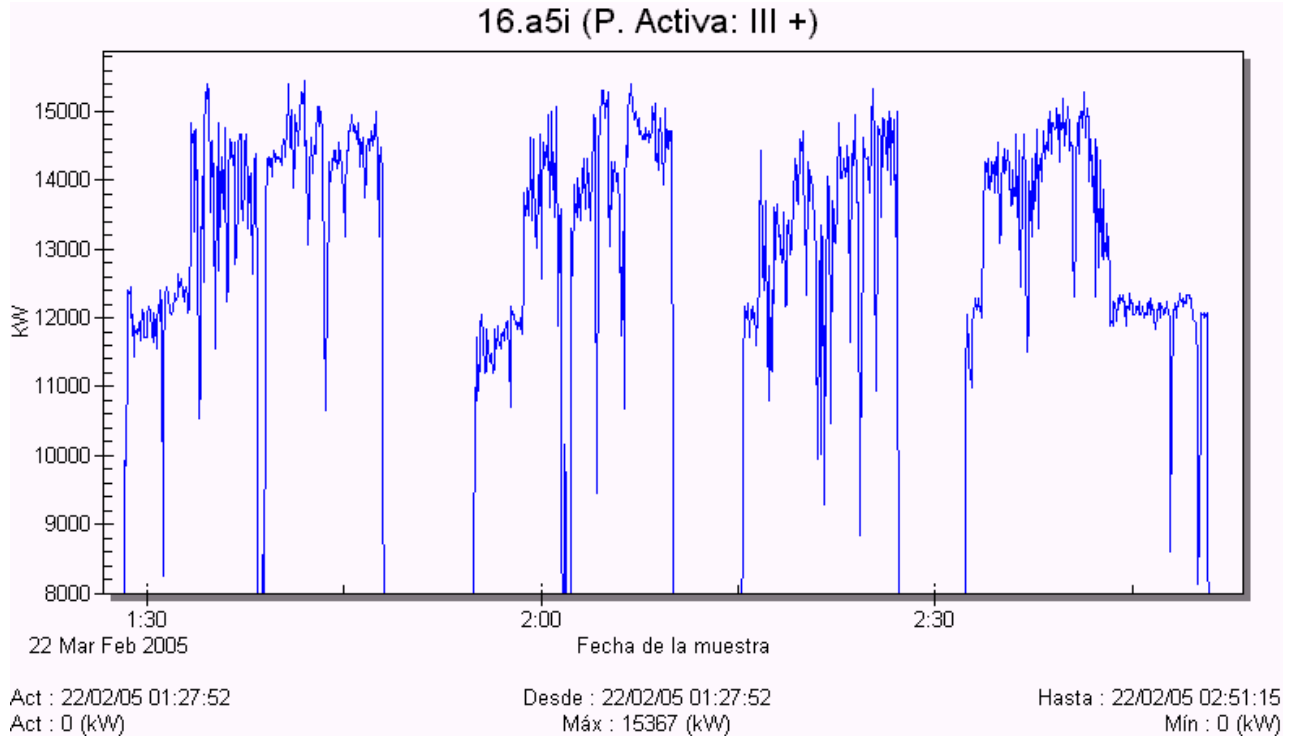


Figura 2.2.- Potencia activa trifásica durante un ciclo de fundición del horno (medición cortesía de TNV Consulting Co)

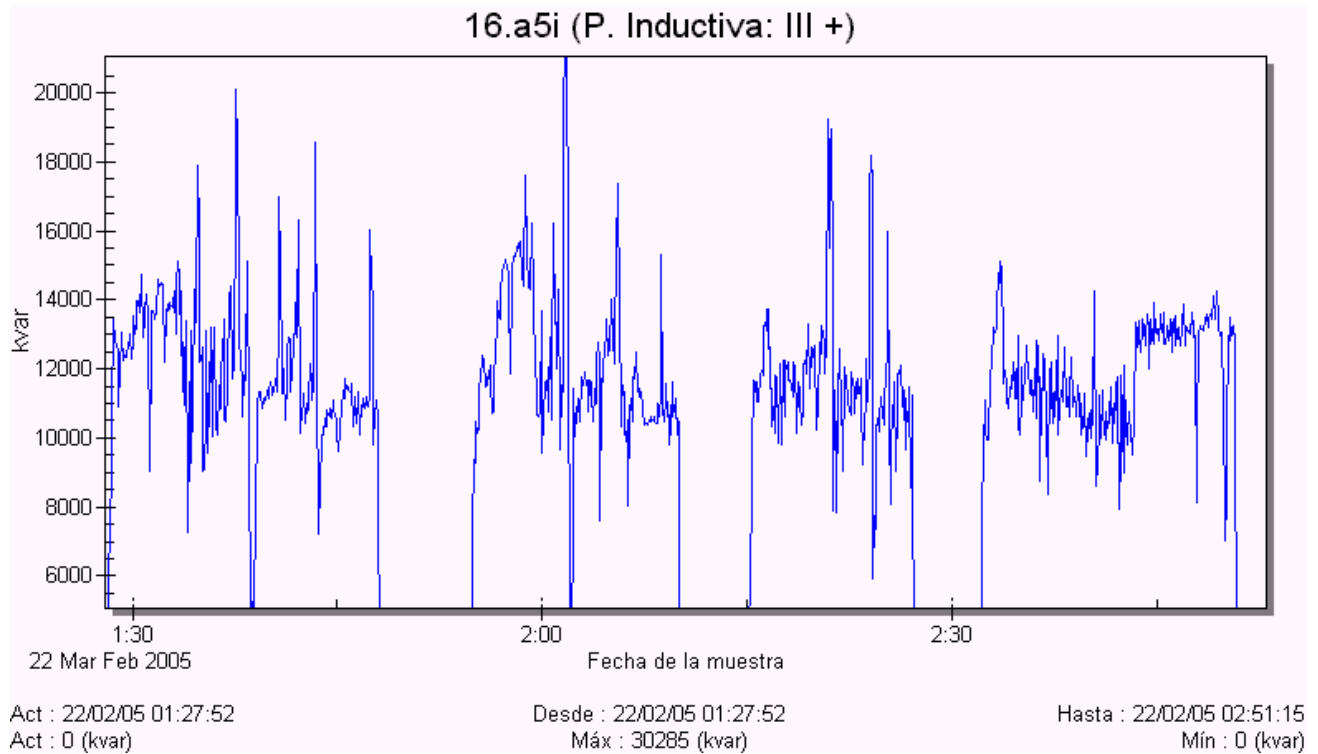


Figura 2.3.- Potencia inductiva trifásica durante un ciclo de fundición del horno (medición cortesía de TNV Consulting Co)

Las figuras 2.4, 2.5 y 2.6, corresponden a otro ciclo de fundición diferente al anterior, mostrando el comportamiento del factor de potencia, la potencia activa y la potencia reactiva. Esto, para el proceso de fundición de la primera recarga, segunda recarga (primeras tres etapas), así como para el proceso de afino (ultima etapa). Se observa que durante la fundición de la primera recarga el horno salió de operación durante unos 5 minutos aproximadamente. Esto puede suceder por diversos motivos, tales como, toma de muestras, adición de materiales, ajuste de electrodos, etc. Estas paradas intempestivas pueden repetirse varias veces durante el ciclo de fundición y se consideran como normales en la operación del horno.

Puede observarse en estas gráficas 2.4, 2.5 y 2.6, que el comportamiento de los parámetros eléctricos en este otro ciclo de operación del horno, incluido el factor de potencia, es similar al mostrado en las figuras anteriores 2.1, 2.2 y 2.3, para un ciclo diferente de fundición.

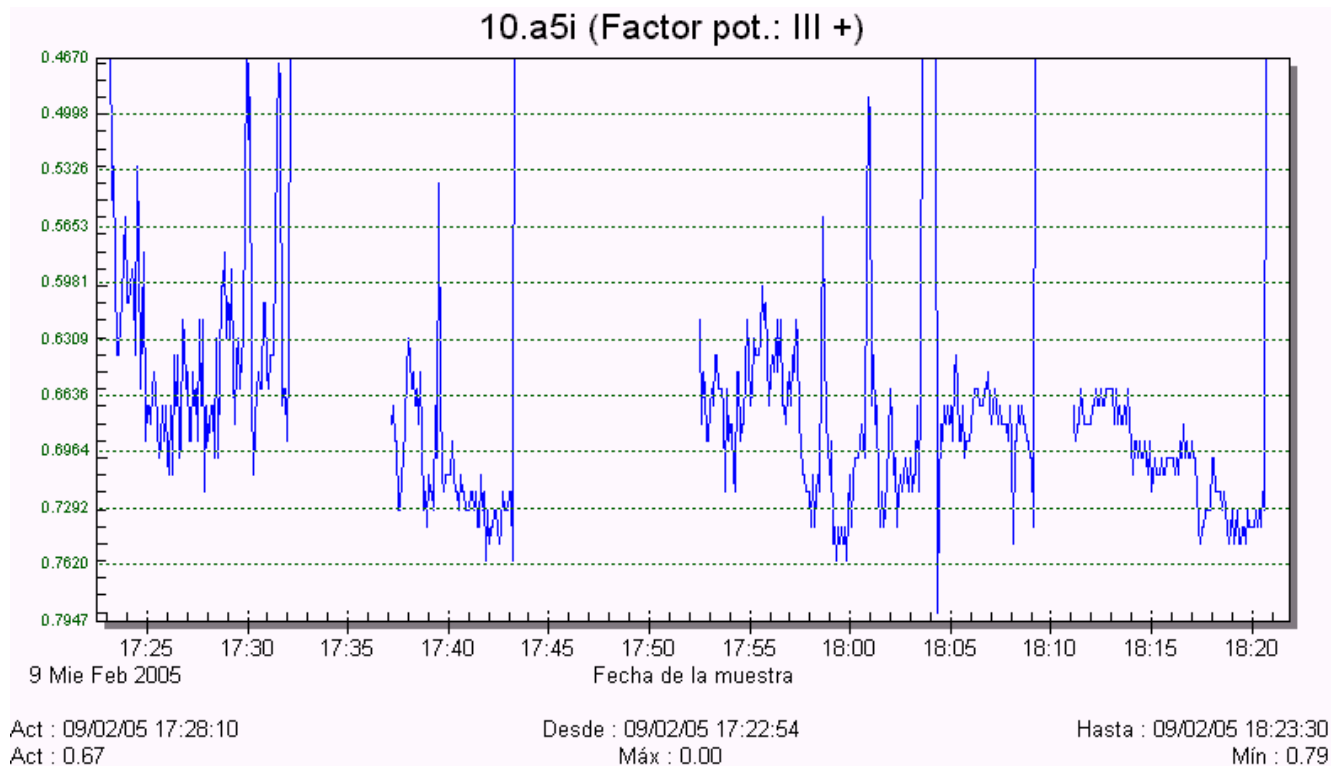
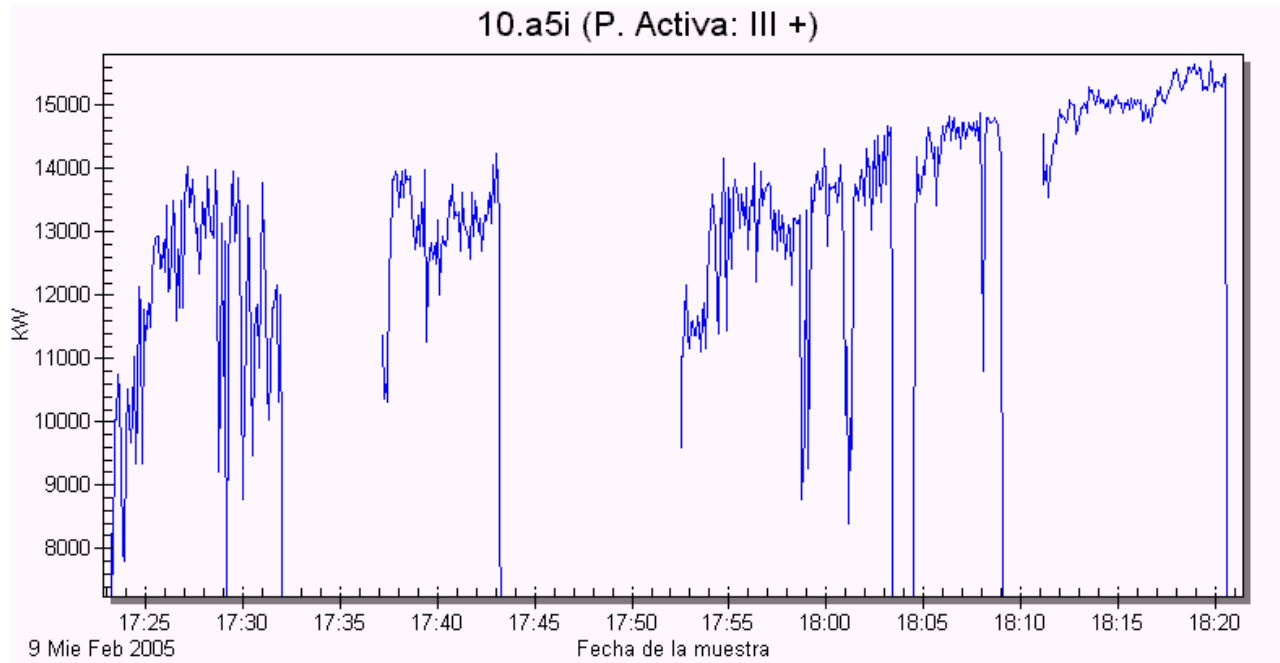
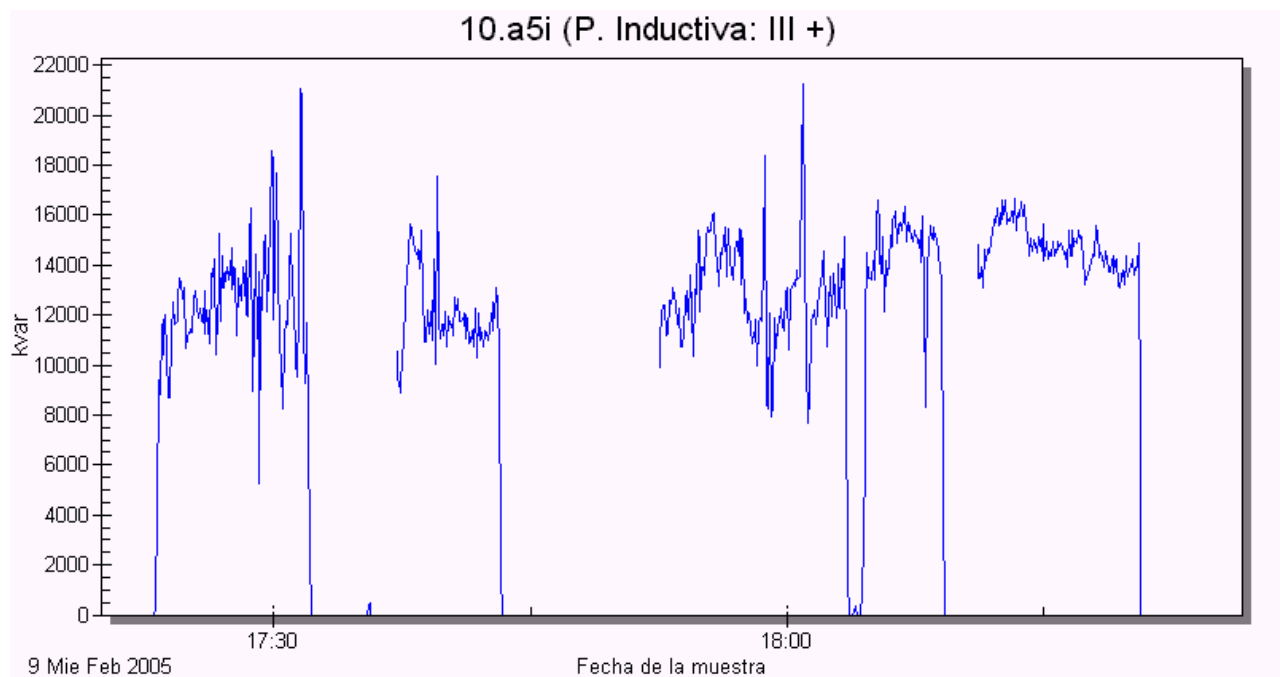


Figura 2.4.- Factor de potencia durante el proceso de fundición y de afino, de un ciclo de fundición (medición cortesía de TNV Consulting Co.)



Act : 09/02/05 17:22:54 Desde : 09/02/05 17:22:54 Hasta : 09/02/05 18:23:30
 Act : 0 (kW) Máx : 15693 (kW) Mín : 0 (kW)
Figura 2.5.- Potencia activa durante el proceso de fundición y de afino, de un ciclo de fundición (medición cortesía de TNV Consulting Co.)



Act : 09/02/05 17:28:00 Desde : 09/02/05 17:22:54 Hasta : 09/02/05 18:23:30
 Act : 12978 (kvar) Máx : 21234 (kvar) Mín : 0 (kvar)
Figura 2.6.- Potencia inductiva durante el proceso de fundición y de afino, de un ciclo de fundición (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

Las gráficas de la figuras 2.7, 2.8 y 2.9, corresponden, a un ciclo de fundición diferente de los anteriores, en éstas graficas, el intervalo de tiempo correspondiente a las 23:20 horas en adelante, corresponde al proceso de afino. Como ya se ha mencionado en el inciso 1.8 del capítulo I, durante este proceso, se agregan los diversos materiales que le dan las características deseadas al acero. Puede verse en estas gráficas que el factor de potencia permanece bastante estable, ya que el arco es usado prácticamente para mantener la temperatura del metal fundido en el horno y para que los materiales agregados puedan mezclarse.

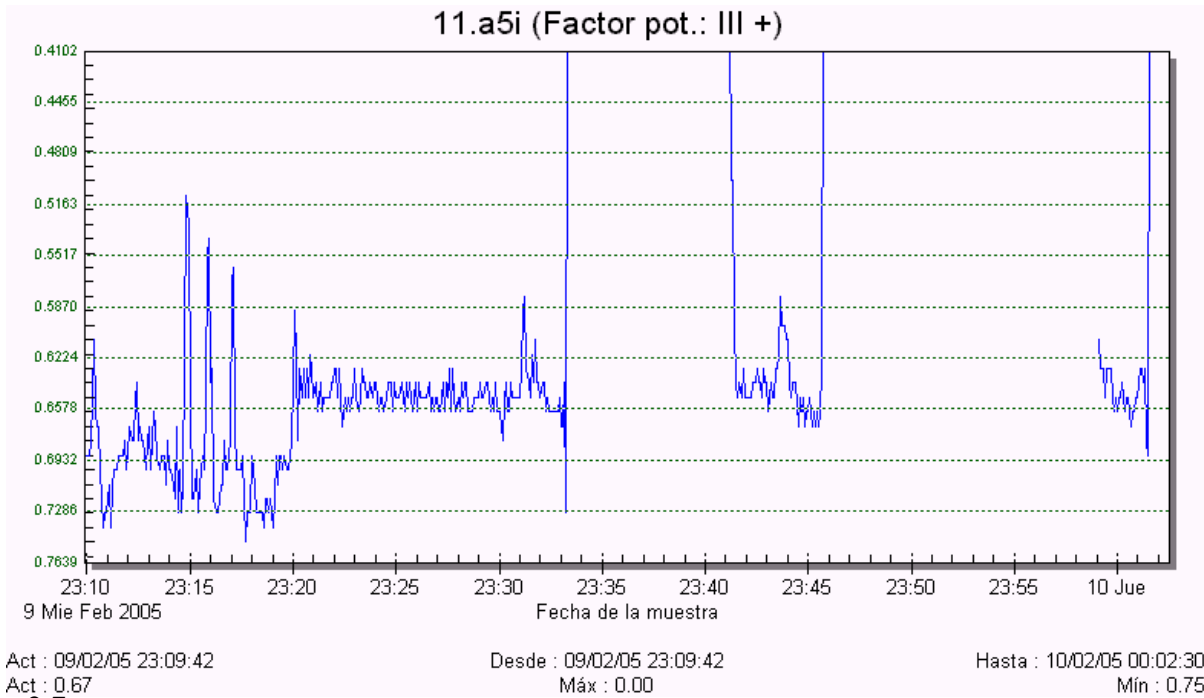
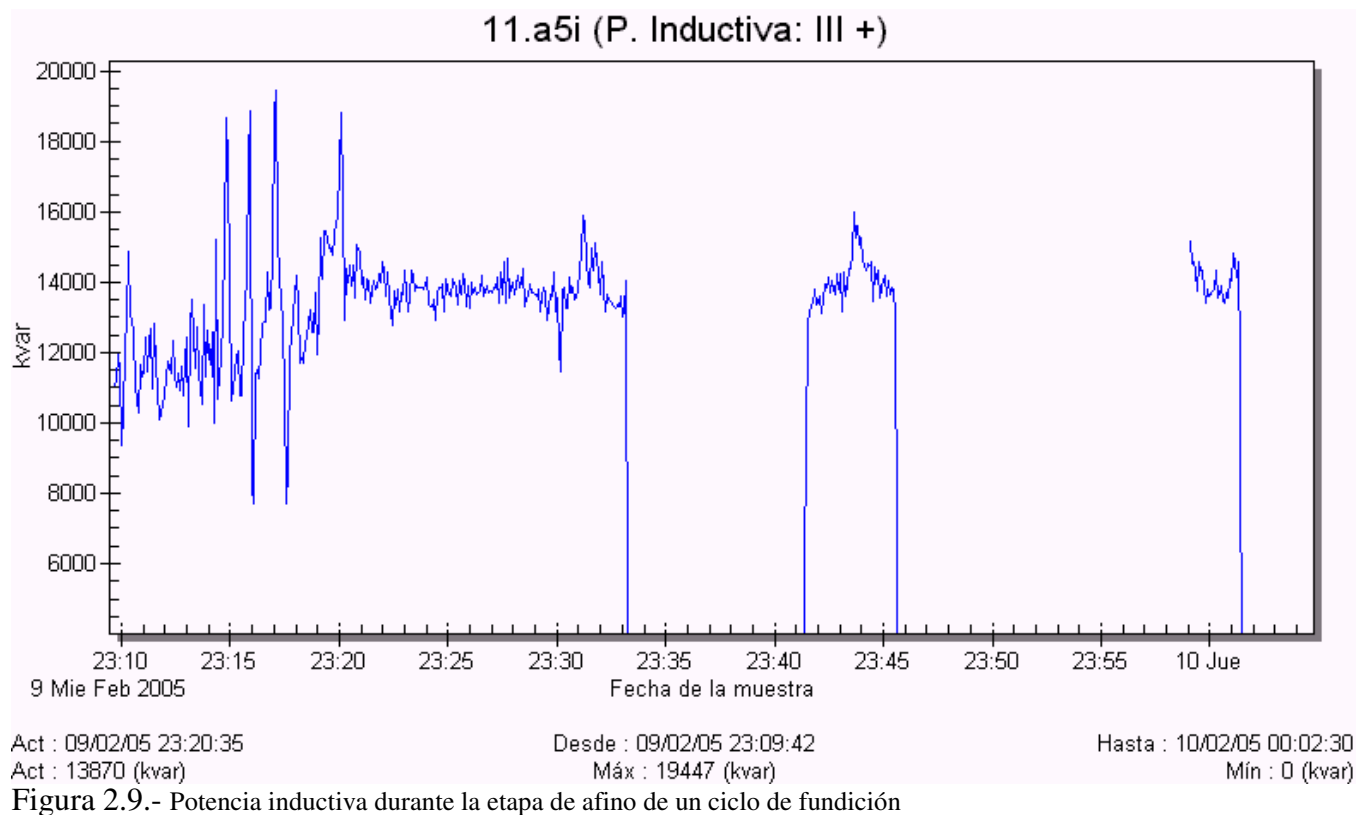
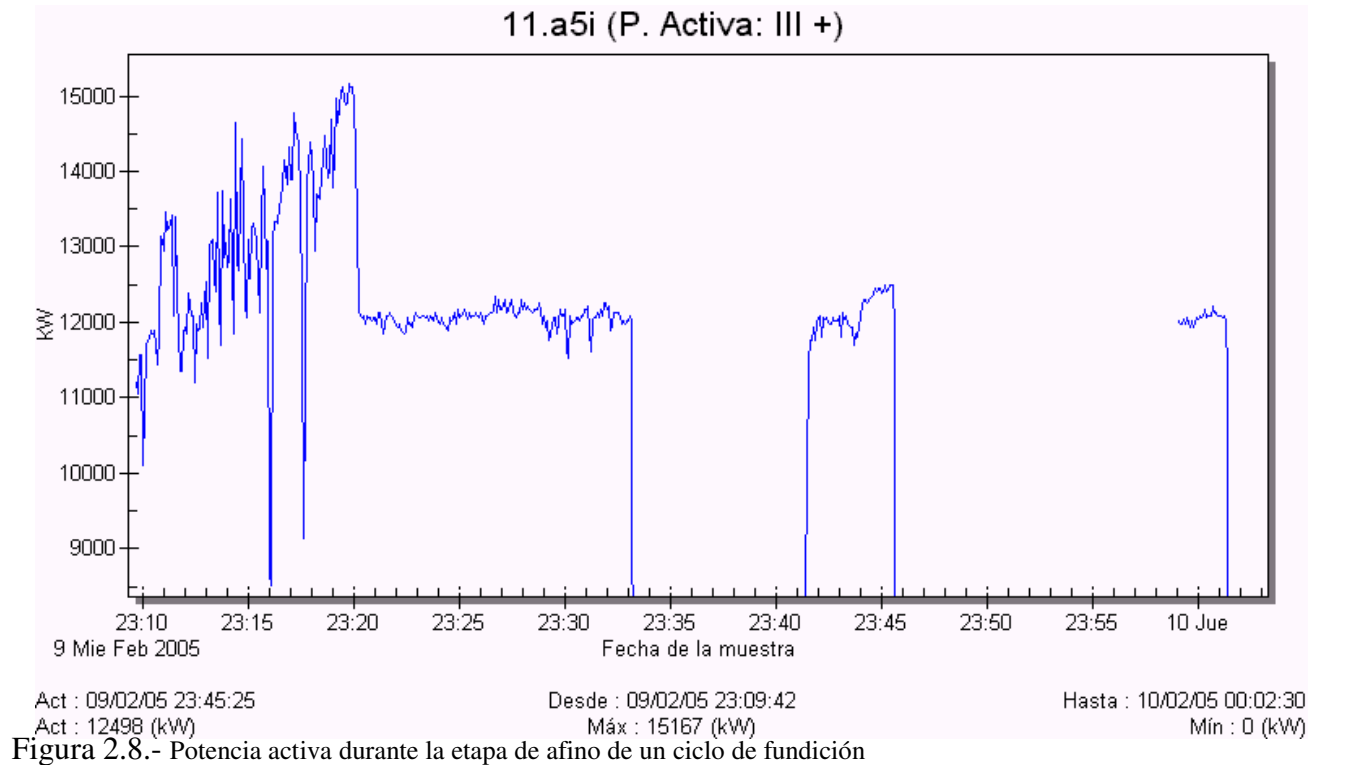


Figura 2.7.- Factor de potencia durante la etapa de afino de un ciclo de fundición (medición cortesía de TNV Consulting Co.)



De las figuras presentadas anteriormente (figuras 2.1 a la 2.9), se deduce la tabla número 2.1, en la que puede observarse que en diferentes etapas de diferentes ciclos de operación del horno, a medida que la demanda de potencia activa aumenta también lo hace el factor de potencia, mientras que la demanda de potencia reactiva tiende a disminuir. En la práctica, el factor de potencia de un horno operando a plena carga, es de aproximadamente 0.73.

Tabla No.2.1.- Promedios del factor de potencia, potencia activa y potencia reactiva tomados en los tres ciclos de fundición que se muestran en las figuras: 2.1 a la 2.3 (ciclo A), 2.4 a la 2.6 (ciclo B) y 2.7 a la 2.9 (ciclo C)

MEDICIÓN DE PARAMETROS ELECTRICOS EN EL LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO									
CICLO	ETAPA	INTERVALO DE MEDICION (Horas)	PROMEDIOS PARCIALES			PROMEDIOS TOTALES			
			FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAR)	FP	MW	MVAR	MVA
A	1^a		FIGURA 1	FIGURA 2	FIGURA 3	0.72	13.6	12.65	18.6
		1:28 a 1:33	0.65	12	14				
		1:34 a 1:40	0.72	13.5	13				
	1:41 a 1:48	0.78	14.5	11.6					
	2^a	1:55 a 2:00	0.64	12	14.4				
		2:02 a 2:06	0.73	13.5	12.6				
		2:06 a 2:09	0.78	15	12				
	3^a	2:15 a 2:21	0.70	13.5	12.8				
		2:21 a 2:27	0.76	14.5	11.6				
	AFINO	2:32 a 12:42	0.75	14	11.3				
2:43 a 2:50		0.66	12	13.2					
B	2^a		FIGURA 4	FIGURA 5	FIGURA 6	0.69	13.4	13.4	19
		17:23 a 17:32	0.66	12.5	12.5				
		17:37 a 17:43	0.72	13.5	12.5				
	3^a	17:52 a 17:58	0.66	13	13.2				
		17:59 a 18:03	0.72	13.5	12.5				
		18:04 a 18:08	0.7	14.5	14.8				
	AFINO	18:11 a 18:21	0.7	15	15				
C	AFINO		FIGURA 7	FIGURA 8	FIGURA 9	0.68	12.7	13.6	18.6
		23:09 a 23:15	0.70	13.5	13.2				
		23:16 a 23:33	0.66	12	14				

2.1.2.- Necesidad de corregir el factor de potencia

Como hemos visto anteriormente, un horno de arco en operación consume grandes cantidades de potencia reactiva, lo cual implica un bajo factor de potencia en el sistema eléctrico del horno. Es importante controlar el factor de potencia, tanto por necesidades de normatividad como por necesidades técnicas.

La normatividad vigente en México, establece un valor mínimo de factor de potencia para cargas industriales de 0.90, para evitar sanciones económicas y, en caso de presentar dicha carga industrial un valor de factor de potencia mayor a 0.90, ó cercano a la unidad, la compañía suministradora aporta una bonificación económica, la cual se descuenta del costo total del recibo.

Técnicamente, es necesario controlar el factor de potencia, ya que de esta forma se evita saturar de corriente los componentes eléctricos del horno, como son: transformadores, cableado, fusibles, contactores, interruptores, etc. Corregir el factor de potencia permite reducir considerablemente el consumo de corriente que demanda el horno a la compañía eléctrica suministradora y, además, proporciona una beneficiosa regulación de voltaje en el sistema eléctrico en el que opera dicho horno. Por otra parte, compensar el factor de potencia del horno es la única forma de conseguir, normalmente, que el horno alcance su plena capacidad de operación, ya que sin compensación del factor de potencia los problemas de saturación mencionados anteriormente hacen prácticamente imposible alcanzar la plena capacidad de operación en cualquier caso práctico.

2.2.- Corrientes armónicas producidas durante la operación de un horno de arco

El modelo ideal de un sistema eléctrico para una red de potencia industrial implica la existencia de una o tres fases, alimentadas con fuentes de tensión perfectamente sinusoidales, por cuyos hilos de fase fluyen corrientes, también perfectamente sinusoidales, de frecuencia y amplitudes constantes, iguales para las tres fases, tanto en caso de ondas de tensión como de corriente, que van defasadas entre sí, exactamente 120° , en el caso de un sistema trifásico. Son lo que se llama ondas fundamentales de tensión y de corriente.

Cualquier desviación de alguna de estas condiciones ideales, puede interpretarse como una deficiencia en la calidad de la energía eléctrica que fluye por la red. Esta deficiencia de calidad será más notoria y, posiblemente de peores consecuencias, cuanto más grande sea el disturbio o perturbación que esté sacando a la red de sus condiciones de calidad ideal.

Uno de los disturbios más notables, desde el punto de vista de la calidad de la energía, generados por la operación de un horno de arco, son las corrientes armónicas, que afectan la forma de onda tanto de corriente como la de tensión. Se trata de corrientes emitidas por el arco eléctrico, cuya frecuencia es múltiplo exacto de la frecuencia de la corriente fundamental. La mayoría de estas corrientes fluyen hacia el lado primario del transformador del horno y del transformador de cometa, distorsionando la onda de voltaje a su paso por la impedancia de los transformadores.

Es de esta manera, como la onda de corriente graba las frecuencias armónicas que lleva consigo la onda de voltaje, tanto en el lado primario como en el secundario de los transformadores, quedando distorsionada con perturbaciones armónicas dicha onda de voltaje. De esta forma, es la onda de voltaje la que puede transportar la distorsión armónica a grandes distancias, propagándose desde las subestaciones de la compañía eléctrica suministradora a las subestaciones de otros usuarios de la red.

De acuerdo a lo que se ha mencionado en los párrafos anteriores, el horno de arco, además de consumir corrientes activas y reactivas, a frecuencia fundamental, también se comporta como una fuente emisora de corrientes armónicas. El diagrama unifilar de la figura 2.10 muestra, en forma simplificada, tanto el sistema eléctrico del horno como el de la compañía suministradora, con el fin de hacer notar los transformadores a los que se hace referencia en el párrafo anterior.

La figura 2.11 muestra un diagrama unifilar simplificado del sistema eléctrico del horno y de la red suministradora, incorporando sus respectivas impedancias y, así como también, el flujo de corrientes fundamental y de armónicas.

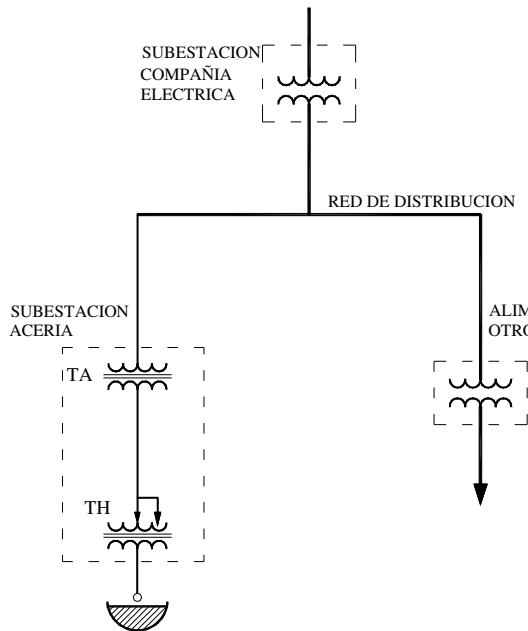


Figura 2.10.- Subestaciones de la acería, de la compañía suministradora y la de otros usuarios*

*Figuras tomadas del libro: Corrientes Armónicas, del Dr. Alfredo Navarro Crespo

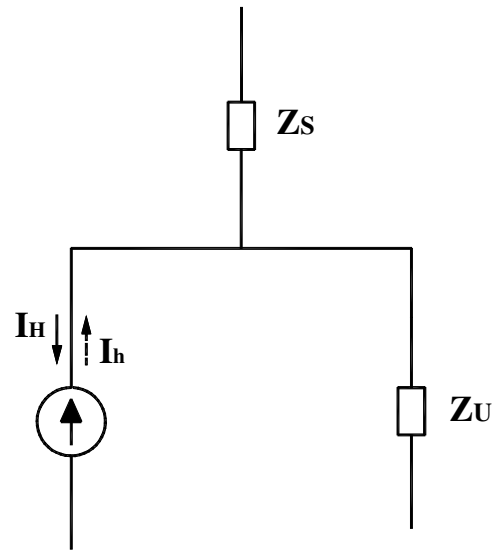


Figura 2.11.- Diagrama de impedancias y flujo de corrientes armónicas*

2.2.1.- Espectro típico de corrientes armónicas

A la representación de las corrientes armónicas contenidas en la onda fundamental, indicando sus frecuencias y amplitudes correspondientes, se le denomina espectro de armónicas de la onda original distorsionada. En la figura 2.12 se muestra el espectro típico de corrientes armónicas que produce un horno de arco. En la práctica, para obtener este espectro, se utiliza un analizador de redes, conectado en el lado primario del transformador del horno, ya que por este punto fluyen las corrientes armónicas generadas por la operación del mismo. La figura 2.13, muestra un diagrama unifilar que indica la conexión eléctrica adecuada para dicho analizador de redes.

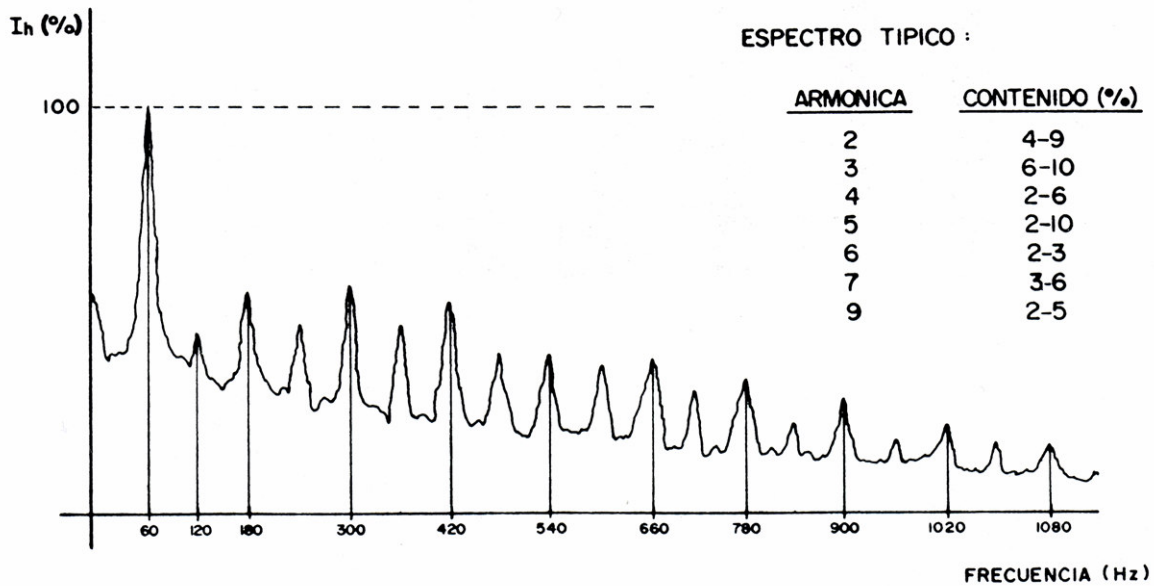


Figura 2.12.- Gráfica que muestra el espectro de corrientes armónicas en un horno de arco eléctrico (gráfica tomada del libro: Corrientes Armónicas, del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

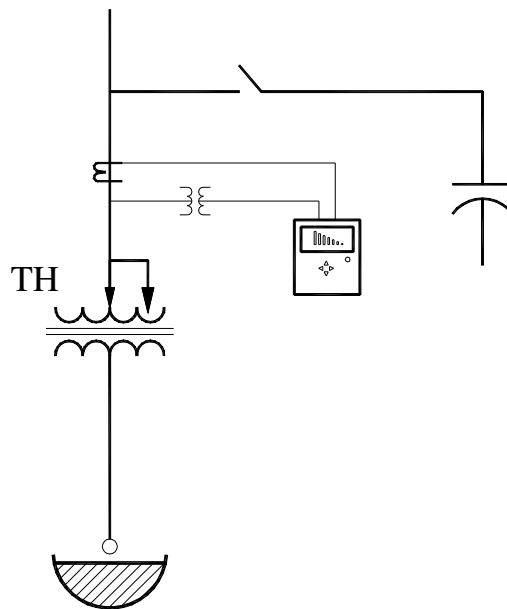


Figura 2.13.- Conexión de un analizador de redes para medir el espectro de corrientes armónicas emitidas por un horno de arco eléctrico, durante su operación (diagrama elaborado por el autor de la presente tesis). Nota: para obtener el espectro real que emite el horno, el equipo de compensación del factor de potencia debe estar fuera de operación.

2.2.2.- Efectos provocados por las corrientes armónicas

Dado que el horno de arco es una fuente emisora de corrientes armónicas de gran intensidad los efectos provocados por éstas son muy notables.

A continuación se mencionan los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas en principales componentes del sistema eléctrico del horno:

- a) Fallo de capacitores de potencia
- b) Sobrecalentamiento de transformadores

- c) Calentamiento de conductores eléctricos
- d) Mal funcionamiento de los equipos del sistema de regulación del horno y de los sistemas eléctricos y electrónicos instalados cerca del mismo.

a) Fallo de capacitores de potencia.

Los capacitores conectados a una red conteniendo corrientes armónicas, tal como la de un horno de arco, tienden a tomar sobrecorrientes significativas, debido a la baja impedancia que muestra un capacitor al ser alimentado con ondas de tensión de alta frecuencia. Si no se toman ciertas precauciones, es posible que dichos capacitores queden sometidos a corrientes excesivas de alta frecuencia, que causen una disminución notable de su vida media e incluso fallos de unidades en un corto tiempo después de haber entrado en operación.

Debido a las circunstancias anteriores se han establecido normas internacionales, con el fin de evitar que tales situaciones se presenten. En lo que respecta a capacitores de potencia en alta tensión, las normas CCONIE, NEMA y ANSI, recomiendan un límite máximo de un 10% en sobrevoltaje, para el voltaje eficaz total resultante contando el voltaje de la onda fundamental más el de las componentes armónicas. La sobrecorriente máxima permisible, proveniente de la onda de corriente fundamental y sus armónicas, es de 35% de la corriente fundamental, siendo este límite de 30 % máximo, en el caso de las normas IEC.

La combinación de ambos factores, sobrevoltaje y sobrecorriente, no debe permitir que se sobrepase el límite de potencia reactiva máxima permisible, que es del 35%, con respecto a la potencia reactiva nominal del capacitor, en caso de la normatividad americana, y 30%, en caso de normatividad europea.

Cuando se presenta un problema de sobrecarga de corriente o de potencia, los capacitores suelen mostrar síntomas de una temperatura de operación excesivamente elevada que se traduce en una deformación del tanque, indicando las altas presiones internas a las que está sometido, debido a la dilatación del líquido impregnante y, en las peores circunstancias, en una fuerte explosión del tanque, si las protecciones no son las adecuadas.

Cuando se planea un banco de capacitores para este tipo de instalaciones, en las que cabe esperar la presencia de distorsión armónica intensa en la onda de corriente, debe preverse la existencia de estas sobrecorrientes armónicas, tanto en su alambrado como en todos sus accesorios y equipo eléctrico auxiliar. Por otra parte, es importante tener cuidado especial en cuanto a la ventilación, o incluso refrigeración del banco de capacitores usado para compensar la potencia reactiva del horno y dejar su neutro flotante, en caso de usar los capacitores con conexión estrella.

b) Sobrecalentamiento en transformadores.

Los transformadores de potencia están diseñados para operar a tensión y frecuencia nominales. El flujo de corrientes armónicas provoca sobrecalentamiento por:

- Incremento de pérdidas por histéresis del núcleo.
- Flujo de corrientes de secuencia cero por los devanados en delta.
- Corrientes parásitas en los devanados

Estos sobrecalentamientos provocan altas pérdidas de energía e incluso pueden provocar fallos de transformadores. Por cada 8° C de incremento de temperatura nominal de operación, puede bajar a la mitad la vida media de un transformador. En la tabla 2.2, se muestran las pérdidas de eficiencia y, por consiguiente, el mayor consumo de energía, en cálculos efectuados con transformadores estándar sometidos a flujo de corrientes armónicas. Puede observarse en dicha tabla, cómo baja la eficiencia del

transformador, o lo que es lo mismo, suben las pérdidas de energía provocadas en el mismo, conforme aumenta la distorsión armónica de la onda de corriente que fluye a través de dicho transformador.

Tabla 2.2.- Pérdidas en un transformador de acuerdo al nivel de distorsión armónica (tabla tomada del libro: Corrientes Armónicas, del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

Distorsión armónica (%)	Pérdidas RI^2 (%)	Pérdidas en el núcleo (%)	Eficiencia
0	2.5	2.5	95.0
10	2.5	5.2	92.2
20	2.5	8.0	89.4
30	2.5	10.8	86.6
40	2.5	13.5	83.9
50	2.5	16.3	81.1
60	2.5	19.1	78.3
70	2.5	21.9	75.5
80	2.5	24.6	72.8
90	2.5	27.4	70.0
100	2.5	30.2	67.2

c) Calentamiento de conductores eléctricos

Las corrientes armónicas que fluyen por los cables conductores de energía eléctrica incrementan las pérdidas de energía en los mismos por tres conceptos:

- Pérdidas Ohmicas: $RI^2 = R (I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots)$
La corriente eficaz aumenta al existir componentes armónicas y esto incrementa las pérdidas Ohmicas.
- Pérdidas por efecto pelicular: El flujo de altas frecuencias obliga a las corrientes correspondientes a fluir concentrándose cercanas a la superficie externa de los conductores. Esto ocasiona mayores pérdidas ohmicas por el incremento en la densidad de corriente. Este efecto puede ser significativo en la práctica.
- Pérdidas por efecto de proximidad entre cables: Son debidas a corrientes parásitas inducidas entre cables instalados próximos entre si. Son tanto más importantes, cuanto más altas, son las frecuencias involucradas.
- Mal funcionamiento de los equipos del sistema de medición y regulación del horno y de los sistemas eléctricos y electrónicos instalados cerca del mismo
La acería, por lo general, cuenta con varios sistemas eléctricos derivados a partir de las barras de alta tensión de la subestación principal (ver figura 2.14). Esto significa, que los disturbios eléctricos generados por el horno de arco influyen en el comportamiento de los demás sistemas, debido a que las corrientes armónicas fluyen a través de los transformadores hacia los equipos eléctricos y electrónicos instalados en toda la acería.

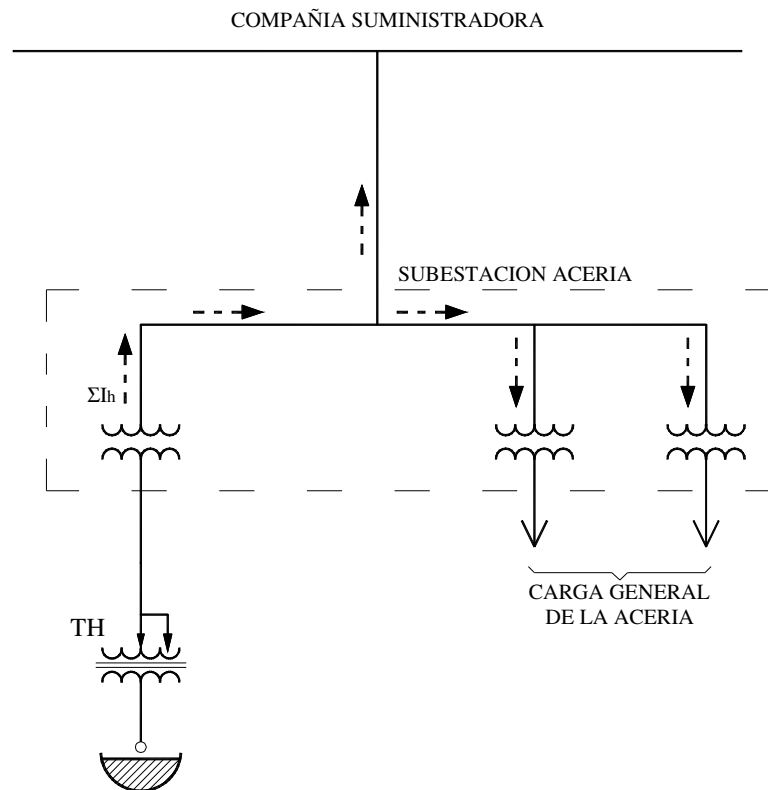


Figura 2.14.- Conexión en las barras de alta tensión de los sistemas derivados de la acería (figura cortesía de TNV Consulting Co.)

Debido a lo anterior, si el sistema eléctrico del horno carece de un equipo que elimine las corrientes armónicas, las ondas de voltaje y de corriente que se suministran a los equipos del sistema de medición y regulación del horno estarán distorsionadas, provocando problemas de operación.

Una onda sinusoidal perfecta (figura 2.15), solo produce un cruce por cero dentro de cada periodo; como ejemplo de un caso problemático, las corrientes armónicas que lleva la onda fundamental de corriente, pueden provocar diferentes pasos por cero (figura 2.16) que engañan a la electrónica de control.

Existen muchos sistemas electrónicos de medición, de protección y de control, en cuya operación es esencial la detección de los cruces por cero en la onda de tensión o de corriente, o en ambas: medidores y registradores de parámetros eléctricos, controladores de potencia relojes, controladores programables, relevadores de protección, etc.

Las corrientes armónicas afectan también, por interferencia electromagnética, a líneas de telecomunicaciones y sistemas carrier.

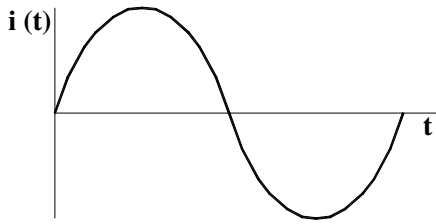


Figura 2.15.- Onda de sinusoidal, ideal

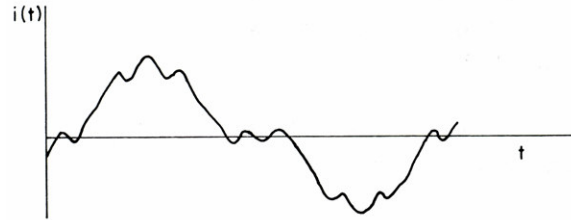


Figura 2.16.- Múltiples cruces por cero en una onda de corriente distorsionada (figura tomada del libro: Corrientes Armónicas del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

2.2.3.- Límites de distorsión armónica permitidos por la normatividad

La normatividad, para establecer los límites de distorsión armónica ha sido ampliamente desarrollada a nivel mundial, en muchos países. Siendo las normas IEEE (U.S.A) y las IEC (Europa) las más utilizadas, como punto de referencia por algunos otros países. La tendencia en México, impulsada por Comisión Federal de Electricidad, es de implantar la norma norteamericana IEEE-519.

A continuación, se describen las recomendaciones de la norma IEEE-519, sobre niveles permisibles de corrientes armónicas en sistemas eléctricos de potencia.

a) Para la onda de voltaje:

La compañía suministradora, se comporta como un generador de tensión en sus líneas de distribución. Por lo que, los usuarios, tienen derecho a exigir a ésta, que la onda de tensión suministrada, en la acometida de su sistema eléctrico, no rebase los límites de distorsión establecidos en la norma. La tabla 2.3, muestra los límites antes mencionados, para diferentes niveles de tensión, según la norma norteamericana IEEE - 519.

Tabla 2.3.- Límites para la compañía suministradora en el punto de acometida, según la norma norteamericana IEEE 519 (tabla tomada del libro: Corrientes Armónicas, del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

RECOMENDACIONES DE IEEE (NORMAS IEEE- 518 Y 519, U.S.A.) SOBRE NIVELES PERMISIBLES DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

MAXIMA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN, EN % DE LA ONDA FUNDAMENTAL			
NIVELES DE TENSIÓN	2.3-69 kv	69-138 Kv	>138 Kv
PARA ARMÓNICAS INDIVIDUALES	3.0	1.5	1.0
THD	5.0	2.5	1.5

OTRAS NORMAS:

- IEC 36.05 (EUROPA)
- DIN 57160 (ALEMANIA)
- G 5/3 (INGLATERRA)
- AS 2279 (AUSTRALIA)

b) Para la onda de corriente:

Los usuarios, cuyos sistemas eléctricos alimentan cargas no lineales, se comportan como fuentes generadoras de corrientes armónicas. Por lo que, en la tabla 2.4, se muestran los límites de distorsión armónica, que la compañía suministradora debe imponer a sus usuarios, según la norma IEEE 519.

Tabla 2.4.- Límites en el punto de conexión a la red, para cargas no lineales, cuyo nivel de tensión oscila entre 2.4 KV y 69 KV (tabla tomada del libro: Corrientes Armónicas, Dr. Alfredo Navarro Crespo).

MAXIMA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE EN % DE LA ONDA FUNDAMENTAL						
I_{cc} / I₁	ORDEN DE LA ARMÓNICA INDIVIDUAL (Solo para armónicas impares)					THD
	<11	11-16	17-22	23-34	>34	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

- PARA NIVELES DE TENSIÓN DE 69 KV A 138 KV, ESTOS LIMITES SE REDUCEN AL 50 %
- PARA TENSIONES SUPERIORES A 138 KV SE REQUIERE UNA EVALUACIÓN ESPECIAL CASO POR CASO
- PARA ARMÓNICAS PARES SE REDUCEN LOS LIMITES AL 25 % DE LOS VALORES ANTERIORES
- I_{cc} ES LA CORRIENTE MAXIMA (RMS SIMETRICA) DE CORTOCIRCUITO EN EL PUNTO DE CONEXION DE LA CARGA A LA RED.
- I₁ ES LA CORRIENTE MAXIMA QUE TOMA LA CARGA A LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL

La figura 2.17, muestra la distorsión en la onda de voltaje y de corriente durante la operación de un horno de arco eléctrico. Puede verse, el porcentaje de distorsión TDH en la onda de voltaje (voltaje de fase $V_{LINEA}/\sqrt{3}$) y en la onda de corriente.

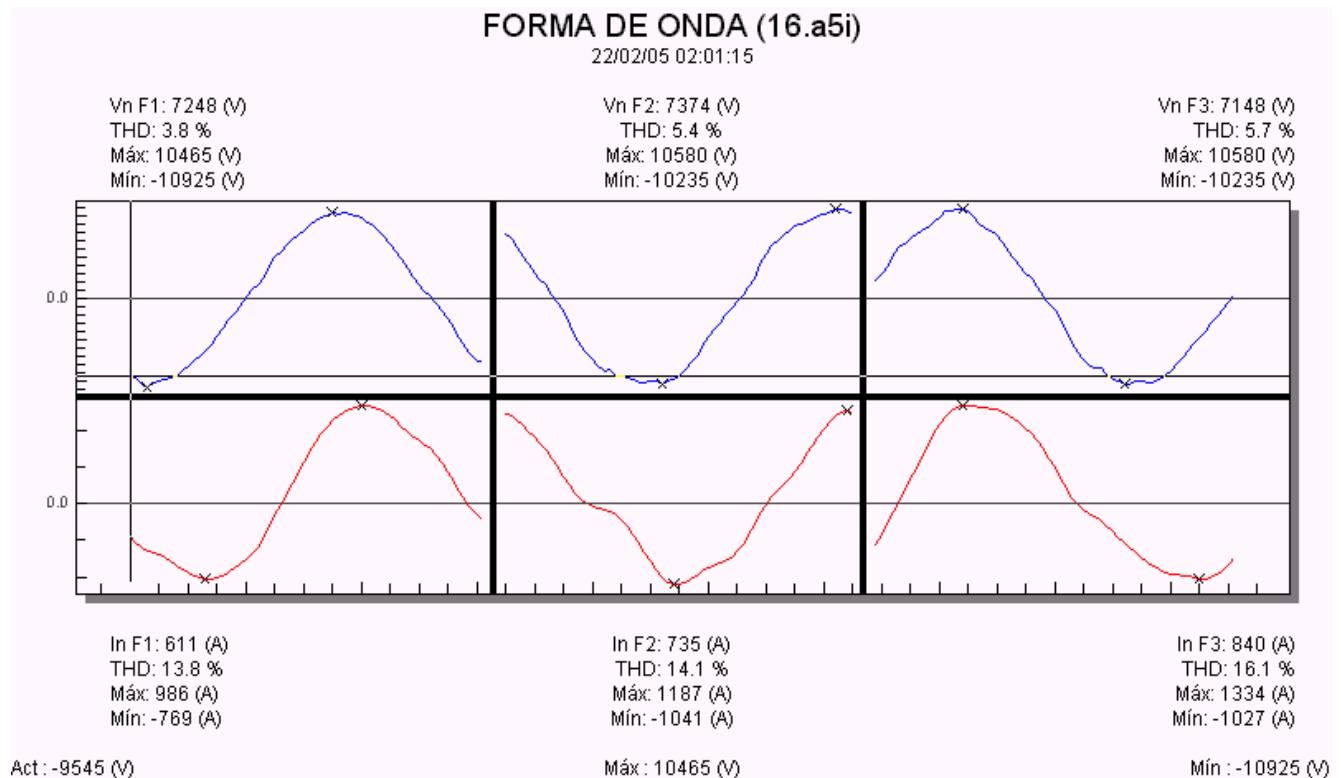


Figura 2.17.- Formas de onda de tensión y de corriente distorsionadas, durante la operación de en un horno de arco eléctrico (medición cortesía de TNV Consulting Co)

2.3.- Parpadeo (ó flicker) en la onda de voltaje, provocado por un horno de arco

Consiste en variaciones rápidas de la amplitud de onda de tensión, que puede descender un 6 ó 7% de su valor nominal, restableciéndose después de unos 20 o 30 ciclos. Podemos incluir en esta categoría las oscilaciones de tensión, subtensiones y sobretensiones de más de 10 segundos de duración, provocadas por errores en la regulación de tensión del sistema eléctrico, por la conexión y desconexión brusca de cargas importantes en el sistema eléctrico, tal como el horno de arco. En la figura 2.18, se muestran dichas variaciones de tensión.

Típicamente el flicker, es provocado por cargas que requieren grandes cantidades de corriente cuando inician sus operaciones (arranque). En el caso de un horno de arco, esto sucede, principalmente durante la fundición de las primeras cargas, debido a la gran intensidad de los arcos, y las fluctuaciones en su intensidad, debido a la distribución de la chatarra y al constante golpeteo de los electrodos con esta, que hacen el consumo de corriente varíe bruscamente.

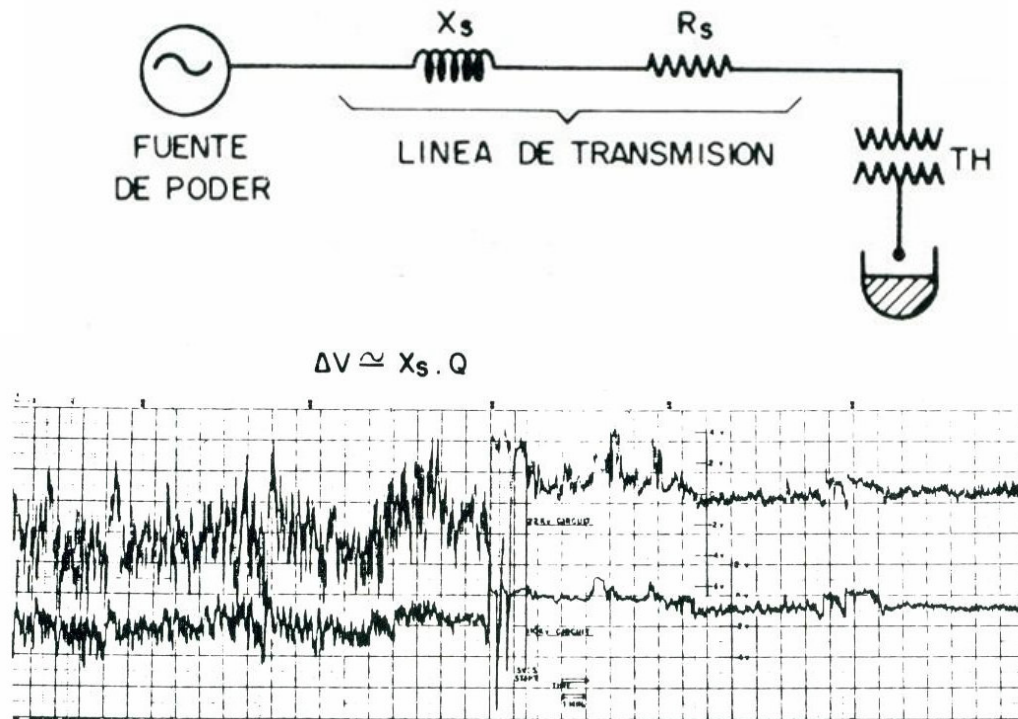


Figura 2.18.- Parpadeo (ó Flicker) producido por un horno de arco eléctrico (gráfica tomada del libro: Corrientes Armónicas, Dr. Alfredo Navarro Crespo)

2.4.- Inestabilidad de la tensión por falta de linealidad en el arco voltaico

En un circuito eléctrico simple, el arco eléctrico, es un fenómeno, fundamentalmente inestable, pues su tensión disminuye cuando la intensidad del arco crece. Para conseguir la estabilización del arco a una determinada tensión, hace falta conseguir por algún método, en el proceso de trabajo, que a una elevación de tensión corresponda una elevación de intensidad, cosa que no ocurre en el arco simple (curva A de la figura 2.19).

La estabilidad del arco se consigue, intercalando una reactancia en el circuito de alimentación del horno. En una reactancia pura, al aumentar la tensión, aumenta la intensidad y, por lo tanto, hay estabilidad (curva B de la figura 2.19). En la práctica, se usan reactores núcleo de aire, en serie con el transformador del horno, con el fin de resolver dicha inestabilidad.

El funcionamiento de un circuito con un arco y una reactancia viene dado por la curva C, que es la suma de la curva A y de la B. En ella se observa que en la zona MN hay estabilidad del arco (aumenta la intensidad al aumentar la tensión). Esa zona MN es la que se utiliza para el trabajo en los hornos eléctricos de arco para fabricación de acero.

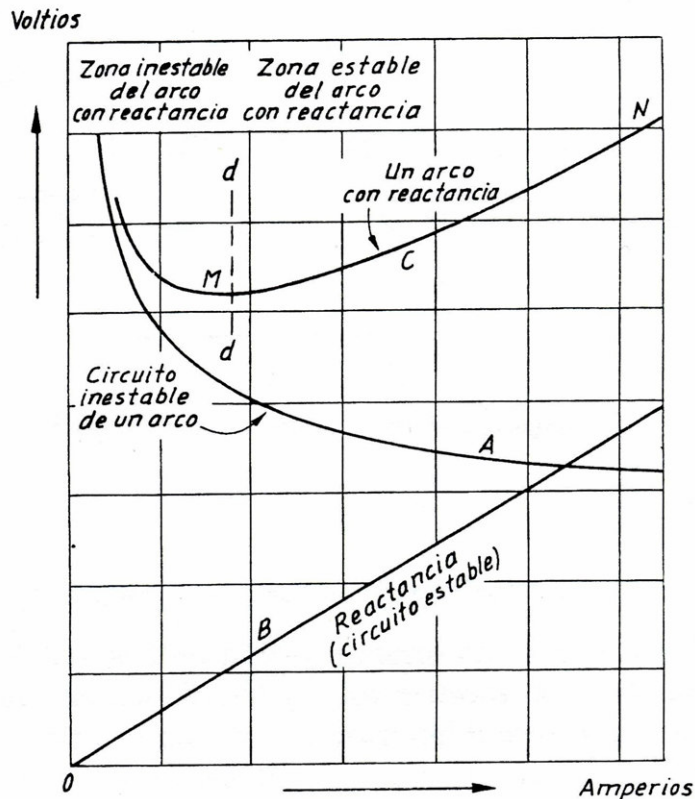


Figura 2.19.- Características de estabilidad del arco (imagen tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, tomo II, José Apraiz Barreiro)

Conviene recordar, que la necesidad de estabilizar el arco e incluir una reactancia disminuye y estabiliza el factor de potencia del circuito, en el que se ha intercalado la reactancia.

En la figura 2.20 se señalan las experiencias realizadas con un horno, empleando tres tensiones diferentes, se observa que, si para una tensión determinada (280, 220 ó 190 V) se aumenta la intensidad, entonces la potencia aparente expresada en KVA crece linealmente, mientras que la potencia real expresada en KW, en el circuito, pasa por un máximo y después decrece por crecimiento de la impedancia del circuito.

Si ahora no se considera más que la potencia gastada en el arco (KW en el arco), que realmente es la que tiene verdadero interés en la fusión, se comprueba que pasa también por un punto máximo, pero para un valor sensiblemente inferior de la intensidad. Esto ocurre porque la energía gastada fuera del arco, la debida a la producida por efecto Joule en las barras y en los electrodos, son relativamente importantes y actúan en detrimento de la potencia del mismo arco. Todo esto ayuda a comprender que, para una tensión elevada, la potencia máxima utilizable en el arco (KW en el arco), no corresponde a la intensidad máxima ni aun a la potencia máxima en los bornes del transformador, si no a una intensidad sensiblemente inferior, que es indicada para cada tensión utilizable por el constructor del horno.

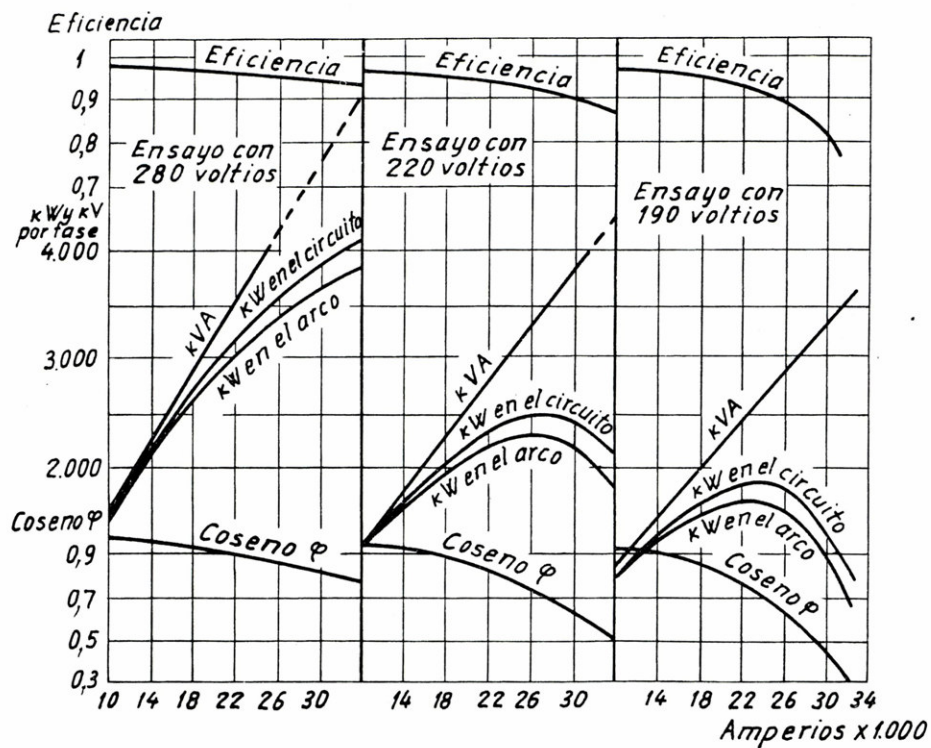


Figura 2.20.- Relación entre intensidad de corriente, potencia, factor de potencia y eficiencia, de la instalación para diferentes tomas de tensión en el transformador del horno (figura tomada del libro: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, tomo II, José Apraiz Barreiro)

Por otra parte, como se ha dicho anteriormente el factor de potencia durante la operación de un horno de arco, sin compensación es muy bajo. En tal situación, la onda de tensión sufre caídas muy significativas, que se mantienen durante la fundición de la chatarra de cada carga, volviendo a su valor nominal, durante los lapsos de tiempo en que se recarga nuevamente al crisol. La caída de tensión, es uno de los disturbios que evitan que el horno alcance su plena capacidad de operación. Así como también, afecta a la red eléctrica de la compañía suministradora y a sus usuarios, conectados en las mismas barras de alta tensión que la acería. De acuerdo a lo que se menciona, es necesario, compensar el factor de potencia a un valor que permita amortiguar dicha tensión.

La grafica de la figura 2.21, muestra, el voltaje de cada una de las fases ($V_L/\sqrt{3}$) al que opera el horno sin compensación del factor de potencia. Esta grafica corresponde al mismo ciclo de fundición que las figuras 2.1, 2.2 y 2.3, mostradas al inicio del capítulo.

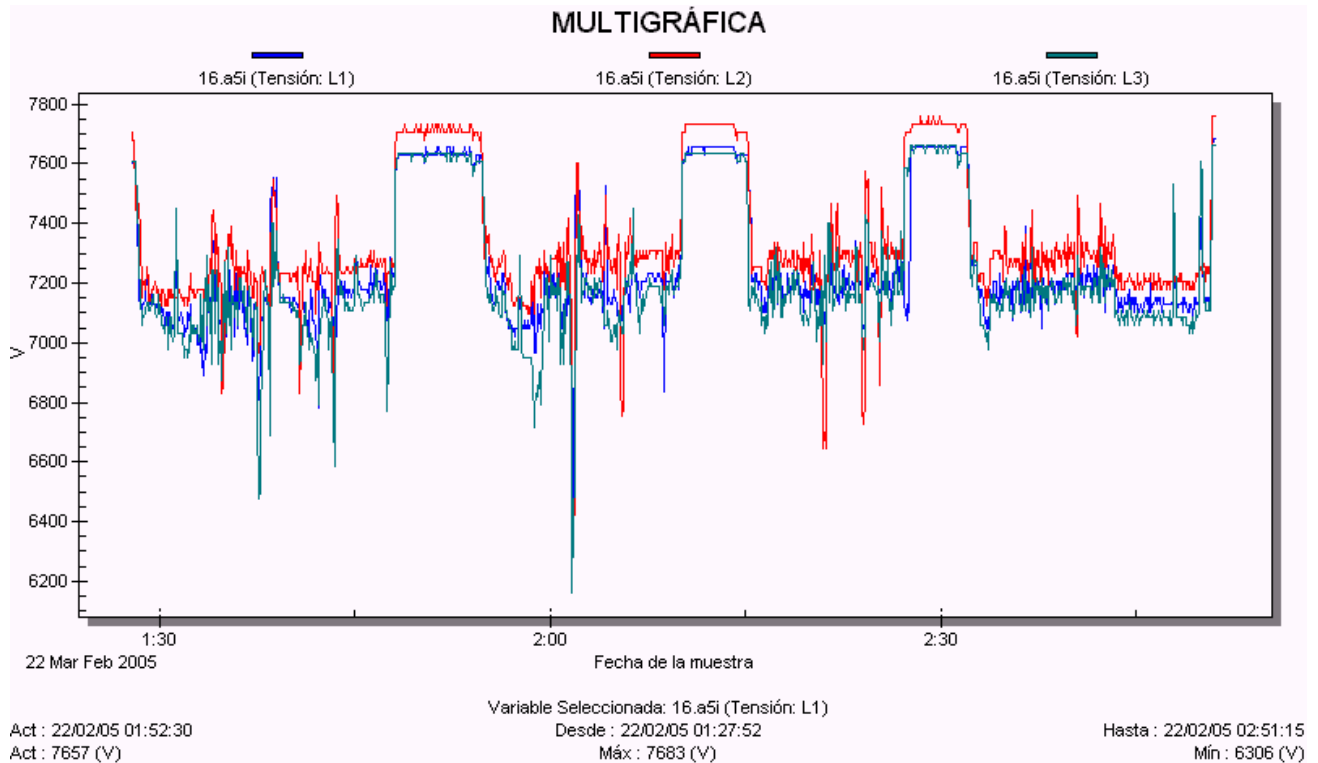


Figura 2.21.- Ondas de voltaje en cada una de las fases (L1, L2 y L3), típicas de un horno de arco (medición cortesía de TNV Consulting Co)

2.5.- Disturbios provocados por problemas de operación de electrodos y fallas a tierra

Durante el proceso de operación de un horno de arco, existen casos en los que se generan disturbios eléctricos provocados por problemas con la operación de los electrodos. Los disturbios más comunes, son: sobrecorrientes transitorias y desbalance en la onda de tensión, que se generan cuando algún electrodo se queda atorado con la chatarra, se rompe o se cae. En ese momento, el consumo de corriente aumenta drásticamente, ya que al desaparecer la pequeña distancia entre la punta del electrodo y la chatarra la impedancia que existía entre ambos desaparece, haciendo que el voltaje tienda a cero y que el consumo de corriente aumente rápidamente en la fase correspondiente.

Las fallas a tierra aunque no son muy frecuentes, por lo general, se presentan en el lado de baja tensión del transformador del horno. Debido a que durante la operación del horno algunos componentes eléctricos son afectados por: vibraciones, polvo metálico y el constante movimiento de los cables que conectan la salida del transformador hacia los electrodos (puesto que cambian de posición constantemente). Lo anterior, trae como consecuencia, que algunos materiales aislantes (baquelitas, aisladores de porcelana, etc.), se rompan ó disminuyan su rigidez dieléctrica; provocando fallas a tierra, de gran intensidad debido a la enorme densidad de corriente que circula a través de los conductores eléctricos.

Estos disturbios, aunque no son frecuentes, cuando se presentan, provocan que se disparen las protecciones del el sistema eléctrico de horno, y en situaciones extremas, las protecciones de la compañía suministradora. Las posibilidades de que esto suceda aumentan, cuando se tiene un bajo factor de potencia y presencia de corrientes armónicas, ya que los componentes eléctricos se encontraran saturados y por consecuencia las protecciones se accionaran hasta con la más mínima perturbación.

CAPITULO III

3.- METODOS DE COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA Y FILTRADO DE CORRIENTES ARMONICAS EN UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Introducción

La compensación del factor de potencia de un horno de arco eléctrico, se puede realizar por medio de un banco de capacitores, un filtro de absorción de corrientes armónicas o bien por medio un compensador estático. A lo largo del capítulo, se describen detalladamente los principios de funcionamiento y los componentes de cada uno de dichos equipos, junto con sus ventajas y desventajas desde el punto de vista eléctrico y económico. Se presentan dos ejemplos de aplicación, correspondientes a casos reales, para un banco de capacitores y para un filtro de absorción de corrientes armónicas, respectivamente, donde por medio de mediciones eléctricas, se muestra el efecto eléctrico provocado por la conexión de los equipos antes mencionados, al sistema eléctrico del horno que se presenta como ejemplo, en cada caso.

3.1 - Compensación con un banco de capacitores

Un banco de capacitores es un equipo que permite compensar el factor de potencia a valores deseados. Está formado por un conjunto de capacitores individuales (monofásicos o trifásicos) conectados entre sí, en un montaje serie, paralelo, o una combinación serie-paralelo, según el tamaño del banco y el nivel de voltaje de red en la que el banco se va a conectar. Referirse a un banco de capacitores simple, implica un banco de capacitores sin protección con reactores de sintonía o desintonía. Es decir, nos referimos en este caso, a un arreglo de banco de capacitores, automático o fijo, con todo el equipamiento requerido para su protección y control, pero sin incluir reactores de sintonía (para filtrado de corrientes armónicas), o desintonía (para rechazo de corrientes armónicas).

El banco de capacitores suele operar “fijo”, sin salir de operación entre ciclo y ciclo de fundición del horno. Usualmente, el banco es sacado de operación únicamente para dar mantenimiento a sus componentes, realizar reparaciones o por alguna otra causa imprevista.

Como método de compensación de un horno de arco, el compensar por medio de un banco de capacitores simple, tiene la ventaja de un costo de inversión sensiblemente más bajo que compensar con otros procedimientos, tales como el filtro de absorción o el compensador estático, cuyos principios de operación se discutirán más adelante.

El costo de mantenimiento de un banco de capacitores es normalmente más bajo que el de otros equipos eléctricos de potencia.

3.1.1.- Arreglo y configuración del banco

Un banco de capacitores para horno de arco, por lo general, es alambrado en conexión estrella con neutro flotante. A continuación se mencionan los motivos principales de ésta práctica:

- a) Evitar el paso de corrientes armónicas excesivas hacia tierra, a través de los capacitores
- b) Limitar las corrientes de falla en el banco de capacitores
- c) Disminuir el monto de la inversión, ya que los capacitores son conectados a un voltaje de fase a neutro, en vez de uno de línea y, como consecuencia, disminuye su costo.
- d) Proteger a los capacitores contra sobretensiones por los métodos de desbalance de voltaje o de corrientes, de neutro

Las figuras 3.1 y 3.2, muestran, dos arreglos típicos de un banco de capacitores para esta aplicación.

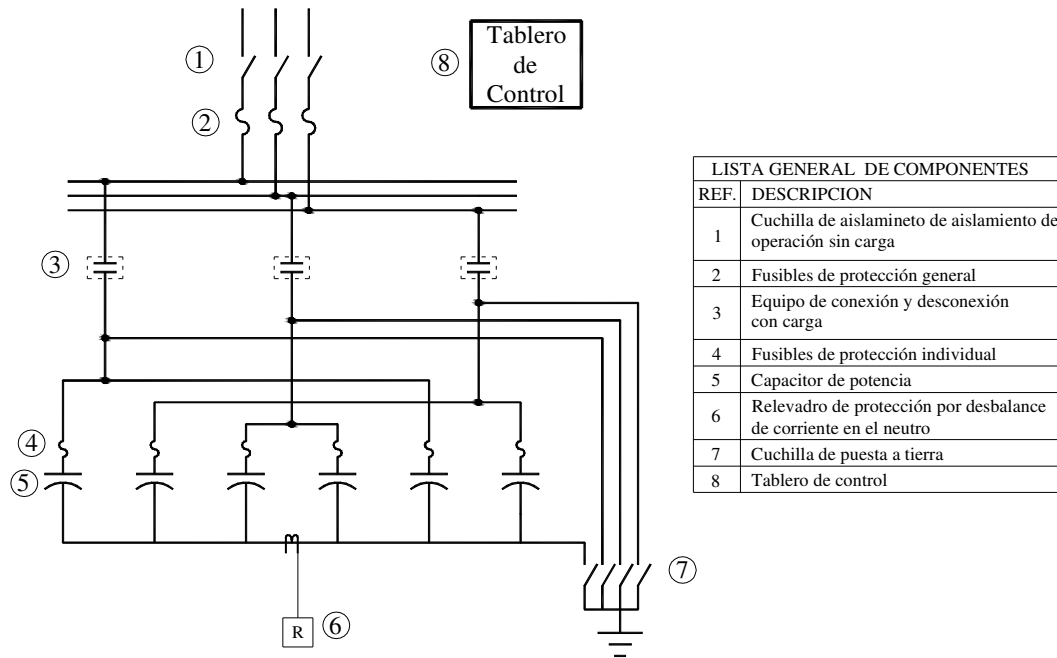


Figura 3.1.- Banco de capacitores en configuración estrella, con neutro flotante, con protección por desbalanceo de corriente de neutro (Diagrama cortesía de TNV Consulting Co). Nota: Ver descripción de componentes en el inciso 3.1.2).

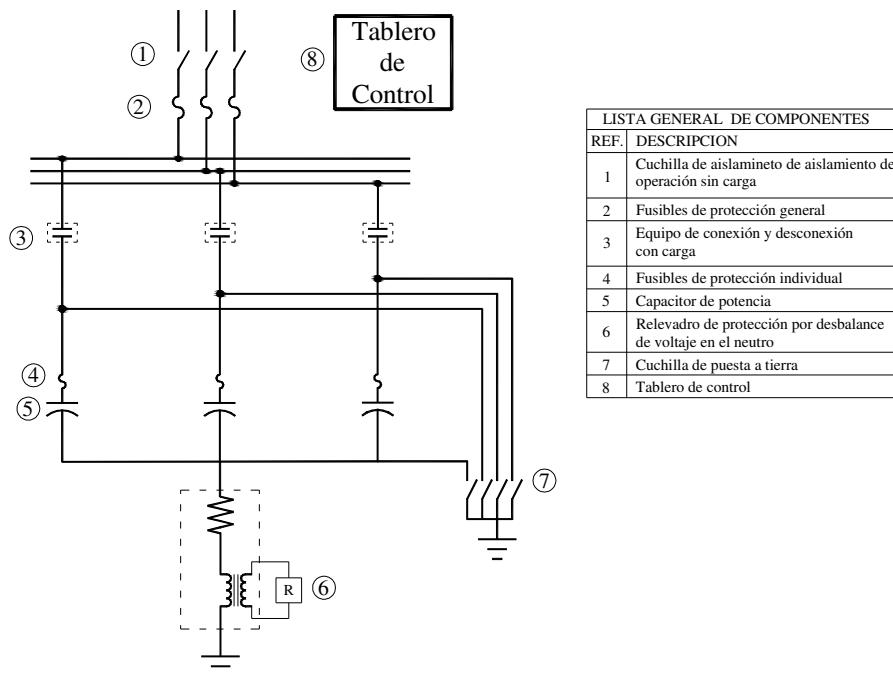


Figura 3.2.- Banco de capacitores en configuración estrella, con neutro flotante, con protección por desbalanceo de voltaje de neutro (Diagrama cortesía de TNV Consulting Co). Nota: ver descripción de componentes en el inciso 3.1.2).

3.1.2.-Componentes principales

Un banco de capacitores para horno de arco está formado por diferentes componentes, que en conjunto hacen posible la entrega de potencia reactiva, para compensar el factor de potencia. Tales componentes son seleccionados para operar en un ambiente altamente contaminado por disturbios eléctricos. A continuación se mencionan los principales componentes:

- a) Capacitores
- b) Fusibles para protección individual de los capacitores
- c) Equipo de conexión y desconexión con carga
- d) Fusibles para protección general del banco
- e) Cuchilla de desconexión sin carga y aislamiento de la red
- f) Equipos para protección por desbalanceo del neutro
- g) Cuchilla de puesta a tierra
- h) Tablero de control
- i) Apartarrayos

a) Capacitores

Aportan la potencia reactiva necesaria para compensar el factor de potencia y son seleccionados para soportar las sobrecorrientes y sobretensiones producidas por la operación del horno y por la presencia de corrientes armónicas. Por lo anterior, es práctica común usar capacitores con capacidades nominales sobredimensionadas en voltaje y en corriente. Para esto, es necesario tomar en cuenta el nivel de distorsión armónica, tanto de corriente como de voltaje, así como el espectro de corrientes armónicas que provoca el horno en su operación.

b) Fusibles para protección individual de los capacitores

La protección de un banco de capacitores esta íntimamente ligada con el arreglo y localización del mismo. A los fusibles usados para proteger cada uno de los capacitores del banco, se les denomina fusibles de protección individual. El fusible individual detecta e indica qué unidad ha fallado, aislándola del resto del banco lo suficientemente rápido para prevenir la ruptura del tanque y un daño a las unidades adyacentes, permitiendo a la vez que el resto de las unidades del banco permanezcan en servicio.

En instalaciones a la intemperie, es usual utilizar fusibles tipo expulsión, ya que con éstos se logra una protección eficiente y de bajo costo. Para su aplicación, es necesario coordinar la curva de probabilidad de ruptura del tanque del capacitor con la curva de fusión del fusible, a fin de que en caso de una falla en el capacitor, el fusible pueda fundirse antes de que el tanque del capacitor corra el riesgo de explotar. Los fusibles de este tipo son diseñados para interrumpir corrientes de falla de baja magnitud, con un tiempo de respuesta muy rápido, lo cual a su vez, implica que su uso esté restringido por el nivel de corriente que soporta un capacitor, en cortocircuito. Tal magnitud depende del nivel de la impedancia en el punto donde ocurre el cortocircuito antes de haber operado el fusible individual y de la cantidad de energía almacenada por los capacitores adyacentes, al capacitor fallado. Puesto que en tal situación la impedancia en el capacitor fallado tiende a hacerse cero, los capacitores sanos adyacentes descargan su energía almacenada hacia dicho capacitor, contribuyendo con una corriente adicional de cortocircuito. Si dicha corriente puede ser interrumpida por el fusible, esto no representa ningún problema. Sin embargo, cuando se instalan muchos capacitores en paralelo por fase, la cantidad de energía almacenada en los mismos, puede provocar que el tanque del capacitor fallado explote violentamente y que le suceda lo mismo al propio fusible.

Para esto se han hecho estudios a fin de poner un límite a la energía que soporta el tanque de un capacitor y, para fines prácticos, se considera recomendable no sobrepasar de 6000 KVAR, la potencia reactiva instalada con capacitores en paralelo (por fase), si la protección se realiza con fusibles individuales tipo expulsión.

En instalaciones de capacitores al interior de recintos cerrados, o dentro de gabinetes, deben usarse fusibles de potencia limitadores de corriente, que se caracterizan por interrumpir las corrientes de falla del capacitor en pocos milisegundos. De esta forma, se protege al capacitor y se evita el peligro de explosión del tanque y, por otra parte, se evita el efecto de ionización que se produce en la atmósfera, cuando opera el fusible tipo expulsión que, en caso de atmósfera cerrada, puede provocar un cortocircuito generalizado en el banco de capacitores.

Una opción diferente en instalaciones al interior es usar capacitores protegidos con fusibles internos. Se trata de una técnica consistente en dividir el capacitor, dentro de su tanque contenedor, en pequeñas secciones capacitivas protegidas cada una de ellas con un fusible que en caso de fallo, será operado por la descarga de la energía contenida en las secciones internas adyacentes.

c) Fusibles para protección general

Las corrientes de falla que se pretende interrumpir con estos fusibles suelen ser corrientes de gran magnitud, puesto que se trata de corrientes producidas por posibles cortocircuitos ya sea entre fases o de fase a tierra, entre componentes o entre componentes y estructura soporte, del banco de capacitores. Para este fin, pueden usarse fusibles de potencia tipo expulsión, en caso de instalaciones a la intemperie y para instalaciones al interior o dentro de gabinetes, se deben utilizar fusibles estándar de potencia o limitadores de corriente, cuya operación no emita gases fuera del fusible.

d) Equipo de conexión y desconexión con carga

Para las maniobras de energización y desenergización del banco, generalmente se usan contactores en vacío, ya que estos tienen la capacidad de operar con carga y están especialmente diseñados para soportar miles de maniobras de conexión y desconexión. Estos contactores permiten establecer bloqueos, por medio de contactos auxiliares que llevan incorporados, para impedir la energización del banco de capacitores cuando las cuchillas de desconexión sin carga están abiertas o cuando las cuchillas de puesta a tierra están cerradas. Por otra parte, por medio de estos contactores puede desenergizarse el banco cuando lo requiere la protección diferencial o cualquier otro tipo de alarma, incorporado al diseño de dicho banco. Su accionamiento puede ser manual (por medio de una pértiga) o eléctrico (señal eléctrica enviada desde el tablero de control).

Puede diseñarse el arreglo general del banco de capacitores, sin éstos contactores de operación eléctrica. El inconveniente, en caso de no llevarlos, es tener que abrir el interruptor general del horno para sacar de operación a dicho banco, cuando se necesite dar mantenimiento o sea necesario por cualquier otra razón.

e) Cuchilla de desconexión sin carga y aislamiento de la red

Permite desconectar el banco de capacitores, cuando se desea dejarlo aislado del sistema eléctrico del horno, por cualquier tipo de maniobras de reparación, mantenimiento, etc. Por otra parte, puede ser accionada a través de una pértiga, cuando es instalada a la intemperie o por medio de un mecanismo manual de cierre y apertura, si va dentro de un gabinete.

Para su operación, cuenta con un sistema de bloqueo que puede ser eléctrico, mecánico o electromecánico, para impedir su accionamiento si los contactores en vacío se encuentran cerrados, ya que, como su nombre lo indica, esta cuchilla no tiene capacidad para operar con carga.

En caso de que el banco de capacitores sea equipado con un interruptor general, tales cuchillas se instalan aguas arriba del mismo interruptor, con objeto de desenergizar por completo las barras de entrada al mismo, ya que de lo contrario dichas barras quedarían energizadas aun abriendo el mismo interruptor.

f) Protección por desbalanceo del neutro

A pesar de que la protección individual tiene las ventajas que se mencionan en el inciso b), también presenta inconvenientes. En el caso de un banco de capacitores conectado en estrella con neutro flotante, la falla y desconexión de cierto número de capacitores (al actuar su respectivo fusible) en alguna de las fases, provoca que la impedancia de cada fase del banco sea diferente, lo cual origina un desplazamiento eléctrico del neutro que, a su vez, ocasiona una sobretensión en los capacitores de la fase, o de las fases, que hayan quedado con mayor impedancia (fases con capacitores fallados).

La protección por desbalanceo del neutro se usa para no permitir que las sobretensiones resultantes en los capacitores sanos al fallar uno o mas capacitores, sobrepasen valores de 10% en permanencia (en caso de capacitores fabricados bajo normas norteamericanas) o en períodos intermitentes de hasta 12 horas (en caso de capacitores fabricados bajo normas IEC).

Se usan dos esquemas de protección por desbalance: protección por desbalanceo de corriente y protección por desbalanceo de tensión.

Para implementar un sistema de protección por desbalanceo de corriente de neutro (véase figura 3.1), se divide el banco de capacitores en dos estrellas iguales, ambas con neutro flotante y se unen ambos neutros entre si por medio de un cable conductor. En este cable de unión se instala un transformador de corriente, capaz de detectar la corriente que fluye de un neutro a otro al fallar alguna unidad capacitiva en el banco. Esta corriente está relacionada con el desbalanceo de voltaje producido por el fallo de capacitores y por medio de cálculo, se puede calibrar un relevador que recibe la señal del transformador de corriente, el cual puede desconectar todo el banco de capacitores (actuando sobre los contactores en vacío), en caso de que la sobrecorriente detectada corresponda a un sobrevoltaje excesivo en los capacitores sanos.

Este esquema tiene la ventaja de no ser afectado por desbalanceo de voltaje de red, tensiones o corrientes de terceras armónicas o corrientes de impulso por apertura o cierre de interruptores.

Para implementar un sistema de protección por desbalanceo de voltaje de neutro (véase la figura 3.2), se instala un transformador de potencial (especialmente diseñado para este fin), entre el neutro del banco de capacitores y tierra, cuya señal de salida es captada por un relevador, cuyo disparo se calibra para el valor de esta señal, que corresponde a un sobrevoltaje excesivo en los capacitores sanos. Este esquema tiene la ventaja de que no es necesario, dividir el banco de capacitores en dos estrellas.

g) Cuchilla de puesta a tierra

Permite descargar los capacitores a tierra cuando el banco ha salido de operación y se desean hacer maniobras de mantenimiento o reparación en él. Por motivos de seguridad, mientras la cuchilla se encuentra cerrada, se debe establecer un bloqueo sobre los contactores en vacío para impedir que éstos sean cerrados. Tal bloqueo, es efectuado mediante los contactos auxiliares incorporados a la cuchilla, los cuales se cierran o se abren en función del estado de operación de la cuchilla. A través de éstos contactos, se condiciona el accionamiento de los contactores en vacío. Por otra parte, si el banco

se encuentra energizado, debe establecerse un bloqueo sobre la cuchilla, para impedir que sea cerrada. El bloqueo se efectúa utilizando el mismo principio, sólo que ahora son los contactos auxiliares incorporados a los contactores de vacío, los que condicionan el accionamiento de la cuchilla.

Generalmente, el sistema de bloqueo de la cuchilla es del tipo electromecánico y consiste en una pequeña bobina que, al ser energizada, actúa sobre un mecanismo que impide a la cuchilla de tierra cualquier accionamiento.

h) Tablero de control

En él se encuentran los mandos para energizar y desenergizar el banco de capacitores, los relevadores para protección general y los relevadores de la protección por desbalanceo, así como los instrumentos indicadores de parámetros eléctricos del banco.

En algunas ocasiones se instala un analizador de parámetros eléctricos, con objeto de conocer el comportamiento del factor de potencia y otros datos eléctricos del banco o del horno. Para ello dicho analizador recibe muestras de corriente y de voltaje tomadas por medio de transformadores de corriente y de voltaje. Instalados tanto en la acometida del banco como entre el punto de conexión del banco de capacitores y el transformador de acometida al sistema del horno.

i) Apartarrayos

Protegen al banco de capacitores contra sobrevoltajes transitorios ocasionados por descargas eléctricas de origen atmosférico.

3.1.3.- Máxima compensación del factor de potencia permisible en la práctica

Con éste método de compensación, el valor que se puede alcanzar para el factor de potencia del horno, esta restringido por un fenómeno de resonancia. Este fenómeno es excitado por la presencia de las corrientes armónicas que producidas por el horno, que inciden sobre el circuito resonante formado entre el banco de capacitares y el transformador de acometida.

La frecuencia de resonancia que sintoniza el banco de capacitares con el transformador de acometida, puede calcularse conociendo la potencia de cortocircuito en el punto de conexión del banco al sistema eléctrico del horno y conociendo también la potencia del banco de capacitores. Dicha frecuencia de de resonancia, o frecuencia de sintonía, expresada en múltiplos de la frecuencia de red (orden de armónica) puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$h_0 = \sqrt{\frac{KV_{Acc}}{Q}}$$

Donde:

h_0 = Orden de la armonica de resonancia

KV_{Acc} = Potencia de cortocircuito en el punto de conexión del banco

Q = Tamaño del banco de capacitores en KVAR

La figura 3.3, muestra un diagrama eléctrico simplificado de la instalación de un horno de arco, incluyendo el transformador del horno (TH), el transformador de acometida (TA), y el banco de capacitores (Q). Se muestra en la figura la emisión de armónicas del horno ΣI_h y como alguna de éstas I_h , puede amplificarse en las ramas que representan las impedancias del banco de capacitores X_{ch} y el

transformador de acometida, junto con la red X_s , si ambos componentes forman un circuito resonante, de frecuencia armónica h_0 y esta frecuencia es inyectada por el horno en el nodo N.

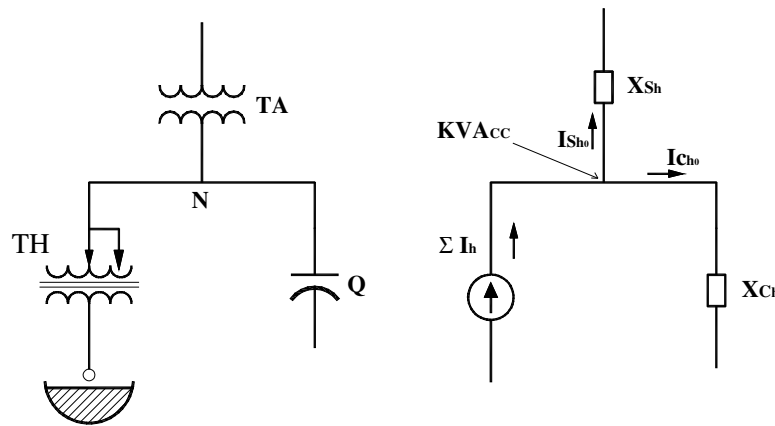


Figura 3.3.- Flujo de corrientes armónicas de resonancia (Figura tomada del libro: corrientes armónicas, del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

Las corrientes armónicas emitidas por la operación de un horno de arco, tienden a aumentar de intensidad a medida que el orden de éstas es cada vez más bajo y viceversa (ver figura 2.12, tema 2.2.1 del capítulo 2). Por tal motivo se debe evitar que la armónica de resonancia del banco de capacitores y el transformador de acometida, se acerque en orden de magnitud a armónicas de intensidad importante (orden bajo) emitidas por el horno. Para esto, debe procurarse que el tamaño del banco Q, expresado en KVAR, no sea muy grande. En la práctica se debe evitar que la frecuencia resonante (o de sintonía) mencionada se acerque a armónicas del orden de la séptima. Esto limita el tamaño de Q a un factor de potencia que, en la práctica, suele ser menor que 0.92.

3.1.4.- Beneficios con este tipo de compensación

El objeto de instalar un banco de capacitores, es compensar el factor de potencia a valores normalizados, por la compañía eléctrica suministradora. Con ésto se obtienen los beneficios siguientes:

- Se evita el pago de penalidad a la compañía eléctrica suministradora, por consumo con bajo factor de potencia
- Disminuye la potencia reactiva tomada de la red de la compañía suministradora
- La caída de voltaje se amortigua durante la operación del horno
- Se reduce notablemente la corriente que pasa por los transformadores y alimentadores del horno, cuando el horno está operando y se reducen las pérdidas eléctricas por efecto Joule

Como método de compensación del factor de potencia, resulta ser el más económico en inversión inicial.

3.1.5.- Limitaciones de este tipo de compensación

La operación de un horno de arco, se caracteriza por tener consumos de energía muy variables y por la emisión de disturbios eléctricos. Ante esto, la compensación con un banco de capacitores presenta los siguientes inconvenientes:

- a) No tiene capacidad para filtrar armónicas y hasta se pueden producir amplificaciones de las mismas, si es alto el factor de potencia con el que se pretende operar el horno.
- b) Sobrecompensa el factor de potencia durante lapsos en que el horno sale de operación
- c) No tiene capacidad para reducir el flicker
- d) No es posible compensar el factor de potencia a valores próximos a la unidad, sin que se genere un fenómeno de resonancia
- e) No tiene capacidad de balancear el sistema eléctrico del horno

3.1.6.- Compensación con un banco de capacitores, caso real

La figura 3.4, muestra el diagrama eléctrico de una acería, consistente en un horno de arco, operando junto a un tren de laminación de varillas de acero y una serie de cargas para servicios generales de la acería. Como se observa en la parte superior izquierda de la figura, la compensación del factor de potencia en el sistema eléctrico del horno se efectúa por medio de un banco de capacitores de operación fija de 13.2 MVAR.

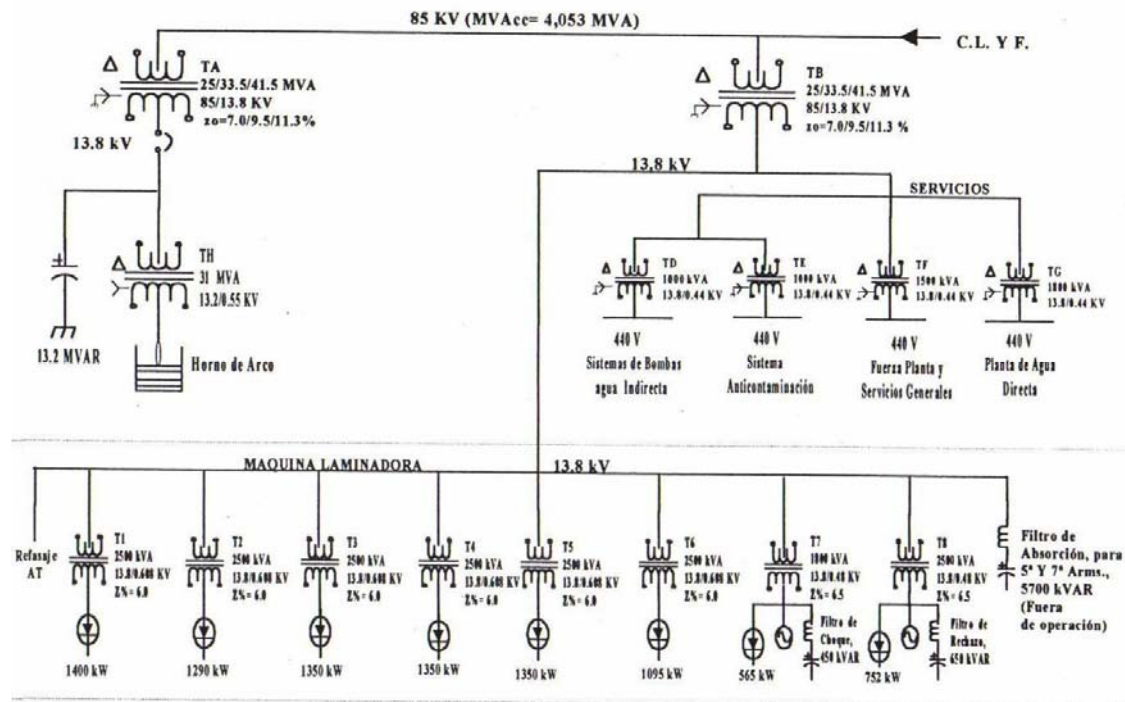


Figura 3.4.- Diagrama unifilar de una acería, en cuyo circuito de horno, la compensación del factor se efectúa con un banco de capacitores (imagen cortesía de TNV Consulting Co.)

Con objeto de conocer la influencia que tiene el banco de capacitores, instalado en el sistema eléctrico del horno, sobre las demandas y disturbios eléctricos de toda la acería, se han efectuado las mediciones mostradas en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7. Tales mediciones han sido tomadas en la acometida general de la acería, específicamente, junto a los equipos de medición de la compañía suministradora, que en este caso es LFC (Luz y Fuerza del Centro).

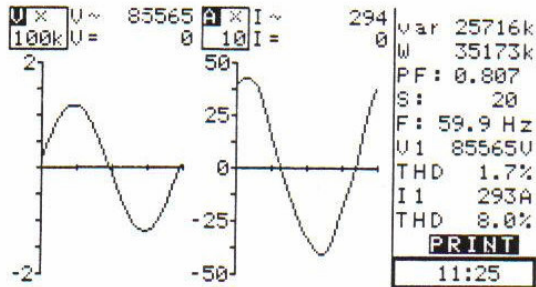
Las mediciones mostradas en la figura 3.5, fueron efectuadas, con el de horno operando sin banco de capacitores. Se observa que:

- a) No se cumple con la norma IEEE 519, en cuanto a la emisión de corrientes armónicas de la fuente hacia la red eléctrica de LFC. En efecto:
 - $I_{CC} = (4,053/(\sqrt{3} \times 85)) \times 10^3 = 27,562 \text{ A}$
 - $I_1 \cong 313 \text{ A}$ (según mediciones tomadas en la planta, a plena capacidad)
 - $I_{CC}/I_1 = 27,562/313 = 88$
 - Según la norma IEEE-519: $\text{THD (I)}_{\text{MAX.}} = 6 \%$
 - Según la figura 5: $\text{THD (I)} = 8 \% > 6 \%$

- b) El factor de potencia es menor a 0.90, por lo que la planta, trabajando en estas condiciones, debería pagar multa a LFC (Luz y Fuerza del Centro)

ACOMETIDA LFC A 85 kV
HORNO EN OPERACIÓN (1ª RECARGA)
BANCO DE CAPACITORES A 13.8 kV, DESENERGIZADO

DATE 16/02/99 TIME 11:25



DATE 16/02/99 TIME 11:26

ODD T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	0.37%	21	0.02%
3	1.90%	23	0.01%
5	1.92%	25	0.01%
7	0.56%	27	0.02%
9	0.28%	29	0.03%
11	0.09%	31	0.05%
13	0.15%	33	0.01%
15	0.02%	35	0.00%
17	0.03%	37	0.02%
19	0.01%	39	0.02%

Var 25716k
W 35173k
PF: 0.807
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 85565U
THD 1.7%
I1 293A
THD 8.0%

PRINT
11:26

i)

DATE 16/02/99 TIME 11:27

ODD T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	0.11%	21	0.02%
3	0.26%	23	0.03%
5	0.55%	25	0.01%
7	0.23%	27	0.02%
9	0.04%	29	0.03%
11	0.07%	31	0.02%
13	0.05%	33	0.02%
15	0.03%	35	0.03%
17	0.03%	37	0.01%
19	0.01%	39	0.02%

Var 25716k
W 35173k
PF: 0.807
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 85565U
THD 1.7%
I1 293A
THD 8.0%

PRINT
11:27

iii)

DATE 16/02/99 TIME 11:26

EVEN T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	7.29%	22	0.04%
4	1.94%	24	0.01%
6	0.72%	26	0.00%
8	0.57%	28	0.02%
10	0.16%	30	0.05%
12	0.03%	32	0.00%
14	0.14%	34	0.02%
16	0.05%	36	0.01%
18	0.04%	38	0.00%
20	0.08%	40	0.00%

Var 25716k
W 35173k
PF: 0.807
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 85565U
THD 1.7%
I1 293A
THD 8.0%

PRINT
11:26

ii)

DATE 16/02/99 TIME 11:27

EVEN T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	1.55%	22	0.00%
4	0.32%	24	0.02%
6	0.09%	26	0.02%
8	0.09%	28	0.01%
10	0.05%	30	0.01%
12	0.05%	32	0.01%
14	0.05%	34	0.02%
16	0.03%	36	0.00%
18	0.03%	38	0.02%
20	0.07%	40	0.01%

Var 25716k
W 35173k
PF: 0.807
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 85565U
THD 1.7%
I1 293A
THD 8.0%

PRINT
11:27

iv)

Figura 3.5.- Parámetros eléctricos en un horno de arco sin compensación del factor de potencia (medición cortesía de TNV Consulting Co.). Nota: i) para armónicas impares en la onda de corriente, ii) para armónicas pares en la onda de corriente, iii) para armónicas impares en la onda de voltaje, iv) para armónicas pares en la onda de voltaje

Las mediciones que se muestran en la figura 3.6, fueron efectuadas en la misma acería con el horno operando y el banco de capacitores energizado. Se observa que:

- El factor de potencia es ahora mayor que 0.90, motivo por el cual, la planta no paga multa
- El porcentaje de distorsión armónica THD (I) = 12%, excede aun más que en el caso anterior al valor permitido por la norma IEEE -519, THD (I)_{MAX} =6%, debido a que el banco de capacitores y el transformador de acometida TA, han sintonizado frecuencias de resonancia que coinciden con las de corrientes armónicas de baja frecuencia emitidas por el horno.

ACOMETIDA LFC A 85 kV
HORNO EN OPERACIÓN (1^{ra} RECARGA)
BANCO DE CAPACITORES 13.2 MVAR, 13.8 kV, ENERGIZADO

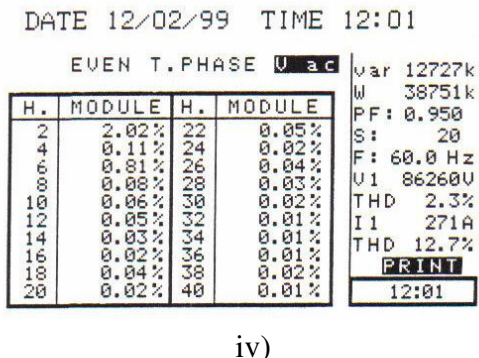
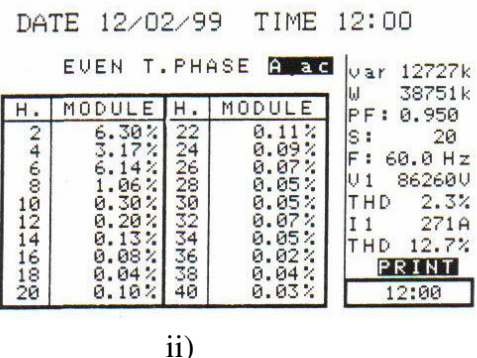
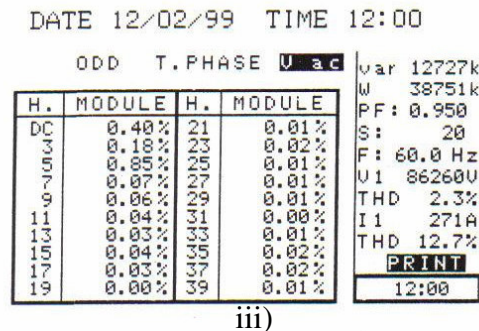
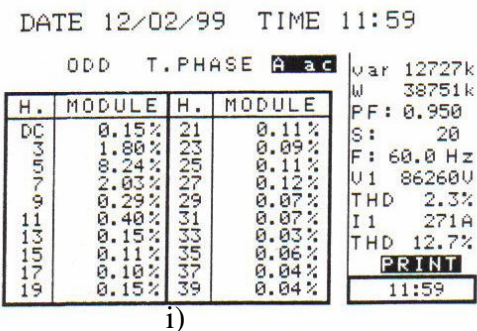
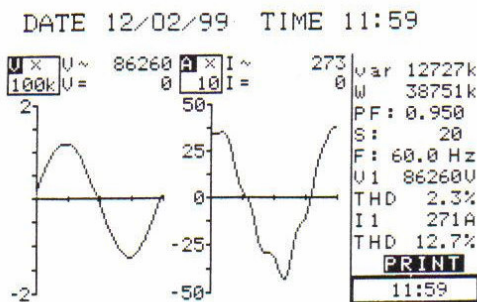


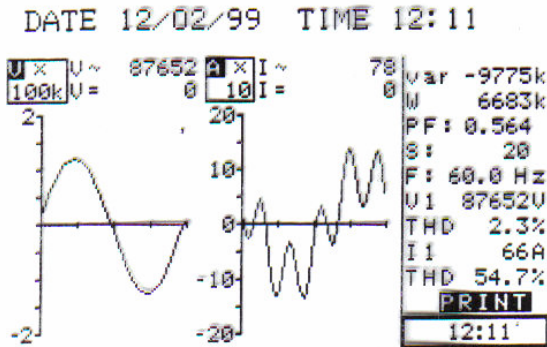
Figura 3.6.-Parámetros eléctricos en un horno de arco, con compensación del factor de potencia (medición, cortesía de TNV Consulting Co.). Nota: i) para armónicas impares en la onda de corriente, ii) para armónicas pares en la onda de corriente, iii) para armónicas impares en la onda de voltaje, iv) para armónicas pares en la onda de voltaje

Finalmente, la figura 3.7 muestra mediciones, en el punto de acometida de la planta con la red de LFC, efectuadas con el banco de capacitores operando en vacío (horno fuera de operación). Se observa que:

- a) Se ha producido una resonancia a 5^a armónica, de magnitud alarmante THD (I) = 54.1 %, con $I_5 = 65.23$ %. Bajo estas condiciones, por su puesto que no se cumple con los máximos de emisión armónica marcados por la norma IEEE-519, pero es tan alto el nivel de distorsión armónica generado en al red eléctrica suministradora que pueden originarse percances en las instalaciones de plantas vecinas a la acería, alimentadas por la misma red e incluso a los equipos de la subestación alimentadora de la compañía de LCF.
- b) El factor de potencia ha pasado de un valor inductivo a un valor capacitivo (-), sobrecompensado a la red de alta tensión de LFC.

De no ser porque la acería trabaja muy poco tiempo bajo estas condiciones (recarga del horno entre ciclo y ciclo de fundición), se pagaría una multa excesivamente alta a la compañía suministradora LFC.

ACOMETIDA LFC A 85 kV
HORNO FUERA DE OPERACION (DESPUES DE LA 1ª RECARGA)
BANCO DE CAPACITORES 13.2 MVAR, 13.8 kV, ENERGIZADO



DATE 12/02/99 TIME 12:12

ODD T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	1.57%	21	0.06%
3	2.37%	23	0.19%
5	65.23%	25	0.03%
7	2.94%	27	0.09%
9	0.20%	29	0.06%
11	1.21%	31	0.71%
13	0.27%	33	0.12%
15	0.06%	35	0.18%
17	0.06%	37	0.07%
19	0.01%	39	0.07%

Var -9775k
W 6683k
PF: 0.564
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 87652V
THD 2.3%
I1 66A
THD 54.7%

PRINT
12:12

i)

DATE 12/02/99 TIME 12:13

ODD T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	0.37%	21	0.01%
3	0.22%	23	0.02%
5	0.85%	25	0.01%
7	0.19%	27	0.00%
9	0.01%	29	0.01%
11	0.01%	31	0.00%
13	0.02%	33	0.02%
15	0.00%	35	0.03%
17	0.02%	37	0.01%
19	0.01%	39	0.00%

Var -9775k
W 6683k
PF: 0.564
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 87652V
THD 2.3%
I1 66A
THD 54.7%

PRINT
12:13

iii)

DATE 12/02/99 TIME 12:12

EVEN T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	2.69%	22	0.07%
4	1.22%	24	0.00%
6	1.18%	26	0.03%
8	0.63%	28	0.03%
10	0.09%	30	0.06%
12	0.04%	32	0.08%
14	0.10%	34	0.04%
16	0.08%	36	0.04%
18	0.04%	38	0.08%
20	0.05%	40	0.02%

Var -9775k
W 6683k
PF: 0.564
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 87652V
THD 2.3%
I1 66A
THD 54.7%

PRINT
12:12

ii)

DATE 12/02/99 TIME 12:13

EVEN T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	1.96%	22	0.02%
4	0.26%	24	0.01%
6	0.11%	26	0.00%
8	0.04%	28	0.01%
10	0.04%	30	0.01%
12	0.02%	32	0.00%
14	0.02%	34	0.01%
16	0.02%	36	0.01%
18	0.02%	38	0.00%
20	0.01%	40	0.01%

Var -9775k
W 6683k
PF: 0.564
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 87652V
THD 2.3%
I1 66A
THD 54.7%

PRINT
12:13

iv)

Figura 3.7.- Parámetros eléctricos, con el banco de capacitores energizado y con el horno fuera de operación (medición cortesía de la empresa TNV Consulting Co.). Nota: i) para armónicas impares en la onda de corriente, ii) para armónicas pares en la onda de corriente, iii) para armónicas impares en la onda de voltaje, iv) para armónicas pares en la onda de voltaje.

3.2 - Compensación con un filtro capacitivo de corrientes armónicas

Un filtro capacitivo consiste básicamente en un arreglo formado por la conexión en serie de un capacitor y un reactor. Este arreglo tiene la propiedad de aportar energía reactiva a frecuencia fundamental, de tipo capacitivo, para la compensación del factor de potencia; además absorber la corriente armónica cuya frecuencia coincida con la frecuencia de sintonía del filtro, es decir, la frecuencia para la cual la reactancia del capacitor y la reactancia del reactor son aproximadamente iguales. Para la frecuencia de sintonía, la impedancia del arreglo es puramente resistiva y muy baja. Es decir, el arreglo presenta una impedancia prácticamente nula para la armónica que se pretende filtrar, por lo que dicha armónica tiende a fluir hacia el arreglo, que se comporta como un sumidero de energía (filtro) a la frecuencia armónica filtrada.

Un filtro capacitivo de absorción de corrientes armónicas para horno de arco, es un conjunto de secciones capacitivas de filtrado (filtros capacitivos individuales), conectadas en paralelo, cada una de ellas sintonizada para absorber una de las armónicas más significativas (ver figura 2.12, del capítulo II) que genera la operación del horno, o sea, cada sección del filtro absorbe una armónica diferente.

3.2.1.- Arreglo y configuración del filtro

Usualmente, los filtros de absorción de corrientes armónicas para éste tipo de aplicación, son diseñados para operar a un nivel de voltaje de media tensión: 13.2 kV a 34.5 kV, conectándose cada una de sus secciones de filtrado en configuración estrella con neutro flotante.

Este tipo de conexión, además de impedir el paso a tierra de las corrientes armónicas de secuencia cero, hace más económico el diseño del filtro, debido a que los capacitores son conectados a un voltaje de fase a neutro, en lugar de a voltaje de línea y, como consecuencia, disminuye su costo. Cuando se usa la modalidad de protección del filtro por desbalanceo de corriente del neutro, el arreglo estrella de cada una de las secciones del filtro se divide en dos estrellas idénticas, tal como se muestra en la figura 3.8 (ver inciso 3.1.1), mientras que para la modalidad de protección por desbalanceo de voltaje del neutro, no es necesario dividir la sección de filtrado, ver figura 3.9.

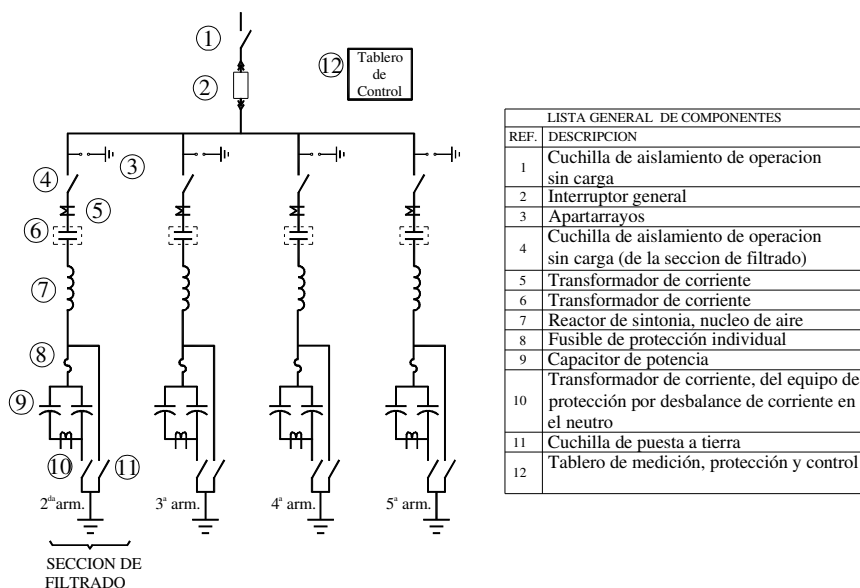


Figura 3.8.- Filtro de absorción de corrientes armónicas, formado por cuatro secciones de filtrado, equipada cada una con protección por desbalanceo de corriente en el neutro (figura cortesía de TNV Consulting Co)

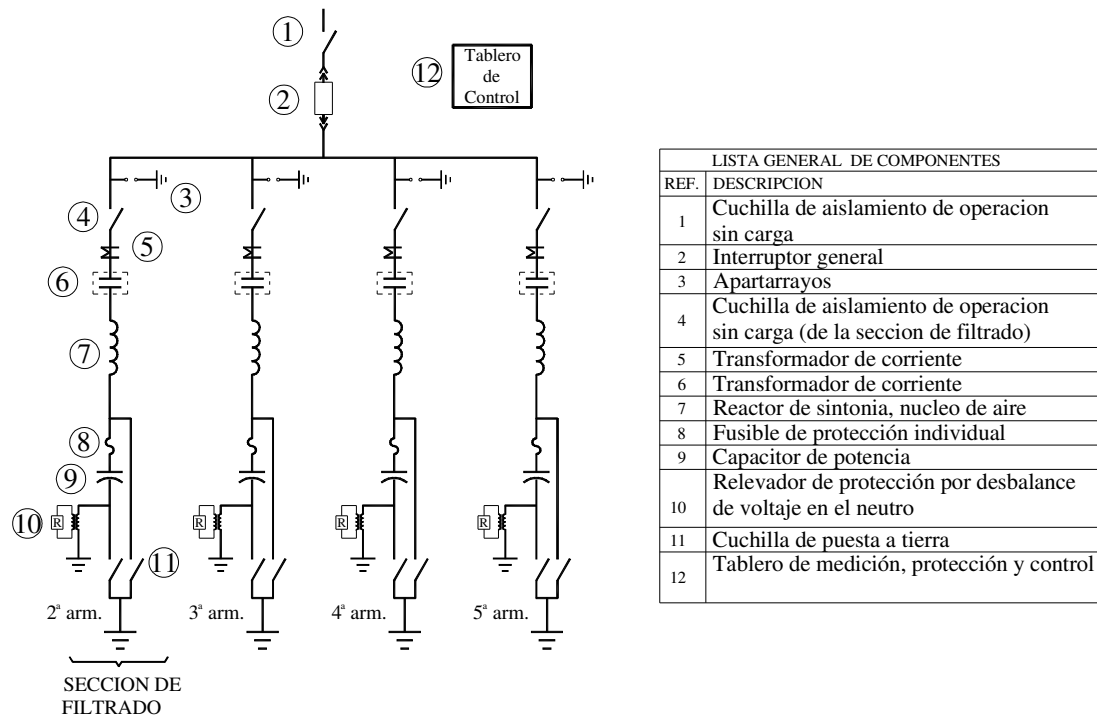


Figura 3.9.- Filtro de absorción de corriente armónica, formado por cuatro secciones de filtrado, equipada cada una con protección por desbalance de voltaje en el neutro (figura cortesía de TNV Consulting Co)

3.2.2.- Componentes principales del filtro

De las figuras 3.8 y 3.9, se puede ver que la mayoría de los componentes de un filtro de absorción de corrientes armónicas, se encuentran también en un banco de capacitores. Aunque los criterios empleados para la selección de los componentes del filtro de absorción, difieren por los motivos que se mencionaran más adelante en el capítulo IV, inciso 4.5. En general, en las figuras 3.8 y 3.9, puede verse que un filtro de absorción de corrientes armónicas esta formado por los siguientes componentes: secciones de filtrado, equipo de protección general, equipo de conexión general sin carga y aislamiento, tablero de instrumentación y control.

a) Sección de filtrado

Los diagramas unifilares mostrados en las figuras 3.10 y 3.11, muestran dos configuraciones típicas de secciones de filtrado (ver inciso 3.2.1), puede verse el equipo que marca la diferencia entre un banco de capacitores y un filtro de absorción de corrientes armónicas es el reactor núcleo de aire (ver figuras 3.1 y 3.2, del inciso 3.1.1).

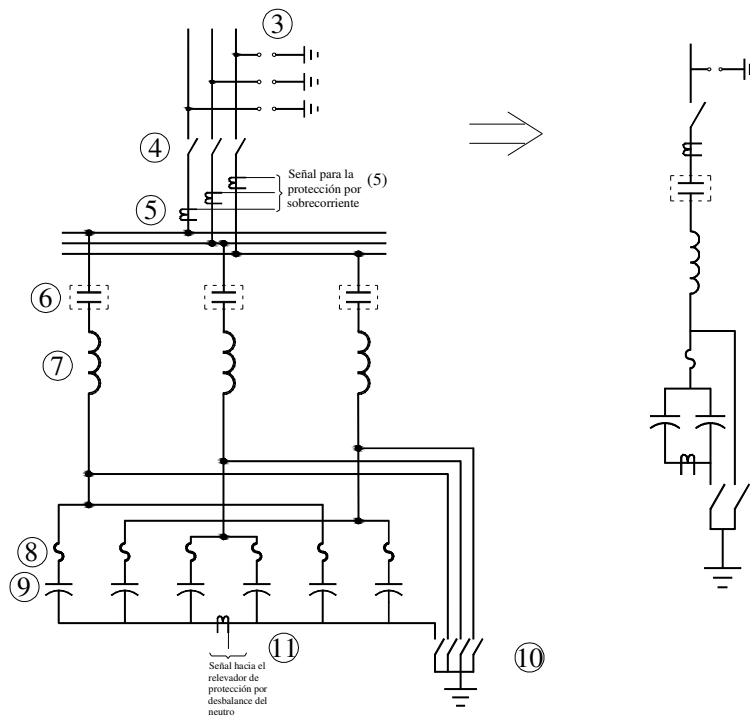


Figura 3.10.- Sección de filtrado en conexión estrella, con neutro flotante y protección por desbalance de corriente en el neutro (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

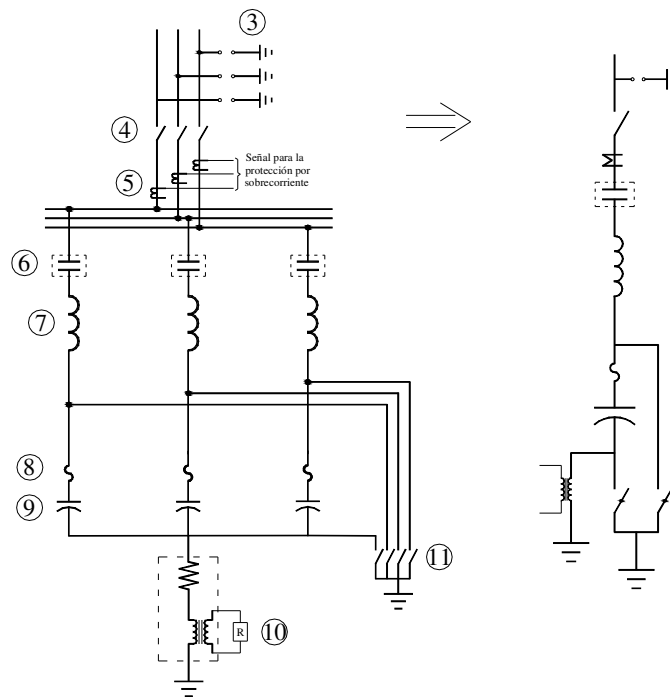


Figura 3.11.- Sección de filtrado en conexión doble estrella, con neutro flotante y protección de desbalance de voltaje en el neutro (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

Enseguida se menciona en forma generalizada la función del reactor núcleo de aire, del equipo de protección por sobrecorriente y cortocircuito, equipos que no se encuentran los bancos de capacitores mostrados en las figuras 3.1 y 3.2.

i) Reactores núcleo de aire

Los reactores en conjunto con los capacitores, sintonizan y absorben la armónica de interés, así como también protegen a la sección por corrientes de descarga, que fluyen hacia ésta, cuando es puesta en operación. Esta corriente, es producto de la descarga de o las secciones adyacentes previamente energizadas, ya que durante un tiempo muy corto la impedancia de la sección entrante, es muy baja (casi cero). Mas adelante en el capítulo IV, se explican detalladamente, los efectos de la corriente a frecuencia fundamental y los efectos de las corrientes armónicas al conectar un reactor núcleo de aire en serie con un capacitor de potencia

ii) Equipo para protección por sobrecorriente y cortocircuito

Consiste básicamente de en un transformador de corriente: TC (instalado en cada fase de la sección), de un relevador de sobrecorriente:50, y de un relevador de sobrecorriente instantáneo: 51. Cuando se presenta una sobrecorriente o bien un cortocircuito, el respectivo relevador envía una señal eléctrica hacia el tablero de control del filtro, el cual de acuerdo a la lógica de control con la que fue diseñado actúa sacando de operación a la sección (por medio de su equipo de conexión y desconexión con carga); o bien sacando de operación al filtro en su totalidad por medio del equipo del equipo de protección general (los motivos, se explican mas adelante en el inciso 3.2.3).

b) Equipo de protección general del filtro

Consiste de un interruptor: 52, de un relevador de sobrecorriente 51 y de un relevador de sobrecorriente instantáneo y de tiempo: 50/51 (protección por cortocircuito). Generalmente se utiliza un interruptor en vacío, ya que éste equipo tiene la capacidad de operar con cargas capacitivas y de soportar miles de maniobras de conexión y desconexión con carga. Así también, es usual utilizar relevadores del tipo electrónico (ó microprocesado). De esta manera el filtro es protegido por sobrecorriente y cortocircuitos entre fases ó entre fases y tierra.

Además, dicho interruptor también puede ser accionado por medio de la protección por desbalance de neutro ó bien por cualquier otra protección, cuyo accionamiento amerite sacar el filtro de operación. Por otra parte, el interruptor también sirve como medio de conexión y desconexión general del filtro.

c) Tablero de instrumentación y control

Esta formado por una gran cantidad de dispositivos electrónicos de control alambrados utilizando una lógica de control de una mayor complejidad que la de un banco de capacitores. La lógica con la que se alambran los dispositivos de control, esta en función de la operación del filtro, y el objetivo principal es mantener en operación al filtro aun y cuando se presente una falla en el mismo, cuyos efectos no provoquen un fenómeno de resonancia.

3.2.3.- Operación del filtro

Suele ser de operación fija, sin salir de operación entre ciclo y ciclo de fundición del horno. Es importante considerar que cuando se opera en forma manual o automática un filtro de este tipo, o bien, cuando se planea su protección, las secciones de filtrado que lo componen deben energizarse y

desenergizarse, o bien simultáneamente, si el tamaño del transformador de acometida lo permite, o en forma secuencial, de manera que:

- a) Al energizar el filtro, debe entrar en operación, primero la sección de filtrado de la armónica más baja, después la de la armónica que le sigue y así sucesivamente.
- b) Al desenergizar el filtro, incluso por motivos de alarma o protección del mismo, la desenergización de las secciones debe efectuarse en un orden inverso al anterior, ósea: primero la de filtrado de la armónica de orden más alto, después la de la armónica siguiente y así sucesivamente.

Esto se debe hacer así para evitar un fenómeno de resonancia en una sección del filtro que quedara energizada, habiéndose desenergizado una sección de filtrado de una armónica de orden menor.

3.2.4.- Beneficios de este tipo de compensación

Durante la operación del horno de arco eléctrico en conjunto con el filtro de absorción de corrientes armónicas, se logran los siguientes beneficios:

- a) Se evita el pago de penalidad por bajo factor de potencia y se recibe una bonificación económica por parte de la compañía eléctrica suministradora
- b) El factor de potencia puede alcanzar un valor próximo a la unidad
- c) Disminuye significativamente la potencia reactiva tomada de la red de alta tensión
- d) Se amortigua la caída de voltaje
- e) Se reduce notablemente la corriente que pasa por los transformadores y alimentadores del horno, y se reducen las pérdidas eléctricas, tanto por efecto Joule como por efecto Foucault provocando por las corrientes armónicas. Esto se traduce en ahorros importantes en el consumo de la energía eléctrica del horno.
- f) La distorsión armónica se reduce a valores permitidos por la norma IEEE-519
- g) Se evita el fenómeno de resonancia
- i) El horno alcanza su plena capacidad nominal de operación
- j) Las vibraciones mecánicas ocasionadas por armónicas son mitigadas
- k) Aumento de productividad en hornos (aproximadamente 20% de acuerdo a datos estadísticos)

La inversión económica con este método de compensación aumenta con respecto al método anterior, sin embargo, debido a los beneficios adicionales tales como filtrado de armónicas y ahorro de energía, dicha inversión es amortizada en un tiempo relativamente corto. Actualmente, este es el tipo de compensación más utilizado en las acerías.

3.2.5.- Limitaciones de este tipo de compensación

La operación de un horno de arco, se caracteriza por tener consumos de energía muy variables y por la emisión de disturbios eléctricos. Ante esto, la compensación con un filtro pasivo presenta los siguientes inconvenientes:

- a) Sobrecompensa el factor de potencia durante lapsos en que el horno sale de operación
- b) No tiene capacidad para reducir el flicker
- c) No tiene capacidad para balancear el sistema eléctrico del horno

3.2.6.-Recomendaciones para la corrección del factor de potencia y filtrado de corrientes armónicas en una acería

En general, una acería consta de un circuito eléctrico de hornos y de un circuito eléctrico de laminaciones. La compensación del factor de potencia y el filtrado de corrientes armónicas en la acería en general, desde el punto de vista técnico, se debe hacer en forma equilibrada, esto es, en ambos circuitos. En el caso del circuito de laminaciones, también se incluyen los circuitos derivados, esto puede verse en la figura 3.12 del inciso 3.2.7

Para el circuito de hornos, la opción más recomendable es utilizar un filtro de absorción de corrientes armónicas, por lo beneficios mencionados en el inciso 3.2.4. Desde el punto de vista técnico, el filtro debe sintonizar armónicas de mas bajo orden, usualmente 2^a, 3^a, 4^a y 5^a armónica, por tratarse de armónicas de gran intensidad y para evitar posibles fenómenos de resonancia entre armónicas de bajo orden y secciones de filtrado sintonizadas a armónicas de orden superior; así también, desde el punto de vista económico es practica común elevar el factor de potencia a un valor aproximado de 0.98, ya que con éste factor de potencia el horno puede alcanzar su plena capacidad nominal de operación. Además, de lo anterior, el costo del filtro, puede ser amortizado en un tiempo relativamente corto (de dos a tres años como máximo). Por otra parte, en la práctica se ha observado que con un factor de potencia de 0.98, un horno logra aumentar su producción en aproximadamente 20%.

Para el circuito de laminaciones, la experiencia indica que la compensación del factor de potencia y el filtrado de corrientes armónicas, debe hacerse preferentemente en el lado secundario (baja tensión) de los transformadores que alimentan los procesos de laminación y de servicios. Para determinar la localización, la sintonía y el tamaño de dichos filtros, se requiere un estudio efectuado en planta por personal especializado.

Con las medidas antes mencionadas, la acería lograra los siguientes beneficios:

- a) Bonificación de la compañía suministradora por alto facto de potencia
- b) Incremento del 20% de capacidad de producción en los hornos
- c) Mejor regulación de voltaje
- d) Ahorros de energía de 7% en laminaciones
- e) Aumento de productividad del 10 en laminaciones

3.2.7.- Compensación del factor de potencia y filtrado de corrientes armónicas, con un filtro capacitivo, caso real.

La figura 3.12, muestra el diagrama eléctrico de una acería que cuenta con dos hornos de arco, donde uno de ellos es utilizado para realizar el proceso de fundición, mientras que el otro es utilizado para el proceso de afino (horno de olla), ambos conectados en el lado secundario del transformador T-5 (acometida de los hornos), operando junto a un tren de laminación alimentado del transformador T-1. Puede verse que la compensación es efectuada mediante un filtro capacitivo, consistente en cuatro secciones de filtrado, sintonizadas a las armónicas de 2^o, 3^o, 4^o y 5^o orden, respectivamente.

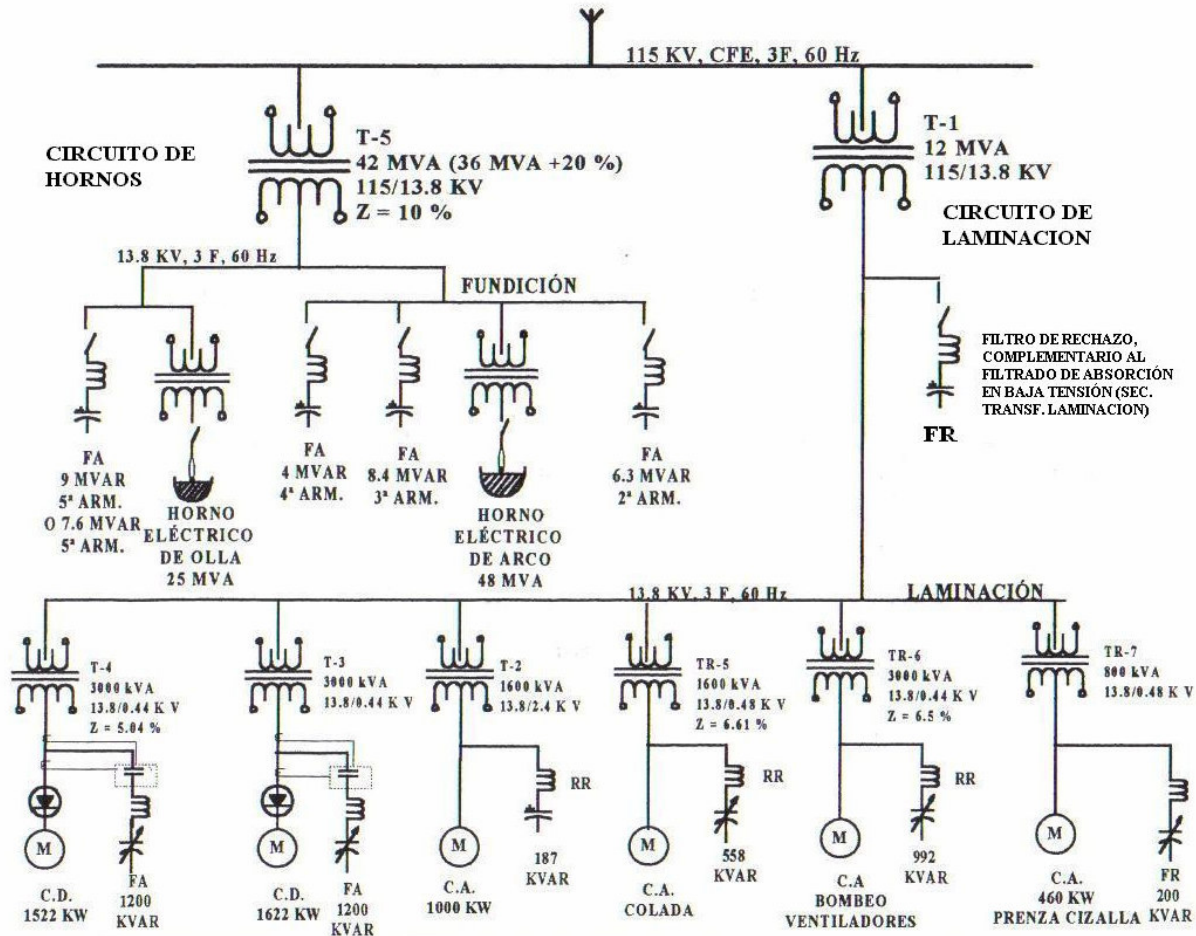


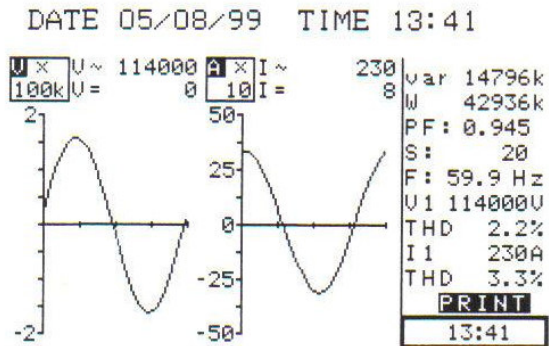
Figura 3.12.- Diagrama unifilar de una acería mostrando la conexión de dos hornos de arco eléctrico y la conexión de filtros capacitivos de absorción (imagen cortesía de TNV Consulting Co.)

Con el fin de conocer la influencia que tiene el filtro, sobre las demandas y disturbios eléctricos de la acería en su conjunto, se han efectuado las mediciones que se muestran en las figuras 3.13 y 3.14. Tales mediciones han sido tomadas en la acometida general de la acería, junto a los equipos de medición de la compañía suministradora, que en este caso es la CFE (Comisión Federal de Electricidad). Las mediciones, fueron efectuadas con el horno de 40 MVA en operación, junto con el tren de laminación.

Las mediciones que se muestran en la figura 3.13, fueron efectuadas con el horno y el filtro, en operación. Se observa que:

- Se cumple con la norma IEEE – 519, en cuanto a la emisión de corrientes armónicas de la fuente hacia la red eléctrica de LFC. En efecto:
 - Según la IEEE – 519: el THD (I) mas conservador es del 2.5 % (a 115 KV), para una relación de $I_{CC} / I_1 < 20$.
 - Según la figura 3.13: THD (I) = 2.2 %
- El factor de potencia, ha sobrepasado el valor mínimo exigido por la normatividad (0.90). motivo por el cual, la planta no paga multa.

ACOMETIDA C.F.E., A 115 KV
HORNO DE ARCO EN 1ª RECARGA
LAMINACIÓN EN OPERACIÓN NORMAL



DATE 05/08/99 TIME 13:41

ODD T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	3.83%	21	0.01%
3	0.80%	23	0.04%
5	1.33%	25	0.04%
7	0.27%	27	0.09%
9	0.16%	29	0.09%
11	0.20%	31	0.09%
13	0.02%	33	0.05%
15	0.04%	35	0.03%
17	0.11%	37	0.07%
19	0.06%	39	0.03%

Var 14796k
W 42936k
PF: 0.945
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 114000U
THD 2.2%
I1 230A
THD 3.3%

PRINT
13:41

i)

DATE 05/08/99 TIME 13:42

ODD T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	0.09%	21	0.01%
3	0.16%	23	0.03%
5	0.51%	25	0.07%
7	0.20%	27	0.02%
9	0.04%	29	0.02%
11	0.01%	31	0.01%
13	0.03%	33	0.01%
15	0.04%	35	0.02%
17	0.03%	37	0.02%
19	0.04%	39	0.02%

Var 14796k
W 42936k
PF: 0.945
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 114000U
THD 2.2%
I1 230A
THD 3.3%

PRINT
13:42

iii)

DATE 05/08/99 TIME 13:42

EVEN T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	2.90%	22	0.07%
4	0.28%	24	0.03%
6	0.16%	26	0.03%
8	0.11%	28	0.02%
10	0.10%	30	0.10%
12	0.05%	32	0.01%
14	0.02%	34	0.04%
16	0.03%	36	0.05%
18	0.01%	38	0.11%
20	0.04%	40	0.03%

Var 14796k
W 42936k
PF: 0.945
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 114000U
THD 2.2%
I1 230A
THD 3.3%

PRINT
13:42

ii)

DATE 05/08/99 TIME 13:43

EVEN T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	2.14%	22	0.01%
4	0.35%	24	0.02%
6	0.13%	26	0.01%
8	0.07%	28	0.02%
10	0.05%	30	0.00%
12	0.04%	32	0.01%
14	0.03%	34	0.00%
16	0.02%	36	0.01%
18	0.01%	38	0.01%
20	0.01%	40	0.01%

Var 14796k
W 42936k
PF: 0.945
S: 20
F: 59.9 Hz
U1 114000U
THD 2.2%
I1 230A
THD 3.3%

PRINT
13:43

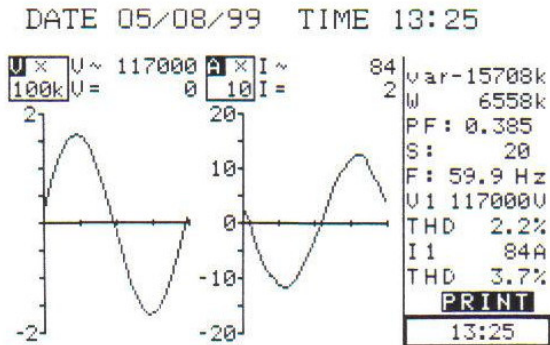
iv)

Figura 3.13.- Parámetros eléctricos durante la operación del horno de arco de 40 MVA y su filtro de absorción de corrientes armónicas (medición cortesía de TNV Consulting Co.). Nota: i) para armónicas impares en la onda de corriente, ii) para armónicas pares en la onda de corriente, iii) para armónicas impares en la onda de voltaje, iv) para armónicas pares en la onda de voltaje.

La figura 3.14, muestra mediciones tomadas en la misma acería, con el horno fuera de operación, por lo que el filtro ha quedado operando en vacío. Se observa que:

- a) El factor de potencia pasa de un valor inductivo a un valor capacitivo (-), sobrecompensando a la red de alta tensión de la CFE.
- b) El porcentaje de distorsión armónica en la onda de corriente THD (I) y en la onda de voltaje THD (V), se mantiene prácticamente igual a la medición mostrada en la figura 3.13. Es decir, que éste método de compensación además de mantener el porcentaje de distorsión armónica dentro de los niveles establecidos por la norma IEEE – 519, también evita que se genere el fenómeno de resonancia, mostrado en el caso anterior (ver figura3.7).

ACOMETIDA C.F.E., A 115 KV
HORNO DE ARCO FUERA DE OPERACIÓN
LAMINACIÓN EN OPERACIÓN NORMAL



DATE 05/08/99 TIME 13:25

ODD T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	2.46%	21	0.08%
3	0.71%	23	0.07%
5	2.71%	25	0.02%
7	0.68%	27	0.05%
9	0.08%	29	0.05%
11	0.31%	31	0.09%
13	0.11%	33	0.02%
15	0.01%	35	0.08%
17	0.06%	37	0.00%
19	0.10%	39	0.01%

Var-15430k
W 6693k
PF: 0.397
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 117000U
THD 2.3%
I1 83A
THD 3.7%

PRINT
13:25

i)

DATE 05/08/99 TIME 13:26

ODD T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
DC	0.05%	21	0.01%
3	0.03%	23	0.04%
5	0.35%	25	0.04%
7	0.18%	27	0.02%
9	0.05%	29	0.03%
11	0.08%	31	0.01%
13	0.02%	33	0.01%
15	0.04%	35	0.03%
17	0.03%	37	0.01%
19	0.03%	39	0.01%

Var-15430k
W 6693k
PF: 0.397
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 117000U
THD 2.3%
I1 83A
THD 3.7%

PRINT
13:26

iii)

DATE 05/08/99 TIME 13:26

EVEN T.PHASE A ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	2.24%	22	0.09%
4	0.40%	24	0.04%
6	0.18%	26	0.12%
8	0.04%	28	0.08%
10	0.06%	30	0.05%
12	0.03%	32	0.04%
14	0.06%	34	0.05%
16	0.03%	36	0.03%
18	0.13%	38	0.02%
20	0.03%	40	0.03%

Var-15430k
W 6693k
PF: 0.397
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 117000U
THD 2.3%
I1 83A
THD 3.7%

PRINT
13:26

ii)

DATE 05/08/99 TIME 13:27

EVEN T.PHASE U ac

H.	MODULE	H.	MODULE
2	2.12%	22	0.02%
4	0.36%	24	0.02%
6	0.15%	26	0.01%
8	0.09%	28	0.01%
10	0.07%	30	0.02%
12	0.04%	32	0.01%
14	0.04%	34	0.01%
16	0.04%	36	0.01%
18	0.03%	38	0.01%
20	0.01%	40	0.01%

Var-15430k
W 6693k
PF: 0.397
S: 20
F: 60.0 Hz
U1 117000U
THD 2.3%
I1 83A
THD 3.7%

PRINT
13:27

iv)

Figura 3.14.- Parámetros eléctricos, con el horno de arco de 40 MVA fuera de operación y con el filtro de absorción de corrientes armónicas operando (medición cortesía de TNV Consulting Co). Nota: i) para armónicas impares en la onda de corriente, ii) para armónicas pares en la onda de corriente, iii) para armónicas impares en la onda de voltaje, iv) para armónicas pares en la onda de voltaje

3.3.- Compensación con un compensador estático

El compensador estático es un equipo que permite compensar el factor de potencia del horno a valor unitario en todo instante y es capaz de amortiguar de manera muy eficaz todos los disturbios eléctricos provocados por la operación de un horno de arco.

En esencia, el compensador estático consiste en varios filtros capacitivos operando en paralelo con un reactor, que a frecuencia fundamental tiene una capacidad en KVA similar a la capacidad total en KVAR de los filtros. El paso de corriente hacia el reactor esta controlado por un banco de tiristores de forma que el flujo de energía reactiva de los capacitores puede regularse para que fluya hacia el horno o hacia el reactor, según sea la necesidad de compensación del horno en cada instante. De esta forma se logra una compensación en tiempo real, por fase, independientemente entre si, de la potencia reactiva que demanda el horno y produce un balanceo de la carga que ésta representa hacia la red, junto con la compensación de su factor de potencia, en forma instantánea a valor unitario y el filtrado de las principales corrientes armónicas que provoca la operación del horno.

3.3.1.- Principio de operación de un compensador estático

El objeto del compensador estático (Static Var Compensator: SVC, en ingles), es regular la potencia reactiva entregada al horno en tiempo real. Para ello el reactor controlado por tiristores (Tiristor Controller Reactor: TCR, en ingles) se comporta como una fuente de potencia reactiva variable. Con esto se logra que la potencia reactiva que se almacena en el reactor más la potencia reactiva que consume el horno, sea igual a en todo momento, a la potencia reactiva aportada por los filtros (FC). Esto permite reducir la potencia reactiva tomada de la línea de alta tensión a casi cero, eliminando así la caída de tensión en el lado primario del transformador de acometida. En el diagrama unifilar simplificado, que se muestra en la figura 3.15, puede verse un horno de arco eléctrico, cuya compensación se efectúa con un compensador estático.

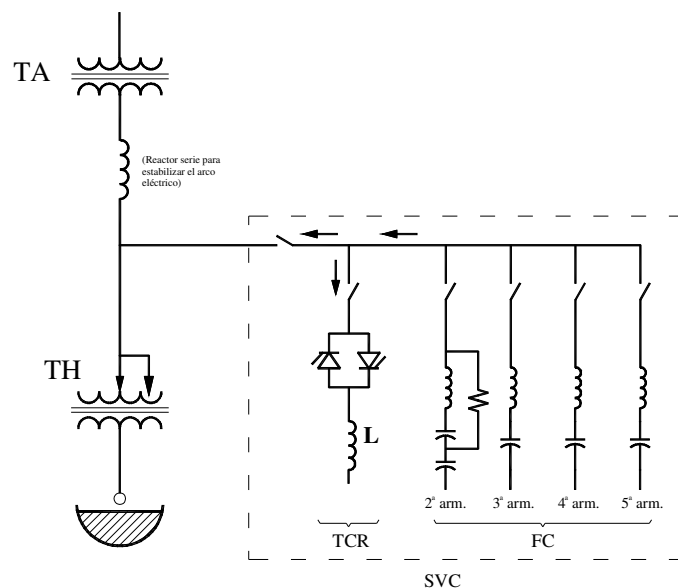


Figura 3.15.- Diagrama unifilar simplificado que muestra la compensación de un horno de arco, mediante un compensador estático (diagrama unifilar cortesía de TNV, Consulting Co.).

3.3.2.- Componentes del compensador estático

En el diagrama unifilar que se muestra en la figura 3.16, se muestran únicamente los componentes esenciales que integran al compensador estático, cuyas funciones se describen al final de dicha figura 3.16.

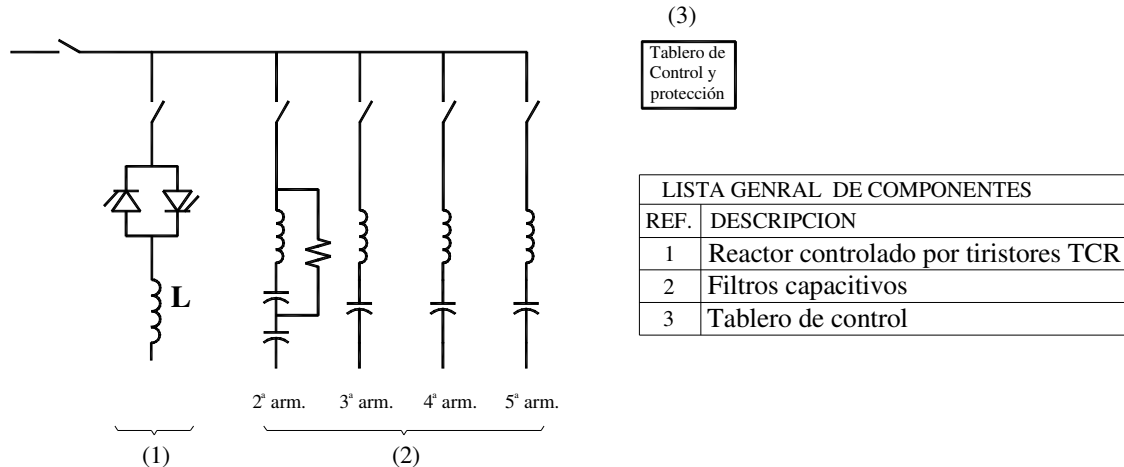


Figura 3.16.- Diagrama unifilar simplificado de un compensador estático (Imagen tomada del libro: corrientes armónicas del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

a) Reactor controlado por tiristores (TCR)

En seguida se describen los componentes que integran al TCR:

- Válvula tiristorizada tipo BCT (Bidirectionally Conducting Thyristor)-. Es básicamente un control bidireccional (o de onda completa), consiste en dos tiristores conectados en antiparalelo. El flujo de potencia hacia la carga se controla mediante la variación del tiempo de conducción o ángulo de retraso de disparo de los tiristores, ambos dispositivos son encapsulados en un mismo comportamiento con sus compuertas de disparo separadas, esto se hace con objeto de obtener un BCT de tamaño compacto. Por otra parte, el enfriamiento del BCT se efectúa por medio de agua des-ionizada.
- Reactor núcleo de aire.-Almacena temporalmente (durante un cuarto de ciclo) energía reactiva proveniente de los filtros para luego devolverla a los mismos (durante otro cuarto de ciclo). El aislamiento de las espiras de cobre con las que está hecho el reactor, se efectúa utilizando fibra de vidrio impregnada con resina epoxica. Esto le permite a dicho reactor operar a la intemperie y autoventilarse, sin que sus características de linealidad se vean alteradas

b) Filtros pasivos

Como ya se ha mencionado, las armónicas de mayor intensidad emitidas por la operación de un horno de arco son de 2º, 3º, 4º y 5º orden y por otro lado también emite interarmónicas durante el periodo inicial del ciclo de fundición. Aunado a esto el TCR emite un espectro de corrientes armónicas, que dependen fundamentalmente del ángulo de retraso de disparo de los tiristores, siendo dichas armónicas de orden 3, 5, 9, 11 y 13.

Por lo anterior, los filtros pasivos del SVC, además de reducir la distorsión armónica y aportar potencia reactiva, también deben evitar cualquier una posible resonancia paralelo (excitada por las interarmónicas y las armónicas del TCR), entre los mismo y el transformador de acometida. Como medida para evitar dicha resonancia, el filtro capacitivo de segunda armónica es diseñado con sus capacitores montados en un arreglo serie paralelo. Esto permite equipar al filtro con una resistencia conectada entre el final del reactor de sintonía y la parte intermedia del arreglo de capacitores.

c) Sistema de protección y control

Un controlador eléctrico toma las señales de corriente y voltaje en la acometida del horno y modula el cierre y apertura de los tiristores BCT, de forma que la compensación de potencia reactiva se produzca de manera instantánea, según a demanda de potencia reactiva de cada una de las fases del horno. El equipo de control y el banco de tiristores BCT, junto con su sistema de enfriamiento, se localizan al interior de un cuarto de control que se instala cerca de los componentes principales del SVC: reactores, filtros capacitivos que, normalmente se instalan a la intemperie.

3.3.3.- Beneficios con este tipo de compensación

Un compensador estático se instala con objeto de compensar el factor de potencia, filtrar corrientes armónicas y reducir el flicker. Con lo cual se obtienen los siguientes beneficios:

- a) Se evita el pago de penalidad por bajo factor de potencia y se obtienen mejores bonificaciones económicas por parte de la compañía eléctrica suministradora
- b) El factor de potencia alcanza un valor unitario en todo momento
- c) La potencia reactiva tomada de la red de la compañía suministradora, se reduce a casi cero
- d) Se estabiliza y regula el voltaje, durante la operación del horno
- e) Se reduce notablemente la corriente que pasa por los transformadores y alimentadores del horno, cuando el horno está operando y se reducen las pérdidas eléctricas, tanto por efecto Joule como por efecto Foucault provocando por las corrientes armónicas. Esto se traduce en ahorros importantes en el consumo de la energía eléctrica del horno.
- f) La distorsión armónica se reduce a valores permitidos por la norma IEEE-519
- g) Se evita el fenómeno de resonancia
- g) Se reduce el flicker
- h) Se balancea la carga eléctrica del horno, que normalmente se presenta como una carga altamente desbalanceada hacia la red eléctrica suministradora, de forma que el compensador estático actúa como un acondicionador de potencia
- i) Se logra una reducción en el consumo de electrodos con que opera el horno.
- j) Las vibraciones mecánicas ocasionadas por armónicas son mitigadas
- k) Aumento de productividad en hornos (más del 20% de acuerdo a datos estadísticos)

Los beneficios que se han mencionado se reflejan directamente en un aumento en la productividad y en ahorros de energía eléctrica. Cabe mencionar que en la industria siderúrgica actual, la aplicación de compensadores estáticos en hornos de arco, solo se efectúa para aquellos de gran capacidad (aproximadamente 400 MVA), por razones económicas, puesto que los ahorros en el costo de la energía demandada por los mismos, permite amortizar en un tiempo relativamente corto la inversión económica hecha en el compensador estático (de dos a tres años, según las diferentes compañías proveedoras)

3.3.4.- Limitaciones de este tipo de compensación

En la actualidad, el compensador estático es el equipo más sofisticado y eficiente para mejorar la calidad de la energía en un horno de arco, ya que no presenta ninguno de los inconvenientes de los métodos antes descritos. Sin embargo, este tipo de compensación presenta algunos inconvenientes, tales como:

- a) Costo de inversión inicial relativamente alto
- b) Costo de mantenimiento más alto que el caso de utilizar un banco de capacitores o un filtro de absorción de corrientes armónica, para lograr la potencia reactiva del horno.
- c) Tiempos de entrega de refacciones, tardados

CAPITULO IV

- 4.- DISEÑO DE UN FILTRO DE ABSORCION DE CORRIENTES ARMÓNICAS PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO DE 27, 000 KVA, 13.8 KV, 3F, 60 Hz.**

Introducción

En el inciso 3.2 del capítulo III, se ha descrito en detalle el principio de funcionamiento de un filtro capacitivo de absorción, para la compensación del factor de potencia y filtrado de armónicas en un horno de arco, así como un arreglo usual para este tipo de filtro, sus componentes principales y los beneficios que este tipo de compensación proporciona, así como también sus limitaciones.

En el presente capítulo se desarrolla la metodología del diseño y construcción de un filtro de este tipo. Así también se desarrolla la memoria de cálculo del filtro y su respectiva ingeniería de detalle.

El diseño del filtro de absorción que se muestra como ejemplo en esta tesis se encuentra actualmente en operación y el autor de la misma, trabajó como ingeniero residente de obra en el proceso de instalación y arranque de este filtro. Para la elaboración de esta tesis, el autor ha trabajado asesorado por el director de TNV Consulting Co., Dr. Ing. Alfredo Navarro Crespo, que fue quien diseñó el filtro original.

4.1.- Valores nominales del sistema eléctrico del horno

En la figura 4.1, se muestra el diagrama unifilar del sistema eléctrico del horno que se va a compensar y el filtro de absorción que se va a diseñar, como motivo principal de esta tesis. En el inciso 1.5.2 del capítulo uno se describen, en general, los principales componentes del sistema eléctrico de un horno de arco.

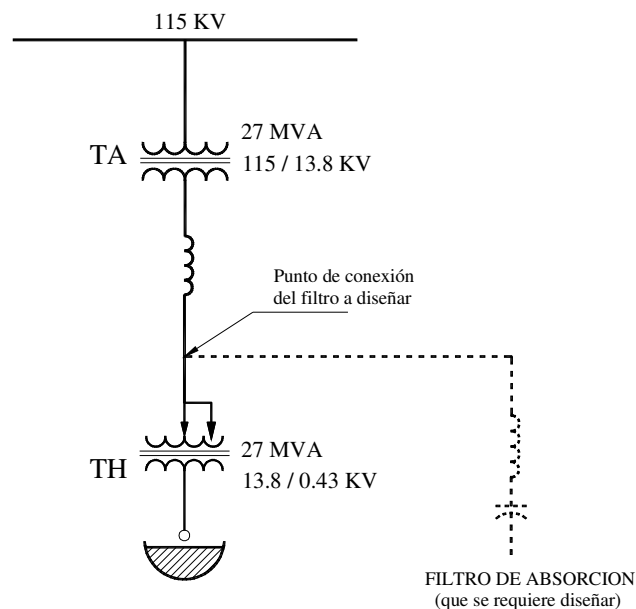


Figura 4.1.- Diagrama unifilar del sistema eléctrico del horno (imagen cortesía de TNV Consulting Co.)

En la figura anterior, puede verse que el sistema eléctrico de nuestro horno, en particular, se inicia formalmente en el punto de acoplamiento del transformador de acometida: TA, con la barras del alta tensión, a 115 KV, de la compañía suministradora: CFE. Entre el transformador TA y el horno propiamente dicho se encuentra un segundo transformador conocido como transformador del horno: TH. A continuación se proporcionan las características eléctricas de ambos transformadores y los valores eléctricos nominales del horno:

- a) Transformador de acometida TA
- Potencia aparente 27 MVA
 - Voltaje en el lado primario 115 KV
 - Voltaje en el lado secundario 13.8 KV
- b) Transformador del horno TH
- Potencia aparente (potencia del horno) 27 MVA
 - Voltaje en el lado primario 13.8 KV
 - Voltaje en el lado secundario 430 V (variable)
 - Corriente en el lado secundario 36.3 KA (variable)
- c) Valores nominales del horno
- Potencia aparente 27 MVA
 - Voltaje (lado primario de TH) 13.8 KV
 - Factor de potencia (estimado a plena carga) 0.73
 - Corriente nominal a frecuencia fundamental (a 13.8 kV) 1130 A

4.2.- Emisión de corrientes armónicas durante la operación del horno

La figura 2.12 (capítulo II), muestra el espectro de corrientes armónicas típico que emite un horno de arco durante su operación, así como el valor en por ciento de éstas, con respecto a la corriente nominal del horno. Dicho espectro muestra el resultado de múltiples mediciones efectuadas en hornos de arco y sirve como base de diseño. Se usan estos datos estadísticos cuando no se tienen mediciones efectuadas en el horno que se va a compensar, ya sea por estar éste en fase de proyecto o por cualquier tipo de dificultad para obtener datos medidos.

En nuestro caso, las mediciones obtenidas durante la operación del horno de arco al que se aplica el trabajo de esta tesis, se muestran en la tabla 4.1. La primera columna contiene el orden de cada armónica emitida por el horno en operación; la segunda, su valor en por ciento con respecto a la corriente nominal del horno y la tercera, el valor de cada una de estas corrientes armónicas, expresado en amperes.

Cada valor I_h (A) de esta tabla, coincide con el resultado de aplicar el porcentaje I_h (%) a la corriente nominal del horno a frecuencia fundamental, que es de 1130 A.

Tabla 4.1.- Armónicas más significativas emitidas por el horno y su valor en por ciento y en amperes

h	I_h (%)	I_h (A)
2 ^a	11	124
3 ^a	10	113
4 ^a	9	102

h = Orden de las armónicas

I_h (%) = Corriente de cada armónica, en por ciento, respecto a la corriente nominal del horno

I_h (A) = Corriente de cada armónica, en amperes

4.3.- Determinación del tamaño del filtro en KVAR's totales

El factor de potencia promedio al que opera un horno de arco eléctrico, sin compensación, es aproximadamente 0.73 (ver tabla 2.1, del capítulo dos). El factor de potencia que se desea alcanzar con la instalación del filtro es de aproximadamente 0.98, ya que con este factor el horno puede alcanzar su plena capacidad nominal de operación y, además, el tamaño del filtro a utilizar puede ser construido con un costo de inversión que puede ser recuperado en un tiempo relativamente corto (de dos a tres años, como máximo).

La figura 4.2 representa los parámetros eléctricos de un horno de arco, con y sin compensación del factor de potencia.

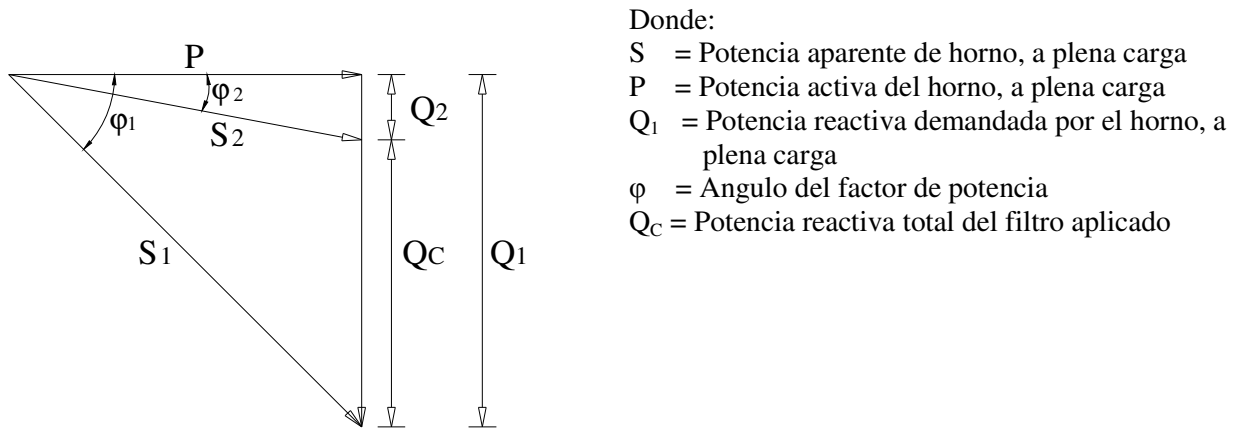


Figura 4.2.- Demandas eléctricas del horno con y sin compensación del factor de potencia. Nota: el subíndice 1 es para los parámetros eléctricos, antes de instalar el filtro, el subíndice 2 es para los parámetros eléctricos, después de instalar el filtro con compensación

A partir de la figura anterior se deduce la ecuación 1, con la que es posible determinar el tamaño Q_C del filtro:

$$Q_C = P (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2) \quad (1)$$

En donde: $P = S_1 \cos \varphi_1 = 27,000 \times 0.73 = 19,710 \text{ KW}$

Cálculo de la potencia reactiva total del filtro:

Datos:

$$P = 19,710 \text{ KW}$$

$$FP_1 = 0.73$$

$$FP_2 = 0.98 \text{ (deseado, o especificado por el usuario del horno)}$$

$$\text{tg } \varphi_1 = \text{tg} (\text{arc cos } 0.73) = 0.94$$

$$\text{tg } \varphi_2 = \text{tg} (\text{arc cos } 0.98) = 0.20$$

Sustituyendo los datos anteriores en la ecuación 1, se obtiene la potencia reactiva Q_C:

$$Q_C = 19,710 (0.94 - 0.20) = 14,585 \text{ KVAR}$$

4.4.- Arreglo y configuración general del filtro

El arreglo seleccionado para el filtro de absorción, es el que muestra la figura 3.9 del inciso 3.2.1. En nuestro caso, el filtro estará formado por tres secciones de filtrado, sintonizadas a la segunda, tercera y cuarta armónica, respectivamente. La figura 4.3 muestra el diagrama unifilar simplificado del filtro que se va a diseñar.

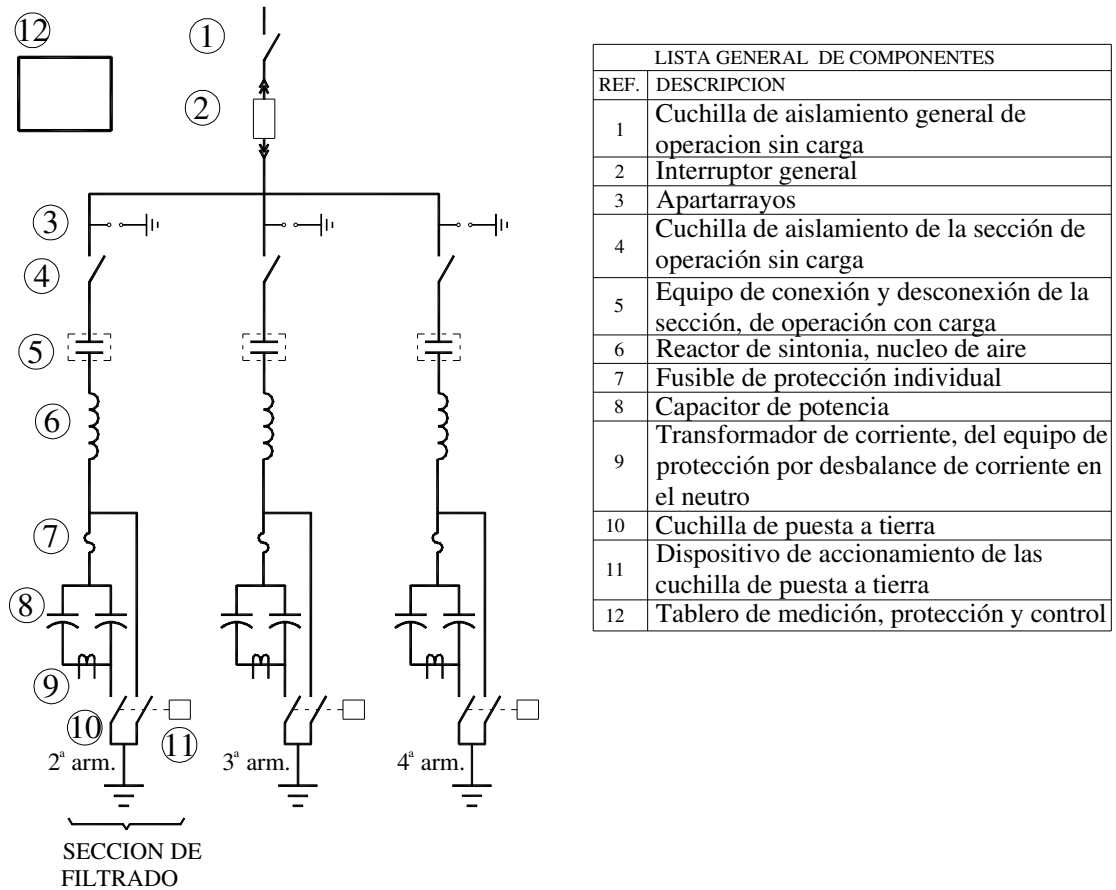


Figura 4.3.- Diagrama unifilar del filtro de absorción que se va a diseñar (imagen cortesía de TNV Consulting Co.)

4.5.- Procedimiento de diseño de filtros de absorción de corrientes armónicas, para hornos de arco eléctrico de fundición de acero

Para diseñar un filtro de absorción de corrientes armónicas y compensar el factor de potencia: FP, en un horno de arco se procede de la forma siguiente:

- 1° Se determina el tamaño total del filtro, en KVAR efectivos, partiendo del FP del horno sin compensar, del FP deseado y del tamaño en KVA del horno, a plena carga. Con estos datos de partida, calculamos el tamaño total del filtro usando la fórmula de las tangentes: $Q = W (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$.
- 2° Se forma una tabla con los valores máximos de corrientes armónicas (con respecto a la corriente nominal del horno) que emite el horno operando a plena carga, tomadas de mediciones de campo (efectuadas a la máxima potencia con que se logre operar el horno sin ayuda de capacitores, o bien, compensado moderadamente con capacitores existentes) o, a falta de mediciones de campo, tomadas de valores estadísticos como los que se muestran en la Tabla 1, del inciso 2.
- 3° Se calculan las secciones del filtro, comenzando por la sección de filtrado de la armónica de orden más bajo del espectro de armónicas que debemos filtrar: normalmente la 2ª armónica. El tamaño en KVAR de cada una de estas secciones debe tomarse el más bajo posible, cumpliendo con el requisito de que los capacitores seleccionados para formar el arreglo capacitivo de la sección en turno de diseño sean capaces de absorber la corriente armónica de sintonía completa, sin que se sobrepase el máximo valor de voltaje total (fundamental y armónico) que pueden soportar los capacitores, ni la sobrecorriente máxima admisible (fundamental y armónica) en los mismos, según las normas usadas en su diseño. Los parámetros que definen el comportamiento eléctrico de una sección de filtrado n, son la capacitancia C_n del arreglo de capacitores y la inductancia L_n del reactor de sintonía. Para efectos de cálculo de la inductancia L_n , se usa un valor de frecuencia de sintonía: f_n , ligeramente inferior al orden exacto de la frecuencia armónica que se desea filtrar. Esto se hace con objeto de evitar una posible resonancia serie entre el transformador de acometida y la sección de filtrado n, al sintonizar a una armónica de orden n presente en la onda de voltaje de la red eléctrica suministradora.

La suma fasorial de la reactancia capacitiva X_{Cn1} y la reactancia inductiva X_{Ln1} , ambas a frecuencia fundamental, resulta ser la impedancia de la sección Z_{n1} , también a frecuencia fundamental, es decir, $Z_{n1} = X_{Cn1} - X_{Ln1}$. En general: $Z_{nn} = X_{Cnn} - X_{Lnn}$, siendo Z_{nn} la impedancia que presenta la sección n del filtro al paso de una armónica de orden n.

En esta notación estamos haciendo coincidir la denominación de una sección cualquiera: n, del filtro, con el orden de la armónica: $h_0 = n$, a la que está sintonizada dicha sección del filtro, por medio de sus componentes capacitiva: C_n , e inductiva: L_n .

La reactancia capacitiva del arreglo de capacitores a frecuencia fundamental, X_{Cn1} , siempre es de un valor mayor que Z_{n1} , por el efecto del reactor de sintonía operando en serie con los capacitores. Tal situación provoca una caída de voltaje a frecuencia fundamental en los capacitores de cada fase del filtro: V_{Cn1} , cuyo valor es mayor que el voltaje nominal de la red de fase a neutro. Esto representa un sobrevoltaje en los capacitores, a frecuencia fundamental, de la misma magnitud

de la caída de voltaje que se presenta en el reactor de sintonía, a la misma frecuencia fundamental, pero de signo contrario.

Como se ha mencionado en el inciso 3, la impedancia Z_{nn} que presenta una sección n , al flujo de la corriente armónica I_n , resulta ser de un valor prácticamente nulo ($Z_{nn} = X_{Cnn} - X_{Lnn} \approx 0$). Por consiguiente, la caída de tensión entre fase de la red y neutro que provoca el paso de la corriente armónica I_n por la sección de filtrado n , es prácticamente nula. Sin embargo, el paso de ésta corriente I_n a través del arreglo de capacitores, provoca en los mismos una caída de tensión notable: ΔV_{Cnn} , a frecuencia n , ya que X_{Cnn} , suele ser de un valor relativamente alto: X_{Cn1}/n , especialmente para las armónicas de baja frecuencia, que normalmente son las que se pretende filtrar. Tal situación provoca una caída de tensión adicional a frecuencia n en los capacitores: la ΔV_{Cnn} , ya mencionada, que se suma a la tensión a que operan los mismos a frecuencia fundamental: V_{Cn1} .

El cálculo de C_n y de L_n , del arreglo de capacitores y del reactor de sintonía, respectivamente, se efectúa por aproximaciones sucesivas, es decir, se efectúan varios cálculos con valores de C_n , diferentes. Para iniciar la primera aproximación, se deben seleccionar los capacitores comerciales (de valores nominales estándar) que formarán el arreglo de la sección de filtrado en turno, tomando en cuenta que dicho arreglo será sometido un gran incremento de voltaje, debido a la conexión en serie con el reactor de sintonía y, adicionalmente, al paso de las corrientes armónicas filtradas. En el caso de la sección que sintoniza a la 2ª armónica, en la práctica se ha comprobado que para iniciar con el cálculo de la primera aproximación, un buen punto de partida es seleccionar capacitores cuyo voltaje nominal sea aproximadamente 1.6 veces mayor que el voltaje de red de fase a neutro. Para las secciones que sintonizan a la 3ª y 4ª armónica, la práctica ha demostrado que para iniciar con el cálculo de la primera aproximación, un buen punto de partida es seleccionar capacitores cuyo voltaje nominal sea 1.2 veces mayor que el voltaje de red de fase a neutro. Para secciones de filtrado sucesivas, se pueden seleccionar capacitores con un voltaje nominal cada vez más cercanos al voltaje de red de fase a neutro, ya que el incremento de voltaje, ocasionado por las causas ya mencionadas, es menor.

En cuanto a la cantidad de capacitores que formarán el arreglo propuesto en la primera aproximación, puede ser desde uno por fase, en cuyo caso es muy probable que se obtuviera como resultado que el capacitor seleccionado quedaría sometido a una sobrecorriente que no podría soportar.

En cálculos posteriores, al incrementar el número de capacitores instalados en paralelo para formar el arreglo, el voltaje total en los mismos: V_{FCn} , disminuye, mientras que la corriente máxima permisible de dicho arreglo: $I_{MAX.Cn}$, aumenta. La aproximación final, es aquella que arroje los resultados siguientes:

- Que el voltaje total en el arreglo capacitivo V_{FCn} , sea menor o de un valor próximo al voltaje máximo permisible de los capacitores: $V_{MAX.Cn}$.
- Que la corriente total que toman los capacitores: I_{Fn} (media cuadrática entre la corriente fundamental, la corriente armónica que debe absorber la sección del filtro y parte proporcional del resto de armónicas que el filtro también absorbe) sea menor o igual que la máxima corriente permisible en dichos capacitores, fundamental más armónica: $I_{MAX.Cn}$, según sus normas de diseño.

Una vez que se han cumplido los puntos anteriores, si se desea que la sección de filtrado aporte una mayor cantidad de potencia reactiva a frecuencia fundamental, el arreglo capacitivo de la sección, puede equiparse con un mayor número de capacitores unitarios. En tal caso se deben calcular nuevamente los parámetros de la sección para el nuevo valor de C_n del arreglo capacitivo.

Para efectuar una aproximación sucesiva previamente se deben conocer los datos siguientes:

- a) Parámetros eléctricos en el punto de conexión del filtro (lado secundario del transformador TA, ver inciso 4.2)
 - Voltaje entre fases V_L
 - Voltaje de fase a neutro V_{FN} ($V_L/\sqrt{3}$)
 - Frecuencia fundamental f (60 Hz)
- b) Características de la armónica de sintonía h
 - Orden n
 - Frecuencia f_n ($f \times n$)
 - Intensidad en amperes I_n
- c) Parámetros eléctricos de cada unidad capacitiva (capacitores propuestos)
 - Potencia reactiva Q_{NCU}
 - Voltaje V_{NCU}
 - Corriente I_{NCU}

4.5.1.- Cálculo de los parámetros eléctricos de una sección de filtrado n

Observación: para fines prácticos, algunas de las ecuaciones que a continuación se presentan han sido acondicionadas con factor exponencial (10^{-3} , 10^{-6} , etc.), con objeto de que éstas proporcionen sus respectivos resultados en unidades de uso común (KV, μ F, mH, etc.).

a) Capacitancia de la sección n del filtro

$$C_n = [(Q_{NCU} \times 10^{-3}) / (2 \times \pi \times f \times kV_{NCU}^2)] \times N_{CU} \quad \mu F]$$

Donde:

- kV_{NCU} Es el voltaje nominal del capacitor comercial unitario usado para formar el arreglo capacitivo de la sección: n, del filtro en kilovolts (kV)
- Q_{NCU} Es la potencia reactiva nominal de cada capacitor comercial unitario usado para formar el arreglo capacitivo de la sección n del filtro.
- N_{CU} Número de capacitores unitarios que forman cada sección de filtrado N

b) Inductancia de la sección n del filtro

$$L_n = 10^{12} / (2 \times \pi \times f_n)^2 \times C_n \quad [\mu H]$$

Donde:

- f_n Es la frecuencia de sintonía de orden n

c) Reactancia capacitiva de la sección n del filtro, a frecuencia fundamental

$$X_{Cn1} = 10^6 / (2 \times \pi \times f \times C_n) \quad [ohms]$$

d) Reactancia inductiva de la sección n del filtro, a frecuencia fundamental

$$X_{Ln1} = (2 \times \pi \times f \times L_n) \times 10^{-6} \quad [ohms]$$

Donde:

- f Es la frecuencia fundamental de 60 Hz/50 Hz

e) Corriente por fase de la sección n del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{Fn1} = V_L \times 10^3 / ((\sqrt{3}) \times Z_{n1}) \quad [A]$$

Donde:

- V_L Es el voltaje de línea del sistema eléctrico del horno (en el punto de conexión del filtro)

- Z_{n1} Es la impedancia de la sección a frecuencia fundamental: $Z_{n1} = X_{Cn1} - X_{Ln1}$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C_n de la sección n, a frecuencia fundamental

$$V_{Cn1} = I_{Fn1} \times X_{C1} \quad KV]$$

g) Voltaje máximo permisible del arreglo capacitivo C_n de la sección n, en permanencia

$$V_{MAX Cn} = V_{NCU} \times 1.10 \quad KV]$$

Donde:

V_{NCU} Es el voltaje nominal de cada capacitor comercial unitario

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C_n de la sección n

$$I_{NCn} = I_{NCU} \times N_{CU} \quad [A]$$

Donde:

I_{NCU} Es la corriente nominal de cada capacitor comercial unitario

N_{CU} Es el número de capacitores comerciales unitarios

Nota: La expresión, presentada en este inciso es para arreglos de capacitores, con una fila de capacitores conectados en paralelo por fase

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C_n de la sección n

$$I_{MAX. Cn} = I_{CN} \times 1.30 \quad [A]$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección n del filtro

$$I_{Fn} = \sqrt{(I_{Fn1}^2 + I_{nn}^2)} \quad [A]$$

Donde:

I_{nn} Es el valor de la corriente armónica de sintonía en amperes

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C_n de la sección n, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{Cnn} = I_h \times (X_{C1} / n) \quad [KV]$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C_n de la sección n, (suma del voltaje a frecuencia fundamental y el voltaje a la armónica de sintonía h)

$$V_{FCn} = V_{Cn1} + \Delta V_{Cnn} \quad [KV]$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección n del filtro a frecuencia fundamental

$$Q_{Nn1} = (\sqrt{3}) \times V_L \times I_{FC1} \quad [KVAR]$$

Los resultados arrojados por una aproximación sucesiva se consideran correctos, si cumplen con las siguientes condiciones:

Para la corriente

$$I_{Fn} > I_{MAX. Cn}$$

Para el voltaje

$$V_{FCn} < V_{MAX. Cn} \quad \text{ó} \quad \text{bien que: } V_{FCn} \approx V_{MAX. Cn}$$

4.6.- Diseño de un filtro de absorción de corrientes armónicas de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F, 60 Hz, con secciones de filtrado de 2ª, 3ª y 4ª armónica, para el horno de arco de 27,000 KVA, 13.8 KV, 3F

Por razones prácticas, de aquí en adelante a las secciones de filtrado se les llamara por el orden de su armónica de sintonía, quedando la nueva denominación de la siguiente manera: sección de segunda armónica, sección de tercera armónica y sección de cuarta armónica. La figura 4.4 muestra un diagrama simplificado de una fase correspondiente a una sección de filtrado.

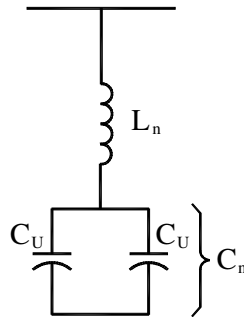


Figura 4.4.- Diagrama simplificado correspondiente a una fase de una sección de filtrado (imagen cortesía de TNV Consulting Co)

El método de aproximaciones sucesivas se ejemplifica calculando los parámetros eléctricos de la sección de segunda armónica. Para esto, se efectúan cuatro aproximaciones, donde la última de ellas arrojará los resultados adecuados. Los parámetros eléctricos de las secciones de tercera y cuarta armónica, se obtienen desarrollando aquella aproximación cuyos resultados resultan ser los adecuados, puesto que como ya se ha mencionado, el método de aproximaciones sucesivas se ejemplificará con el cálculo de los parámetros eléctricos de la sección de segunda armónica.

4.6.1.- Cálculo de los parámetros eléctricos de la sección de 2ª armónica

De los incisos 4.2, 4.3 y 4.6, se han obtenidos los datos eléctricos que es necesario conocer, para poder efectuar el calculo correspondientes a cada aproximación sucesiva.

Datos eléctricos:

- a) Parámetros nominales en el punto de conexión del filtro
 - Voltaje de línea V_L = 13.8 KV
 - Voltaje de fase V_F = 7.98 KV
 - Frecuencia f = 60 Hz
- b) Características de la armónica de sintonía h_n
 - Orden n = 1.84
 - Frecuencia f = 110.4 Hz
 - Intensidad I_n = 124 A
- c) Parámetros nominales de cada capacitor unitario, propuesto
 - Potencia reactiva Q_{NCU} = 360 KVAR
 - Voltaje V_{NCU} = 13.28 KV
 - Corriente I_{NCU} = 27 A

Nota: el número de capacitores, se incrementa con cada aproximación sucesiva (ver inciso 4.5)

4.6.1.1.- Desarrollo de las aproximaciones sucesivas

Al final de cada aproximación se evalúan sus respectivos resultados, con el fin de verificar que cumplan con las condiciones establecidas al final del el inciso 4.6.

Primera aproximación

El cálculo se realiza utilizando cuatro capacitores unitarios por fase

a) Capacitancia de la sección de 2^a armónica del filtro

$$C_2 = \left(\frac{360 \times 10^{-3}}{377 \times 13.28^2} \right) \times 4 = 21.66 \mu\text{F}$$

b) Inductancia de la sección de 2^a armónica del filtro

$$L_2 = \frac{10^9}{(2\pi \times 110.4)^2 \times 21.66} = 95.96 \text{ mH}$$

c) Reactancia capacitiva de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{C21} = \frac{10^6}{(377 \times 21.66)} = 122.47 \text{ Ohms}$$

d) Reactancia inductiva de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{L21} = (377 \times 95.96) \times 10^{-3} = 36.18 \text{ Ohms}$$

e) Corriente por fase de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{F21} = \frac{13.8 \times 10^3}{1.73 \times (122.47 - 36.18)} = 92 \text{ A}$$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro, a frecuencia fundamental

$$V_{C21} = 92 \times 122.47 = 11.32 \text{ KV}$$

g) Voltaje nominal máximo del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$V_{\text{MAX. } C_2} = 1.10 \times 13.28 = 14.61 \text{ KV}$$

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{\text{NC}2} = 27.1 \times 4 = 108.43 \text{ A}$$

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{\text{MAX. } C_2} = 1.30 \times 108 = 141 \text{ A}$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{F2} = \sqrt{(92^2 + 124^2)} = 155 \text{ A} > 141 \text{ A}$$

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{C22} = 124 \times (122.47 / 1.84) = 8.25 \text{ KV}$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C_2 de la sección de 2ª armónica del filtro

$$V_{FC2} = 11.32 + 8.25 = 19.57 \text{ KV} > 14.61 \text{ KV}$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección de 2ª armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$Q_{N21} = 1.73 \times 13.80 \times 92 = 2207 \text{ KVAR}$$

- Evaluación de resultados

- Para la corriente

$$I_{F2} > I_{MAX. C2}, \quad \text{o sea:} \quad 155 \text{ A} > 141 \text{ A}$$

Conclusión: No se cumple con ésta condición ya que los capacitores no tienen la capacidad de absorber la corriente I_{F2} , en su totalidad (ver inciso 4.6).

- Para el voltaje

$$V_{FC2} > V_{MAX. C2}, \quad \text{o sea:} \quad 19.57 \text{ kV} > 14.61 \text{ kV}$$

Conclusión: No se cumple con ésta condición ya que el voltaje en los capacitores, excede significativamente su valor nominal.

De acuerdo a esto, se requiere incrementar la magnitud de $I_{MAX,C2}$ y disminuir la magnitud de V_{FC2} . Lo antes mencionado puede comprobarse, con los resultados arrojados, por la segunda aproximación, al incrementar el número de unidades capacitivas.

Segunda aproximación

El cálculo se realiza, incrementando el número capacitores unitarios a 6 piezas, por fase.

a) Capacitancia de la sección de 2^a armónica del filtro

$$C_2 = \left(\frac{360 \times 10^{-3}}{377 \times 13.28^2} \right) \times 6 = 32.49 \mu\text{F}$$

b) Inductancia de la sección de 2^a armónica del filtro

$$L_2 = \frac{10^9}{(2\pi \times 110.4)^2 \times 32.49} = 63.97 \text{ mH}$$

c) Reactancia capacitiva de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{C21} = \frac{10^6}{(377 \times 32.49)} = 81.65 \text{ Ohms}$$

d) Reactancia inductiva de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{L21} = (377 \times 63.97) \times 10^{-3} = 24.12 \text{ Ohms}$$

e) Corriente por fase de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{F21} = \frac{13.8 \times 10^3}{1.73 \times (81.65 - 24.12)} = 139 \text{ A}$$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro, a frecuencia fundamental

$$V_{C21} = 139 \times 81.65 = 11.32 \text{ KV}$$

g) Voltaje nominal máximo del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$V_{\text{MAX. } C_2} = 1.10 \times 13.28 = 14.61 \text{ KV}$$

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{NC2} = 27.1 \times 6 = 162.65 \text{ A}$$

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{\text{MAX. } C_2} = 1.30 \times 163 = 211 \text{ A}$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{F2} = \sqrt{(139^2 + 124^2)} = 186 \text{ A} < 211 \text{ A}$$

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{C22} = 124 \times (81.65 / 1.84) = 5.50 \text{ KV}$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$V_{FC2} = 11.32 + 5.50 = 16.82 \text{ KV} > 14.61 \text{ KV}$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$Q_{N21} = 1.73 \times 13.80 \times 139 = 3310 \text{ KVAR}$$

- Evaluación de resultados
 - Para la corriente
 $I_{F2} < I_{MAX. C2}$, o sea: **186 A < 211 A**
Conclusión: Se cumple con ésta condición ya que los capacitores ahora tienen la capacidad de absorber la corriente I_{F2} , en su totalidad.
 - Para el voltaje
 $V_{FC2} > V_{MAX. C2}$, o sea: **16.82 kV > 14.61 kV**
Conclusión: No se cumple con ésta condición ya que el voltaje en los capacitores, excede significativamente a su valor nominal.

Como la segunda condición aun no se ha cumplido, resulta necesario incrementar el número de unidades capacitivas con objeto de disminuir el valor de V_{FC2} . Es decir, es necesario efectuar otra aproximación.

Tercera aproximación

El cálculo se realiza incrementando el número de capacitores unitarios a 8 piezas por fase

a) Capacitancia de la sección de 2ª armónica del filtro

$$C_2 = \left(\frac{360 \times 10^{-3}}{377 \times 13.28^2} \right) \times 8 = 43.32 \text{ } \mu\text{F}$$

b) Inductancia de la sección de 2ª armónica del filtro

$$L_2 = \frac{10^9}{(2\pi \times 110.4)^2 \times 43.32} = 47.98 \text{ mH}$$

c) Reactancia capacitiva de la sección de 2ª armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{C21} = \frac{10^6}{(377 \times 43.32)} = 61.24 \text{ Ohms}$$

d) Reactancia inductiva de la sección de 2ª armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{L21} = (377 \times 47.98) \times 10^{-3} = 18.09 \text{ Ohms}$$

e) Corriente por fase de la sección de 2ª armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{F21} = \frac{13.8 \times 10^3}{1.73 \times (61.24 - 18.09)} = 185 \text{ A}$$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2ª armónica del filtro, a frecuencia fundamental

$$V_{C21} = 185 \times 61.24 = 11.32 \text{ KV}$$

g) Voltaje nominal máximo del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2ª armónica del filtro

$$V_{MAX. C2} = 1.10 \times 13.28 = 14.61 \text{ KV}$$

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2ª armónica del filtro

$$I_{NC2} = 27.1 \times 8 = 216.87 \text{ A}$$

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2ª armónica del filtro

$$I_{MAX. C2} = 1.30 \times 217 = 282 \text{ A}$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección de 2ª armónica del filtro

$$I_{F2} = \sqrt{(185^2 + 124^2)} = 223 \text{ A} < 282 \text{ A}$$

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2ª armónica del filtro, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{C22} = 124 \times (61.24 / 1.84) = 4.13 \text{ KV}$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2ª armónica del filtro

$$V_{FC2} = 11.32 + 4.13 = 15.45 \text{ KV} > 14.61 \text{ KV}$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección de 2ª armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$Q_{N21} = 1.73 \times 13.80 \times 185 = 4414 \text{ KVAR}$$

- Evaluación de resultados
 - Para la corriente
 $I_{F2} < I_{MAX.C2}$, o sea: **223 A < 282 A**
Conclusión: Se cumple esta condición y también puede verse que la corriente nominal máxima permisible del el arreglo de capacitores, $I_{MAX.C2}$, tiende a ser de un valor sobredimensionado. Esto es necesario, ya que se requiere disminuir el valor de V_{FC2} .
 - Para el voltaje
 $V_{FC2} > V_{MAX.C2}$, o sea: **15.45 kV > 14.61 kV**
Conclusión: No se cumple la condición ya que el voltaje en los capacitores, continúa excediendo significativamente el valor de su voltaje nominal máximo permisible $V_{MAX.C2}$.

Como la segunda condición aun no se ha cumplido, resulta necesario efectuar otra aproximación más.

Cuarta aproximación (aproximación final)

El cálculo se realiza incrementando el número de capacitores unitarios a 10 piezas, por fase

a) Capacitancia de la sección de 2^a armónica del filtro

$$C_2 = \left(\frac{360 \times 10^{-3}}{377 \times 13.28^2} \right) \times 10 = 54.15 \text{ } \mu\text{F}$$

b) Inductancia de la sección de 2^a armónica del filtro

$$L_2 = \frac{10^9}{(2\pi \times 110.4)^2 \times 54.15} = 38.38 \text{ mH}$$

c) Reactancia capacitiva de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{C21} = \frac{10^6}{(377 \times 54.15)} = 48.99 \text{ Ohms}$$

d) Reactancia inductiva de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{L21} = (377 \times 38.38) \times 10^{-3} = 14.47 \text{ Ohms}$$

e) Corriente por fase de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{F21} = \frac{13.8 \times 10^3}{1.73 \times (48.99 - 14.47)} = 231 \text{ A}$$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro, a frecuencia fundamental

$$V_{C21} = 231 \times 48.99 = 11.32 \text{ KV}$$

g) Voltaje nominal máximo del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$V_{MAX.C2} = 1.10 \times 13.28 = 14.61 \text{ KV}$$

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{NC2} = 27.1 \times 10 = 271.08 \text{ A}$$

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{MAX.C2} = 1.30 \times 271 = 352 \text{ A}$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección de 2^a armónica del filtro

$$I_{F2} = \sqrt{(231^2 + 124^2)} = 262 \text{ A} < 352 \text{ A}$$

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{C22} = 124 \times (48.99 / 1.84) = 3.30 \text{ KV}$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C₂ de la sección de 2^a armónica del filtro

$$V_{FC2} = 11.32 + 3.30 = 14.62 \text{ KV} \approx 14.61 \text{ KV}$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección de 2^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$Q_{N21} = 1.73 \times 13.80 \times 231 = 5517 \text{ KVAR}$$

- Evaluación de resultados
 - Para la corriente
 $I_{F2} < I_{MAX. C2}$, **o sea:** **262 A < 352 A**
Conclusión: Como se ha mencionado en la conclusión de la aproximación anterior, la corriente $I_{MAX.C2}$, resulta ser de un valor sobredimensionado.
 - Para el voltaje
 $V_{FC2} \approx V_{MAX. C2}$, **o sea:** **14.62 kV \approx 14.61 kV**
Conclusión: Se cumple la condición ya que el voltaje en los capacitores es aproximadamente igual a su voltaje nominal de operación.

Nota: En la práctica resulta muy difícil alcanzar éste último valor de V_{FC2} , esto se debe a que la corriente I_h , no fluye en su totalidad hacia el capacitor, sino que una parte de ésta es absorbida por las otras secciones, así como por el transformador de acometida (con una intensidad relativamente pequeña)

Por consiguiente, la presente aproximación resulta ser la que proporciona los resultados adecuados.

4.6.2.- Calculo de los parámetros eléctricos de la sección de 3^a armónica

Para ésta sección, se desarrolla la aproximación sucesiva cuyos resultados cumplen con las condiciones establecidas en el inciso 4.6.

Datos eléctricos:

- a) Características de la armónica de sintonía h
 - Orden n = 2.93
 - Frecuencia f = 175.8 Hz
 - Intensidad I_n = 113 A
- b) Parámetros nominales de cada capacitor unitario
 - Potencia reactiva Q_{NCU} = 350 KVAR
 - Voltaje V_{NCU} = 9.6 KV
 - Corriente I_{NCU} = 36 A
 - Frecuencia f = 60 Hz

* Los parámetros eléctricos en el punto de conexión son los mismos para las tres secciones de filtrado (ver inciso 4.6.1.1).

4.6.2.1.- Desarrollo de la aproximación sucesiva (única)

El cálculo se efectúa utilizando 6 capacitores unitarios, por fase

a) Capacitancia de la sección de 3^a armónica del filtro

$$C_3 = \left(\frac{350 \times 10^{-3}}{377 \times 9.60^2} \right) \times 6 = 60.44 \mu\text{F}$$

b) Inductancia de la sección de 3^a armónica del filtro

$$L_3 = \frac{10^9}{(2\pi \times 175.8)^2 \times 60.44} = 13.56 \text{ mH}$$

c) Reactancia capacitiva de la sección de 3^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{C31} = \frac{10^6}{(377 \times 60.44)} = 43.89 \text{ Ohms}$$

d) Reactancia inductiva de la sección de 3^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{L31} = (377 \times 13.56) \times 10^{-3} = 5.11 \text{ Ohms}$$

e) Corriente por fase de la sección de 3^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{F31} = \frac{13.8 \times 10^3}{1.73 \times (43.89 - 5.11)} = 206 \text{ A}$$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C₃ de la sección de 3^a armónica del filtro, a frecuencia fundamental

$$V_{C31} = 206 \times 43.89 = 9.03 \text{ KV}$$

g) Voltaje nominal máximo del arreglo capacitivo C₃ de la sección de 3^a armónica del filtro

$$V_{\text{MAX. } C3} = 1.10 \times 9.60 = 10.56 \text{ KV}$$

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C₃ de la sección de 3^a armónica del filtro

$$I_{\text{NC}3} = 36 \times 6 = 218.75 \text{ A}$$

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C₃ de la sección de 3^a armónica del filtro

$$I_{\text{MAX. } C3} = 1.30 \times 219 = 284 \text{ A}$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección de 3^a armónica del filtro

$$I_{F3} = \sqrt{(206^2 + 113^2)} = 235 \text{ A} < 284 \text{ A}$$

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C₃ de la sección de 3^a armónica del filtro, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{C33} = 113 \times (43.89 / 2.93) = 1.69 \text{ KV}$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C₃ de la sección de 3^a armónica del filtro

$$V_{\text{FC}3} = 9.03 + 1.69 = 10.72 \text{ KV} \approx 10.56 \text{ KV}$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección de 3^a armónica a frecuencia fundamental

$$Q_{\text{N}31} = 1.73 \times 13.80 \times 206 = 4912 \text{ KVAR}$$

- Evaluación de resultados
 - Para la corriente
 $I_{F3} < I_{MAX. C3}$, o sea: **235 A < 284 A**
Conclusión: Se cumple la condición, es decir, los capacitores tienen la capacidad para absorber la corriente I_{F2} en su totalidad.
 - Para el voltaje
 $V_{FC3} \approx V_{MAX. C3}$, o sea: **10.72 kV \approx 10.56 kV**
Conclusión: **Se cumple la condición ya que el voltaje en los capacitores es aproximadamente igual a su voltaje nominal de operación.**

Por consiguiente, la presente aproximación resulta ser la que proporciona los resultados adecuados.

4.6.3.- Calculo de los parámetros eléctricos de la sección de 4^a armónica

Así como en la sección anterior, en la presente sección se desarrolla la aproximación sucesiva cuyos resultados cumplen con las condiciones establecidas en el inciso 4.6

- a) Características de la armónica de sintonía h
- Orden n = 3.93
 - Frecuencia f = 235.8 Hz
 - Intensidad I_n = 102 A
- b) Parámetros nominales de cada capacitor unitario
- Potencia reactiva Q_{NCU} = 300 KVAR
 - Voltaje V_{NCU} = 9.6 KV
 - Corriente I_{NCU} = 31 A
 - Frecuencia f = 60 Hz

* Los parámetros eléctricos en el punto de conexión son los mismos para las tres secciones de filtrado (ver inciso 4.6.1.1).

4.6.3.1.- Desarrollo de la aproximación sucesiva (única)

El cálculo se efectúa utilizando 6 unidades capacitivas por fase

a) Capacitancia de la sección de 4^a armónica del filtro

$$C_4 = \left(\frac{300 \times 10^{-3}}{377 \times 9.60^2} \right) \times 6 = 51.81 \quad \mu\text{F}$$

b) Inductancia de la sección de 4^a armónica del filtro

$$L_4 = \frac{10^9}{(2\pi \times 235.8)^2 \times 51.81} = 8.79 \quad \text{mH}$$

c) Reactancia capacitiva de la sección de 4^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{C41} = \frac{10^6}{(377 \times 51.81)} = 51.20 \quad \text{Ohms}$$

d) Reactancia inductiva de la sección de 4^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$X_{L41} = (377 \times 8.79) \times 10^{-3} = 3.32 \quad \text{Ohms}$$

e) Corriente por fase de la sección de 4^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$I_{F41} = \frac{13.8 \times 10^3}{1.73 \times (51.20 - 3.32)} = 167 \quad \text{A}$$

f) Voltaje en el arreglo capacitivo C₄ de la sección de 4^a armónica del filtro, a frecuencia fundamental

$$V_{C41} = 167 \times 51.20 = 8.53 \quad \text{KV}$$

g) Voltaje nominal máximo del arreglo capacitivo C₄ de la sección de 3^a armónica del filtro

$$V_{\text{MAX. } C4} = 1.10 \times 9.60 = 10.56 \quad \text{KV}$$

h) Corriente nominal del arreglo capacitivo C₄ de la sección de 4^a armónica del filtro

$$I_{\text{NC4}} = 31.3 \times 6 = 188 \quad \text{A}$$

i) Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo C₄ de la sección de 3^a armónica del filtro

$$I_{\text{MAX. } C4} = 1.30 \times 188 = 244 \quad \text{A}$$

j) Corriente por fase total (en valor eficaz) de la sección de 4^a armónica del filtro

$$I_{F4} = \sqrt{(167^2 + 102^2)} = 195 \quad \text{A} < 244 \quad \text{A}$$

k) Voltaje en el arreglo capacitivo C₄ de la sección de 4^a armónica del filtro, a frecuencia de sintonía h

$$\Delta V_{C44} = 102 \times (51.20 / 3.93) = 1.33 \quad \text{KV}$$

l) Voltaje total en el arreglo capacitivo C₄ de la sección de 4^a armónica del filtro

$$V_{\text{FC4}} = 8.53 + 1.33 = 9.86 \quad \text{KV} < 10.56 \quad \text{KV}$$

m) Potencia reactiva nominal de la sección de 4^a armónica del filtro a frecuencia fundamental

$$Q_{N41} = 1.73 \times 13.80 \times 167 = 3977 \quad \text{KVAR}$$

- Evaluación de resultados
 - Para la corriente
 $I_{F4} < I_{MAX. C4}$, o sea: **195 A < 244 A**
Conclusión: Se cumple la condición, es decir, los capacitores tienen la capacidad para absorber la corriente I_{F2} en su totalidad.
 - Para el voltaje
 $V_{FC4} < V_{MAX. C4}$, o sea: **9.86 kV < 10.56 kV**
Conclusión: Se cumple la condición ya que el voltaje en los capacitores es menor a su voltaje nominal de operación. Puede verse que a medida que una sección sintoniza a una armónica de mayor orden, el incremento de voltaje es menor.

4.6.4.- Potencia reactiva y corriente, a frecuencia fundamental del filtro (valores nominales)

La potencia reactiva, resulta de sumar la potencia reactiva a frecuencia fundamental de cada sección de filtrado, por consiguiente:

$$Q_{NFIL1} = Q_{C21} + Q_{C31} + Q_{C41}$$

Por lo tanto:

$$Q_{NFIL1} = 5,517 + 4,912 + 3,977 = 14,406 \text{ KVAR}$$

Puede verse que se obtiene una potencia reactiva aproximadamente igual al valor de Q_C calculado en el inciso 4.3, del presente capítulo.

La Corriente nominal a frecuencia fundamental del filtro se obtiene mediante la siguiente expresión

$$I_{NFIL1} = Q_{NFIL1} / (\sqrt{3} \times V_L)$$

Por lo tanto:

$$I_{NFIL1} = 14,406 / (1.73 \times 13.8) = 603 \text{ A}$$

4.7.5.- Resumen de los parámetros eléctricos nominales del filtro

La tabla 4.2, proporciona un resumen de los resultados arrojados por las aproximaciones sucesivas efectuadas con anterioridad.

Tabla 4.2.- Resumen de los principales resultados arrojados por las aproximaciones sucesivas

PARAMETROS ELECTRICOS	SECCIONES DE FILTRADO		
	DE 2ª ARMONICA	DE 3ª ARMONICA	DE 4ª ARMONICA
Potencia reactiva a frecuencia Fundamental: Q_{Nn1} (kVAR)	5,517	4,912	3,977
Corriente por fase a frecuencia fundamental: I_{Fn1} (A)	231	206	167
Corriente total por fase en valor eficaz: I_{Fn} (A)	262	235	195
Corriente nominal máxima del arreglo capacitivo: I_{MAXCn} (A)	352	284	244
	FILTRO		
Potencia reactiva del filtro (kVAR)	14,406		
Corriente total del filtro (A)	603		

4.7- Especificación de los componentes del filtro de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F, 60Hz

En el presente inciso se proporcionan las características técnicas más importantes de los componentes del filtro, como son: capacitores, reactores núcleo de aire, fusibles de potencia tipo expulsión, equipo de protección general y equipos de conexión y desconexión.

4.7.1.- Capacitores

En seguida se da un listado de las principales las características eléctricas que se deben tener en cuenta para la selección de un capacitor de potencia:

- a) Nivel de tensión
- b) Potencia reactiva
- c) Frecuencia
- d) Nivel básico de impulso
- e) Tipo de servicio
- f) Número de fases

La figura 4.5, muestra un dimensional, con las vistas frontal, lateral y superior del tipo de capacitores unitarios a utilizar en las secciones de filtrado. Esto sirve para diseñar la estructura soporte, donde serán montadas dichos capacitores.

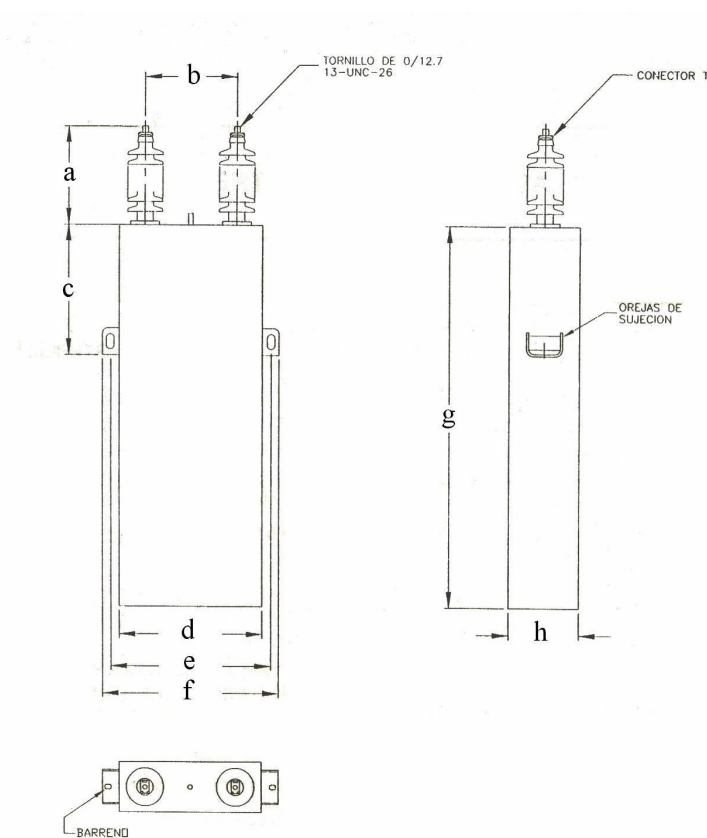


Figura 4.5.- Dimensionales de un capacitor de potencia (imagen tomada de la hoja de datos de un capacitor de la marca Areva). Nota: las letras a, b, c, etc., representan dimensiones de del capacitor, especificadas en la hoja de datos del mismo

La tabla 4.4, muestra las características eléctricas de los capacitores de potencia a utilizar en las respectivas secciones de filtrado.

Tabla 4.4.- Características eléctricas de los capacitores de potencia

PARAMETROS ELECTRICOS	SECCIONES DE FILTRADO		
	DE 2 ^a ARMONICA	DE 3 ^a ARMONICA	DE 4 ^a ARMONICA
NIVEL DE TENSION (KV)	13.28	9.6	9.6
POTENCIA REACTIVA (KVAR)	360	300	350
FRECUENCIA (Hz)	60	60	60
NIVEL BASICO DE IMPULSO BIL (KV)	125	125	125
TIPO DE SERVICIO	INTEMPERIE	INTEMPERIE	INTEMPERIE
NUMERO DE FASES	1	1	1
NUMERO DE PIEZAS	30	18	18

4.7.2.- Reactores

A continuación se listan las principales características eléctricas que se deben tener en cuenta para la selección de los reactores núcleo de aire:

- a) Tensión máxima
- b) Inductancia
- c) Reactancia
- d) Corriente continúa
- e) Numero de fases
- f) Frecuencia
- g) Nivel básico de aislamiento
- h) Tipo de aislamiento

La figura 4.6, muestra dimensionales simplificados de un reactor núcleo de aire. Las dimensiones para los reactores de cada sección, varían según el orden de la armónica de sintonía de la sección.

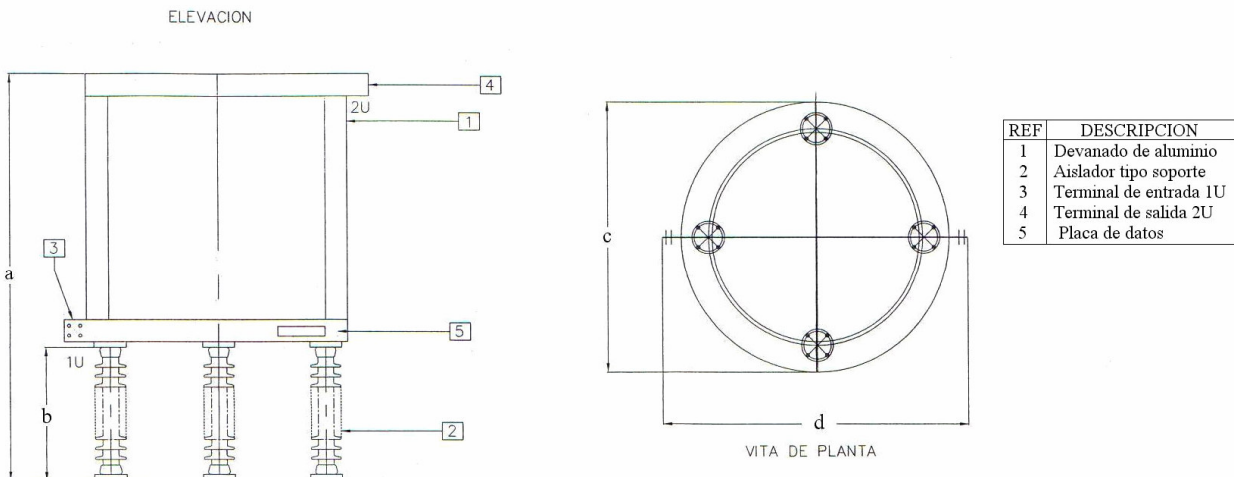


Figura 4.6.-Vista lateral y vista superior de un reactor núcleo de aire (imagen cortesía de TNV Consulting Co.). Nota: Las literales a, b, . . . , representan la medidas del reactor, especificadas en su hoja de datos

De acuerdo con los resultados obtenidos en el inciso 4.7, los reactores a emplear, para cada sección deben tener las características eléctricas que se especifican en la tabla 4.5.

Tabla 4.5.- Características eléctricas de los reactores núcleo de aire

REACTORES NUCLEO DE AIRE			
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	SECCIONES DE FILTRADO		
	SECCION DE 2ª ARMONICA	SECCION DE 3ª ARMONICA	SECCION DE 4ª ARMONICA
TENSION MAXIMA (KV)	13.8	13.8	13.8
INDUCTANCIA (mH)	38.336	13.560	8.793
REACTANCIA (Ohms)	14.453	5.112	3.315
CORRIENTE CONTINUA (A)	270	237	196
NUMERO DE FASES	1	1	1
FRECUENCIA (Hz)	60	60	60
NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO (KV)	50/125	50/125	50/125
TIPO DE AISLAMIENTO	F	F	F

4.7.3.- Fusibles de potencia tipo expulsión para protección individual

En el anexo A, se explican detalladamente los criterios de selección de los fusibles tipo expulsión para filtros de absorción de corrientes armónicas. En el mismo anexo A, se enumeran los pasos a seguir para la selección de dichos fusibles.

En la figura 4.7, se muestra un capacitor protegido mediante un fusible tipo expulsión, el cual consiste de tres componentes esenciales: el tubo fusible, el eslabón fusible y el resorte ejecutor.

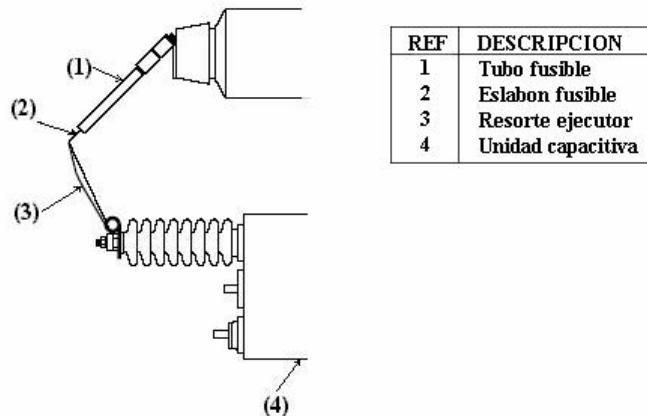


Figura 4.7.- Conexión del fusible tipo expulsión con la unidad capacitiva (imagen tomada de la pagina de internet: www.cooperpower.com)

Para ilustrar la aplicación del fusible tipo expulsión en un caso práctico, en la figura 4.8, se muestran dos unidades capacitivas, protegidas mediante este tipo de fusibles.

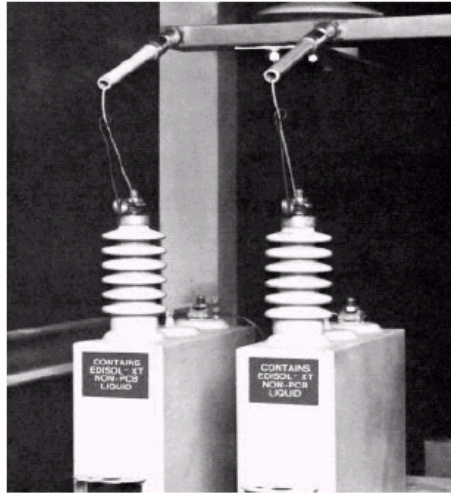


Figura 4.8.- Caso real, que muestra dos unidades capacitivas protegidas mediante fusibles tipo expulsión (imagen tomada de la página de internet: www.cooper.com).

En seguida, se efectúa el cálculo de los fusibles a emplear en cada una de las secciones de filtrado, del filtro que estamos diseñando.

Para la sección de segunda armónica

Datos:

I_{NCU}	27	A
I_{F21}	231	A
C_2	54.15	μF
V_{NCU}	13.28	KV

Nota: Ver tablas 4.2 y 4.4

a) Corriente nominal del fusible

$$I_{NFUS} = (27 \times 2) / 1.5 = 36 \text{ A}$$

Por lo tanto, el fusible elegido es el 40K

b) Corriente de fallo simétrica: I_{CCSIM}

Para una sección alamburada en conexión estrella con neutro flotante, el valor máximo de la corriente de fallo, es de aproximadamente tres veces la corriente por fase de la sección a frecuencia fundamental: I_{F21} . Por lo tanto:

$$I_{CCSIM} \approx 3 \times 231 = 693 \text{ A}$$

Nota: en la tabla A.1, del anexo A, puede verse que para un voltaje de 16.6 kV, los fusibles tipo expulsión tienen un I_{CCSIM} de 5000 A.

c) Energía almacenada en los capacitores conectados en paralelo por fase

$$J = 1 / 2 \times (54.15 \times 10^{-6}) \times ((13.28 \times 10^3) \times (\sqrt{2}) \times 1.1)^2 = 11.6 \text{ KJ}$$

Para la sección de tercera armónica

Datos:

I_{NCU}	36	A
I_{F31}	206	A
C_3	60.44	μF
V_{NCU}	9.6	KV

Nota: Ver tablas 4.2 y 4.7

a) Corriente nominal del fusible

$$I_{FUS} = (36 \times 2) / 1.5 = 48 \text{ A}$$

Por lo tanto, el fusible elegido es el 50K

b) Corriente de fallo simétrica

$$I_{CCSIM} = 3 \times 206 = 618 \text{ A}$$

Nota: ver inciso b) de la sección de 2ª armónica

c) Energía almacenada

$$J = 1 / 2 \times (60.44 \times 10^{-6}) \times ((9.6 \times 10^3) \times (\sqrt{2}) \times 1.1)^2 = 6.7 \text{ KJ}$$

Para la sección de cuarta armónica

Datos:

I_{NCU}	31	A
I_{F31}	167	A
C_3	51.81	μF
V_{NCU}	9.6	KV

a) Corriente nominal del fusible

$$I_{FUS} = (31 \times 2) / 1.5 = 41.33 \text{ A}$$

Por lo tanto, el fusible elegido es el 40K

b) Corriente de fallo simétrica

$$I_{CCSIM} = 3 \times 167 = 501 \text{ A}$$

c) Energía almacenada

$$J = 1 / 2 \times (51.81 \times 10^{-6}) \times ((9.6 \times 10^3) \times (\sqrt{2}) \times 1.1)^2 = 5.8 \text{ KJ}$$

En la tabla 4.6, se proporcionan las características eléctricas de los fusibles comerciales, a emplear en las respectivas secciones de filtrado. Algunas de dichas características se han tomado de la tabla A.1 del anexo A

Tabla 4.6.- Fusibles empleados en cada sección de filtrado

PARAMETROS ELECTRICOS DE LOS FUSIBLES	SECCIONES DE FILTRADO		
	DE 2 ^a ARMONICA	DE 3 ^a ARMONICA	DE 4 ^a ARMONICA
CLASIFICACIÓN DEL LISTON FUSIBLE	40 K	50	40
VOLTAJE NOMINAL COMERCIAL DEL FUSIBLE (kV)	16.6	16.6	16.6
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO SIMETRICA: I_{CCSIM} . (60 Hz, Amperes RMS)	3600	3600	3600
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO ASIMETRICA: I_{CCASIM} . (60 Hz, Amperes RMS)	5000	5000	5000

4.7.4.- Equipo de protección por desbalanceo del neutro

En el inciso 3.1.2 (letra f) del capítulo tres, se describe de manera general el principio de operación del equipo de protección por desbalanceo del neutro. En el anexo B, se deducen las expresiones para determinar el sobrevoltaje y la corriente en el neutro de una sección de filtrado, como consecuencia del fallo de capacitores unitarios. Así también en el mismo anexo B, se enumera el proceso para determinar las características eléctricas de los principales componentes del equipo de protección por desbalanceo del neutro. La figura 4.9, muestra la conexión del equipo de protección por desbalanceo del neutro a una sección de filtrado.

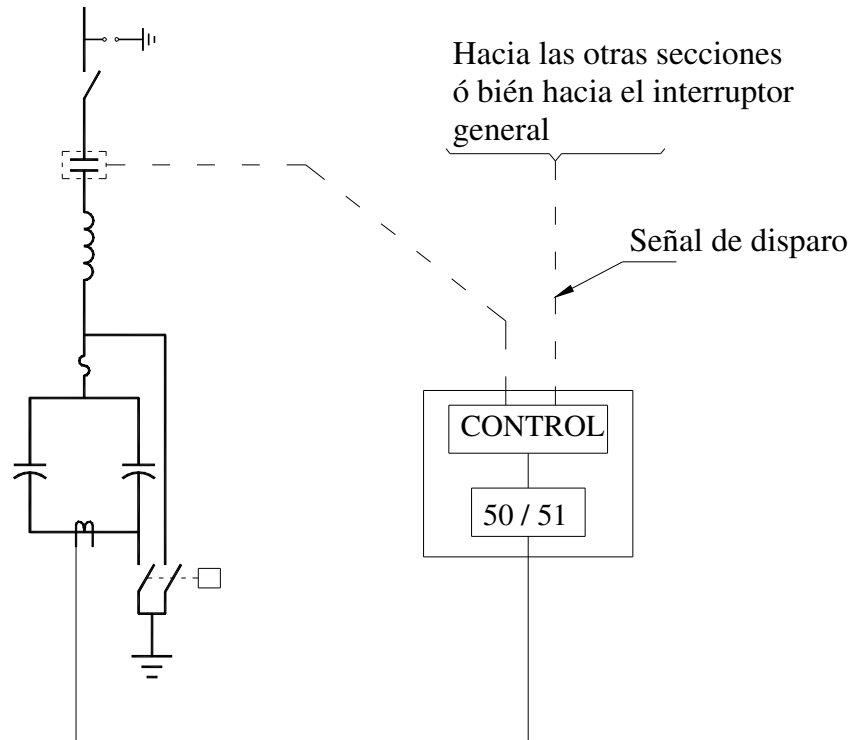


Figura 4.9.- Conexión del equipo de protección por desbalanceo del neutro en una sección de filtrado

A continuación se determinan las características eléctricas de los equipos de protección por desbalanceo del neutro para cada sección de filtrado.

Para la sección de segunda armónica

Datos:

$$I_{F21} = 231 \text{ A } (I_N = I_{Fn1}, \text{ ver anexo B})$$

a) Sobrevoltaje: S, en función de la cantidad de capacitores fallados

Por medio de la siguiente expresión, se elabora la tabla 4.7, que muestra el sobrevoltaje, en función del número de capacitores fallados.

$$S = \frac{N}{3M - N}$$

Tabla 4.7.- Sobrevoltaje S, en función del número de capacitores fallados.

M (Piezas)	N (Piezas)	S (en tanto por 1)
10	1	0.03
	2	0.07
	3	0.11

De acuerdo a los valores que muestra la tabla, el relevador debe enviar la señal de disparo inmediatamente después de fallar un tercer capacitor, puesto que se habrá excedido la corriente correspondiente a un sobrevoltaje de 0.10

b) Corriente I_o provocada por un sobrevoltaje crítico: $S = 0.10$

$$|I_o| = \frac{3}{2} S \cdot |I_N|$$

$$I_o = 3/2 \times 0.10 \times 231 = 35$$

c) Corriente de disparo del relevador de desbalance del neutro: 60N, corregida según la relación del T.C.

$$I_{DIS.60N} = I_o / R_{TRANSF}$$

Donde:

R_{TRANS} Relación de transformación del T.C

$$R_{TRANSF} = I_o / 5$$

La relación de transformación más próxima es de 12 (50/5), por consiguiente:

$$I_{DIS.60N} = 35 / 10 = 3.5 \text{ A}$$

Para la sección de tercera armónica

Datos:

$$I_{F31} = 206 \text{ A (dato obtenido del inciso 4.7.5 del capítulo IV)}$$

a) Sobrevoltaje: S, en función de la cantidad de capacitores fallados

Tabla 4.8.- Sobrevoltaje S, en función del número de capacitores fallados

M (Piezas)	N (Piezas)	S (en tanto por 1)
6	1	0.06
	2	0.13

De acuerdo a los valores que muestra la tabla, el relevador debe enviar la señal de disparo inmediatamente después de fallar un segundo capacitor, ya que se habrá excedido la corriente correspondiente a un sobrevoltaje de 0.10.

b) Corriente I_0 provocada por un sobrevoltaje critico $S = 0.10$

$$I_0 = 3/2 \times (0.10) \times 206 = 31 \text{ A}$$

c) Corriente de disparo del relevador de desbalance del neutro: 60N, corregida según la relación del T.C.

$$I_{DIS.60N} = I_0 / R_{TRANSF}$$

La relación de transformación más próxima es de 10 (50/5), por consiguiente:

$$I_{DIS.60N} = 31 / 10 = 3.1 \text{ A}$$

Para la sección de cuarta armónica

Datos:

$$I_{F41} = 167 \text{ A}$$

a) Sobrevoltaje: S, en función de la cantidad de capacitores fallados

La tabla B.5 muestra lo valores de sobretensión en los capacitores en función del número de capacitores fallados.

Tabla 4.9.- Sobrevoltaje S en los capacitores en función del número de capacitores fallados

M (Piezas)	N (Piezas)	S (en tanto por 1)
6	1	0.06
	2	0.13

De acuerdo a los valores que muestra la tabla, el relevador debe enviar la señal de disparo inmediatamente después de falla un segundo capacitor, ya que se habrá excedido la corriente correspondiente a un sobrevoltaje de 0.10.

b) Corriente I_0 provocada por un sobrevoltaje critico: $S = 0.10$

$$I_0 = 3/2 \times (0.10) \times 167 = 25 \text{ A}$$

c) Corriente de disparo del relevador de desbalance del neutro: 60N, corregida según la relación del T.C.

$$I_{DIS.60N} = I_o / R_{TRANSF}$$

La relación de transformación más próxima es de 8 (40/5), por consiguiente:

$$I_{DIS.60N} = 25 / 8 = 3.1 \text{ A}$$

La tabla 4.10, resumen las características que deben reunir las secciones de filtrado, y que se determinaron en los cálculos antes efectuados

Tabla 4.10.- Características eléctricas de los equipos de protección por desbalance del neutro, a utilizar en su respectiva sección de filtrado

PARAMETROS ELECTRICOS	SECCIONES DE FILTRADO		
	SECCION DE 2 ^a ARMONICA	SECCION DE 3 ^a ARMONICA	SECCION DE 4 ^a ARMONICA
RELACION DE TRASNFORMACION DEL TC (Amperes/ Amperes)	50/5	50/5	40/5
CORRIENTE DE DISPARO DEL RELEVADOR (Amperes)	3.5	3.1	3.1

4.7.5.- Equipo de protección general

Como se ha mencionado en el inciso 3.2.2 del capítulo tres, éste equipo proporciona protección por sobrecorriente y cortocircuito. El diagrama unifilar, que se muestra en la figura 4.10, ilustra la conexión del equipo de protección general y sus principales componentes

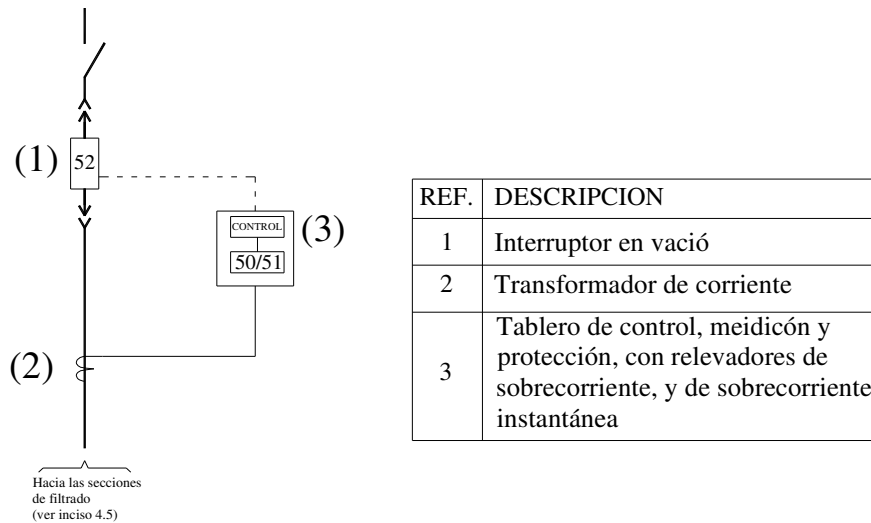


Figura 4.10.- Conexión del equipo protección general, por sobrecorriente y cortocircuito

A continuación se determinan los parámetros eléctricos nominales del equipo de protección general

Datos:

$$I_{NFIL} = 603 \text{ (Dato obtenido del inciso 4.6.4)}$$

Donde:

I_{NFIL} Es la corriente nominal a frecuencia fundamental del filtro

Procedimiento:

a) Corriente nominal del interruptor

$$I_{NINT} = I_{NFIL} \times 1.6$$

$$I_{NINT} = 603 \times 1.6 = 965 \text{ A}$$

* El factor 1.6, es el margen por el flujo de corrientes armónicas

b) Corriente de disparo del relevador de sobrecorriente: 50

$$I_{D50} = I_{NINT} / R_{TRANS}$$

R_{TRANS} Es la relación del transformación de transformador de corriente, definida por el cociente que se obtiene de dividir la corriente en el lado primario: I_p , entre la corriente en el lado secundario I_s ($I_s = 5A$). Es decir: $R_{TRANS} = I_p / I_s$

El transformador de corriente, cuyo valor nominal en su lado primario, es más próximo a 965, es uno de 1000 A, por consiguiente la relación de transformación es de 200 (1000/5).
Por lo tanto

$$I_{D.REL} = 965/200 = 4.8 \text{ A}$$

c) Curva característica del relevador 50

Se elige un curva extremadamente inversa, cuyo tiempo de disparo es menor de medio ciclo.

4.7.6.- Cuchilla de aislamiento de operación sin carga

Como se menciona en el inciso 3.2.2 del capítulo tres, se trata de cuchillas de operación sin carga. Se instala una de estas cuchillas por cada sección de filtrado, mientras que el filtro en su conjunto también es equipado con otra de dichas cuchillas (ver figuras 3.10 y 3.11 del capítulo tres). Para su selección, es necesario tomar en cuenta sus siguientes características eléctricas:

- a) Corriente nominal
- b) Voltaje nominal
- c) Nivel básico de impulso (BIL)

La figura 4.11, muestra la vista lateral de una cuchilla de operación sin carga, típica. La figura 4.12, muestra un caso real de la aplicación de la cuchilla antes mencionada

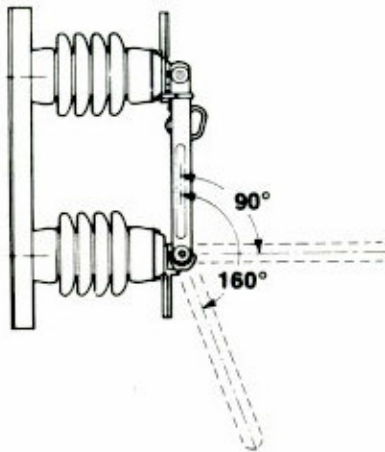


Figura 4.11.- Vista lateral de una cuchilla de operación sin carga (imagen tomada de la hoja de datos de una cuchilla de la marca S&C)

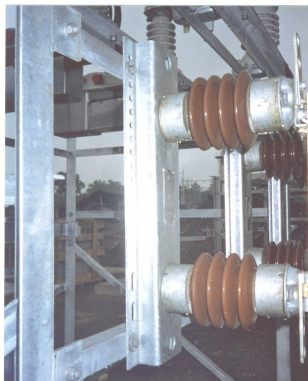


Figura 4.12.- Cuchilla de operación sin carga, caso real (imagen tomada en campo por el autor de la tesis)

4.7.7.- Equipo de conexión y desconexión con carga (en vacío)

Como se menciona en el inciso 3.1.2 y 3.2.2 del capítulo tres, se trata de contactores en vacío. Para su selección, es necesario tomar en cuenta sus siguientes características eléctricas:

- a) Corriente nominal
- b) Corriente momentánea
- c) Capacidad de interrupción
- d) Voltaje nominal
- e) Nivel básico de impulso (BIL)
- f) Voltaje de control

La figura 4.13 muestra las vistas lateral y frontal de un contactor en vacío típico, tipo intemperie.

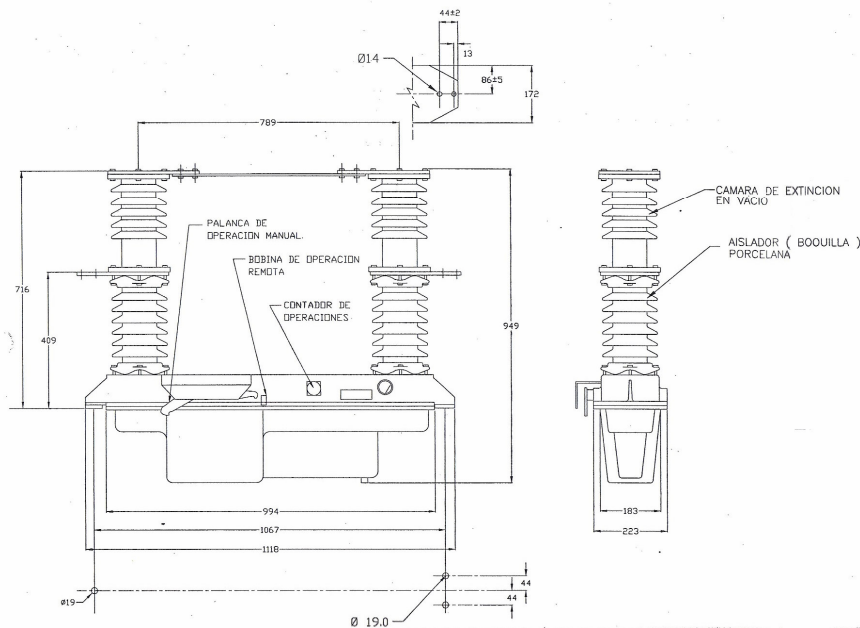


Figura 4.13.- contactor en vacío tipo intemperie (imagen tomada de la hoja de datos de un contactor de la marca Joslyn Hi -Voltaje Corporation)

4.8.-Diagramas y planos eléctricos del filtro de 14,404 kVAR, 13.8 kV, 3F, 60 Hz

En la práctica, para la construcción en campo y puesta en servicio de un filtro de absorción de corrientes armónicas, es necesario elaborar una serie de planos que tienen por objeto reunir la información técnica de todos los componentes del filtro. En seguida proporciona un listado de los planos y diagramas, más usuales elaborados en la practica.

- a) Diagrama unifilar de fuerza
- b) Diagrama de protecciones
- c) Diagrama de control
- d) Plano de alambrado
- e) Plano de arreglo físico (“layout”)
- f) Planos de gabinetes
- g) Planos de instalación eléctrica
- h) Planos estructurales
- i) Plano de cimentaciones

Desde el punto de vista eléctrico, el diagrama unifilar de fuerza, el diagrama de protecciones y el diagrama de control, reúnen la información, esencial, más importante, que en nuestro caso interesa conocer.

4.8.1.- Diagrama unifilar general

En el diagrama unifilar de la figura 4.14, se muestra en forma simplificada el filtro de absorción de corrientes armónicas de 14,404 kVAR, 13.8 kV, 3F, 60Hz; conectado al sistema eléctrico del horno de arco de 27,000 kVA, 13.8 kV, 3F, 60 Hz.

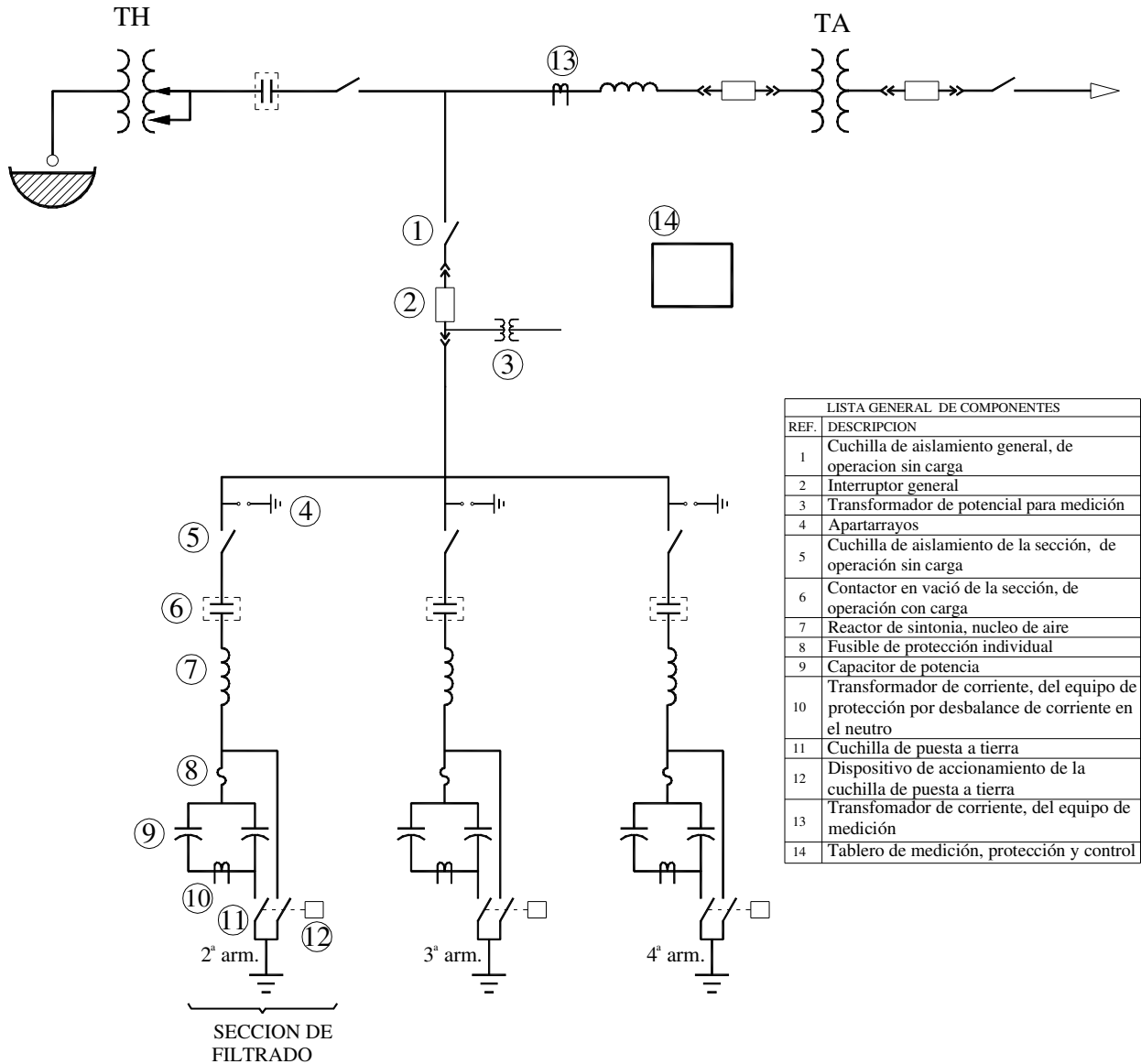
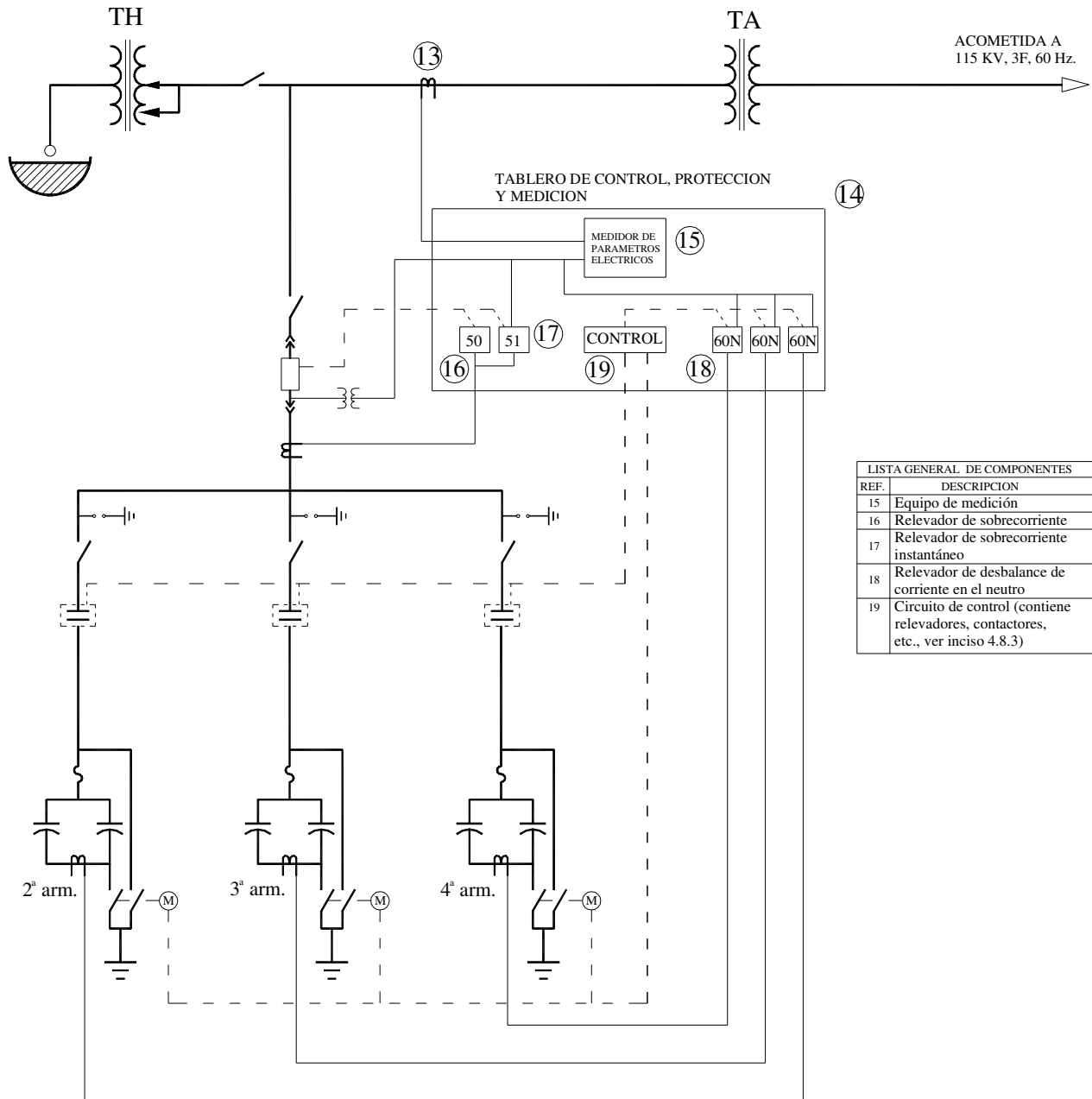


Figura 4.14, Diagrama unifilar general, que muestra el sistema eléctrico del horno junto con el filtro de absorción de corrientes armónicas (imagen cortesía de TNV Consulting Co.)

4.8.2.- Diagrama de protecciones

El diagrama de la figura 4.15, muestra a los principales de equipos de protección indicando su interacción con el sistema de control y algunos de los equipos de potencia, del filtro.



LISTA GENERAL DE COMPONENTES	
REF.	DESCRIPCION
15	Equipo de medición
16	Relevador de sobrecorriente
17	Relevador de sobrecorriente instantáneo
18	Relevador de desbalance de corriente en el neutro
19	Circuito de control (contiene relevadores, contactores, etc., ver inciso 4.8.3)

SIMBOLOGIA

- - - Señal eléctrica de control
- Señal eléctrica de alimentación / medición

Figura 4.15.- Configuración general simplificada de los de los equipos de protección y de los equipos de control (diagrama cortesía de TNV Consulting Co.).

4.8.3.- Diagramas de control

El sistema de control del filtro, se divide en dos subsistemas: uno alimentado con corriente alterna a 120 V y el otro alimentado con corriente directa a 125 V, este último subsistema alimenta a componentes cuya operación resulta crítica, desde el punto de vista de protección eléctrica.

La lógica que define la operación del subsistema de corriente alterna, se expresa mediante un diagrama de control tipo escalera, al que denominamos diagrama de control de corriente alterna. La lógica que define la operación del subsistema de corriente directa, se expresa mediante otro diagrama de control tipo escalera, al que denominamos diagrama de control de corriente directa.

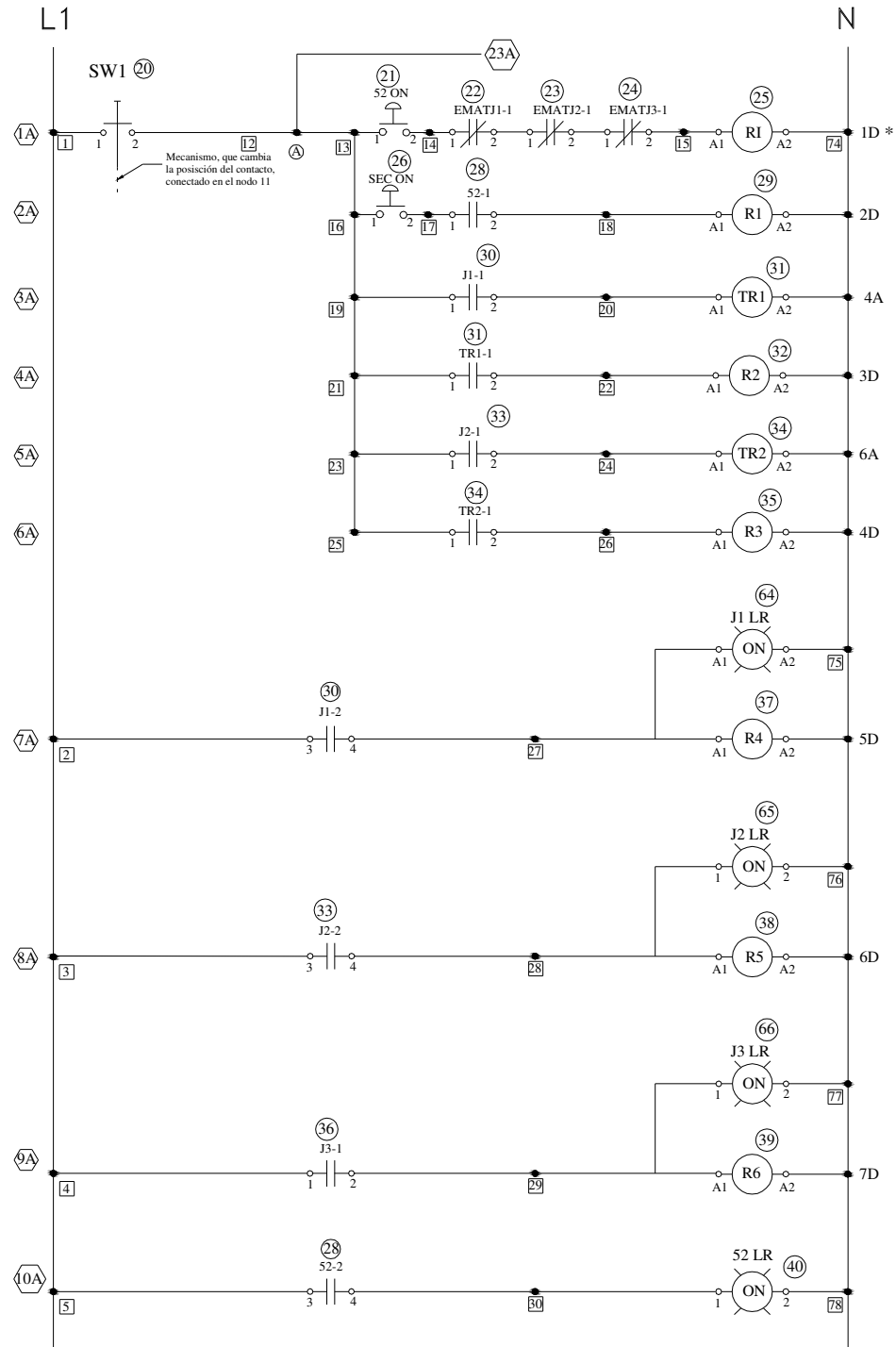
La lógica de operación de cada subsistema, permite que ambos subsistemas se relacionen entre sí, para efectuar maniobras de energización y desenergización del filtro, en condiciones normales de operación del filtro como en condiciones de falla del mismo.

En general, la lógica que define la operación del sistema de control del filtro, se divide en tres partes: la primera define la secuencia de energización del filtro (figura 4.15 y figura 4.15a), la segunda define la secuencia de desenergización del filtro (figura 4.16 y 4.16a) y la tercera define la secuencia de desenergización del filtro en condiciones de falla (figura 4.17). En seguida se da una interpretación generalizada de cada una de las secuencias antes mencionadas.

a) Secuencia de energización

- Cierre del interruptor general:52
 - Colocar en posición ON el interruptor SW1 y oprimir el botón INT ON, para esto los contactos auxiliares EMJ1-1, EMJ2-1 y EMJ3-1 se deberán encontrar en posición cerrada indicando que las chuchillas de puesta a tierra de las tres secciones se encuentran abiertas, esto sirve como permisivo para poder cerrar el interruptor general del filtro. Lo anterior permite energizar el relevador R11, mismo que de inmediato cierra su contacto R11-1, alimentando con corriente directa a la bobina de cierre (close coil: C.C, por sus siglas en ingles) del interruptor 52, quedando inmediatamente cerrado. Ver nodos 1A y 1D.
- Energización de las secciones de filtrado
 - Presionar el botón SEC ON, para entonces el contacto auxiliar 52-1 correspondiente a 52, se encuentra en posición cerrada, esto permite energizar el relevador R1, mismo que de inmediato cierra su contacto R1-1 para energizar con corriente directa a la bobina de cierre (close coil: C.C) del contactor en vacío J1: CCJ1, quedando inmediatamente cerrado. De esta manera se energiza la sección de segunda armónica. Ver nodos 2A y 2D
 - En seguida, se inicia automáticamente la energización de la sección de tercera armónica al energizarse el relevador de tiempo TR1, mismo que cierto tiempo después permite energizar al relevador R2, por a través de su contacto TR1-1. A su vez el relevador R2 a través de su contacto R2-1 permite energizar con corriente directa a la bobina de cierre del contactor en vacío J2: CCJ2, quedando inmediatamente. De esta manera se energiza la sección de tercera armónica. Ver nodos 4A, 5A y 4D
 - La energización de la última sección de filtrado, ósea la sección de cuarta armónica, se efectúa siguiendo la misma lógica que se ha mencionado en el punto anterior. Ver nodos 6A y 6D.

Por otra parte, al mismo tiempo en que cada sección de filtrado es energizada, su respectiva cuchilla de puesta a tierra es bloqueada eléctricamente para su accionamiento. Esto se hace al interrumpir la alimentación de corriente directa hacia el dispositivo de accionamiento (EMJ1, EMJ2 ó EMJ3) de la misma.



*

Notas:

- Los numeros localizados a la derecha del diagrama con terminación A o D, indican numeros de escalon en el diagrama de control de c.a. y en el diagrama de control de c.d, respectivamente.

Figura 4.15.- Diagrama de control de corriente alterna de la secuencia de energización (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

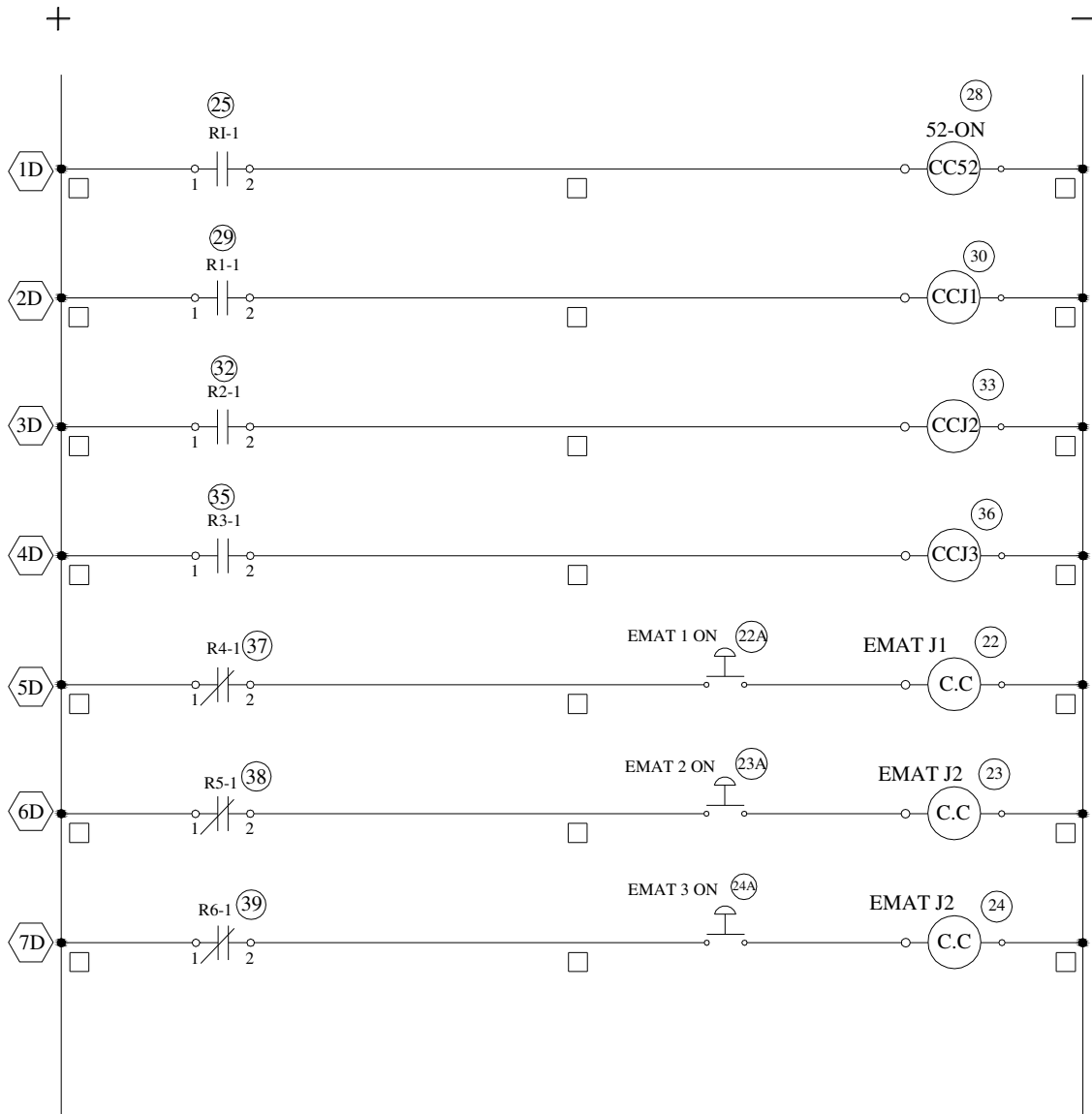


Figura 4.15a.- Diagrama de control de corriente directa de la secuencia de energización (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

b) Secuencia de desenergización

- La secuencia inicia por la sección de cuarta armónica, para esto se debe poner en posición OFF la perilla del interruptor SW1. Posteriormente presionar el botón SECC OFF para energizar al relevador R7, con objeto de que a través de su contacto R7-1 se alimente con corriente directa a la bobina de disparo (trip coil: T.C, por sus siglas en ingles) del contactor en vacío J3: T.C.J3. De esta manera sale de operación la sección de 4^a armónica. Ver nodo 12 del diagrama de control de corriente alterna y nodo 12' del diagrama de control de corriente directa.
- En seguida, se inicia automáticamente la desenergización de la sección de tercera armónica, al energizarse el relevador de tiempo TR3, que cierto tiempo después permite energizar al elevador R8; mismo que a través de su contacto R8-1 permite alimentar con corriente directa a la bobina de disparo del contactor en vacío J2: T.C.J2. De esta manera sale de operación la sección de tercera armónica. El procedimiento para desenergizar la sección de segunda armónica, consiste en la misma lógica que se acaba de mencionar.
- Una vez que ha salido de operación la sección de segunda armónica, se energiza el relevador de tiempo TR5, que cierto tiempo después permite energizar al relevador R10 mismo que a través de su contacto R10-1 permite alimentar con corriente directa a la bobina de disparo del interruptor 52: T.C.52. De esta manera concluye la desenergización del filtro, en condiciones normales de operación

Por otra parte, el filtro puede ser desenergizado en su totalidad, en modo de emergencia presionando el botón de disparo general: E-stop. Al presionar dicho botón, se desenergiza al relevador R11, que cierra sus contactos R11-1, R11-2, R11-3 y R11-4, sacando de operación al mismo tiempo a las secciones de filtrado como al filtro en general abriendo el interruptor 52.

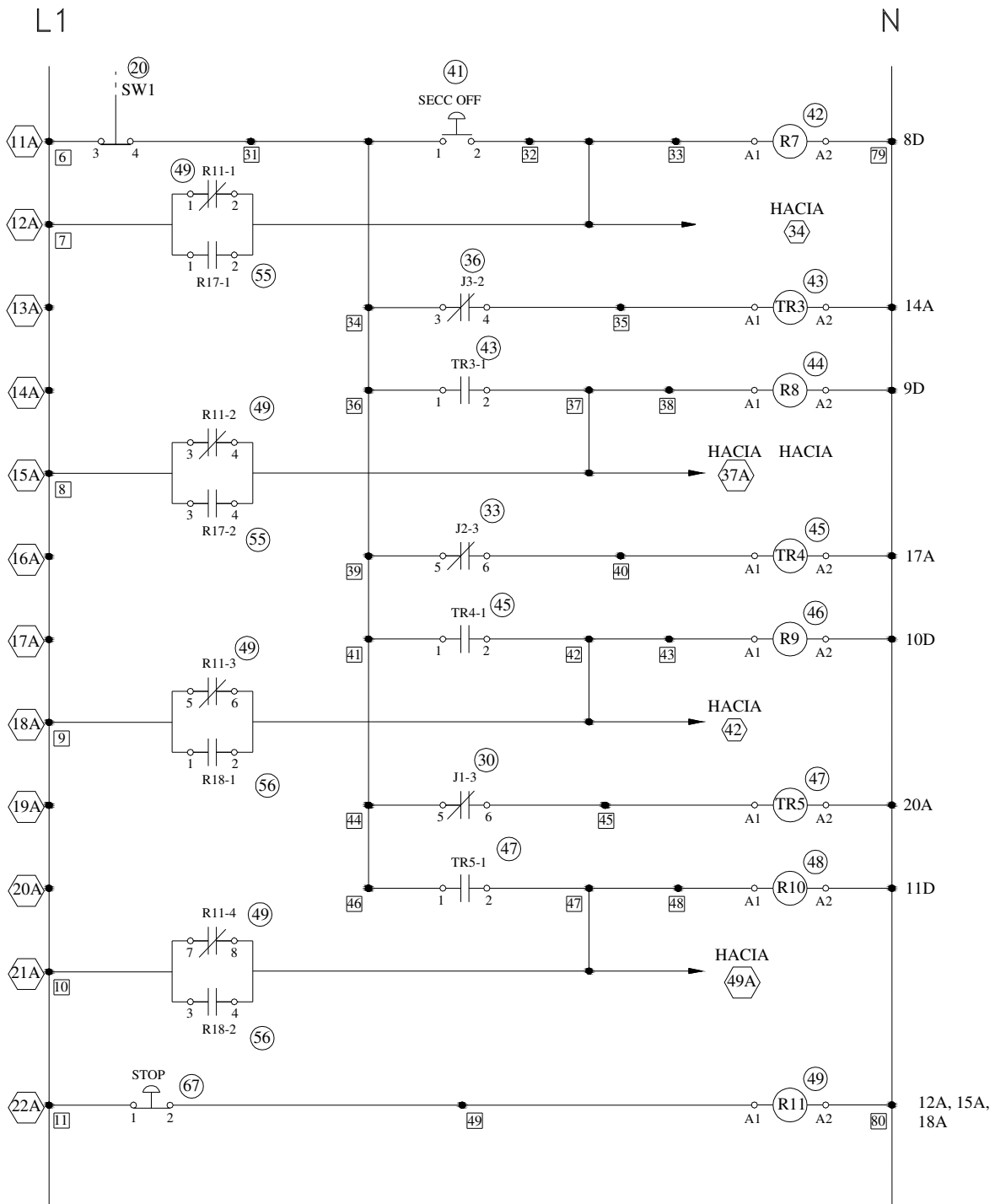


Figura 4.16.- Diagrama de control de corriente alterna de la secuencia de desenergización (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

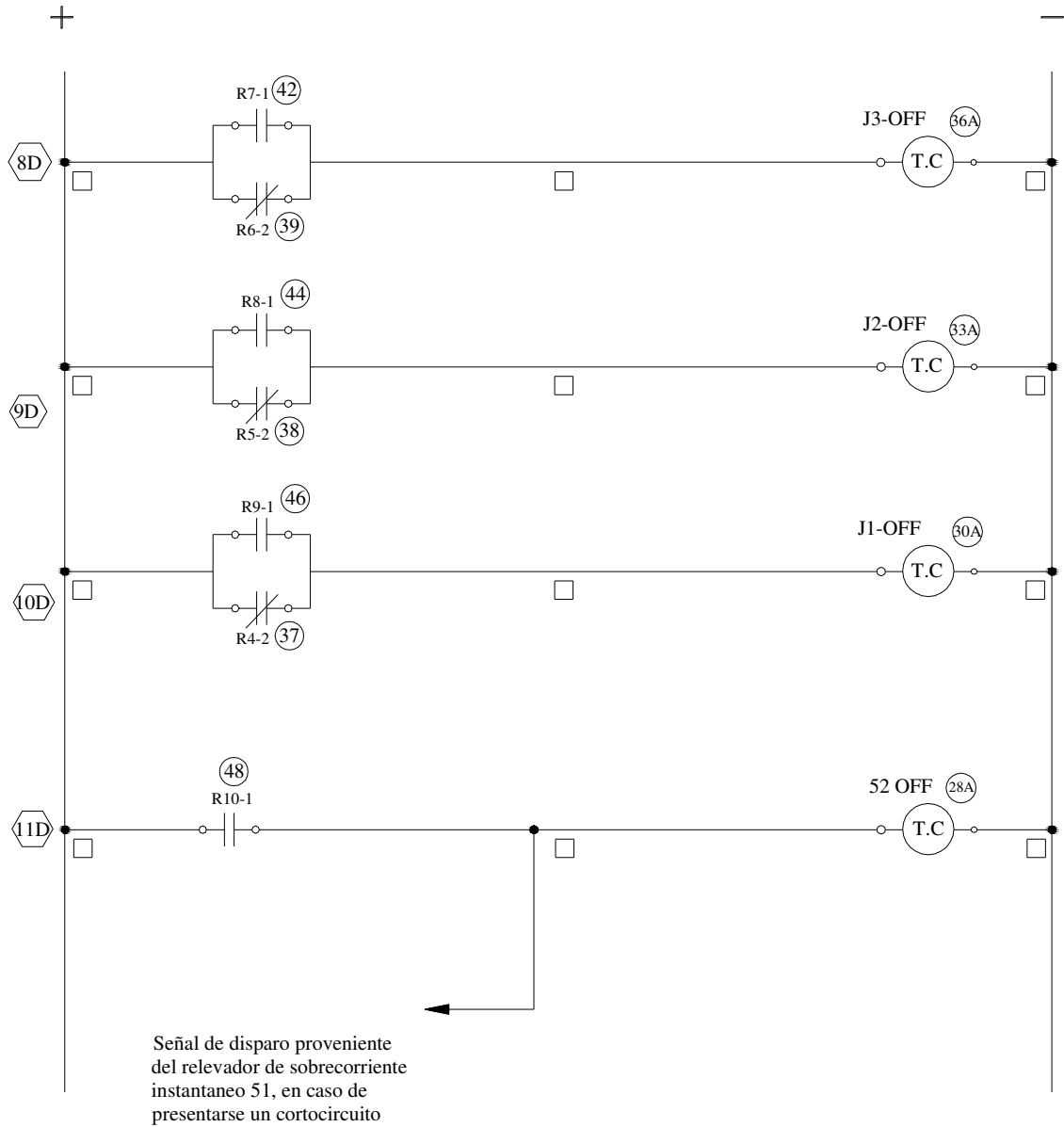


Figura 4.16a.- Diagrama de control de corriente directa de la secuencia de desenergización (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

a) Secuencia de falla

- Falla detectada por el relevador de sobrecorriente: 50, general

En este caso el filtro debe salir de operación en su totalidad, para esto previamente se desenergizan las secciones de filtrado de manera descendente a su orden de armónica de sintonía. Posteriormente el filtro es desenergizado en su totalidad al abrirse el interruptor general: 52. En seguida se da una explicación textual en forma generalizada, de la secuencia de falla.

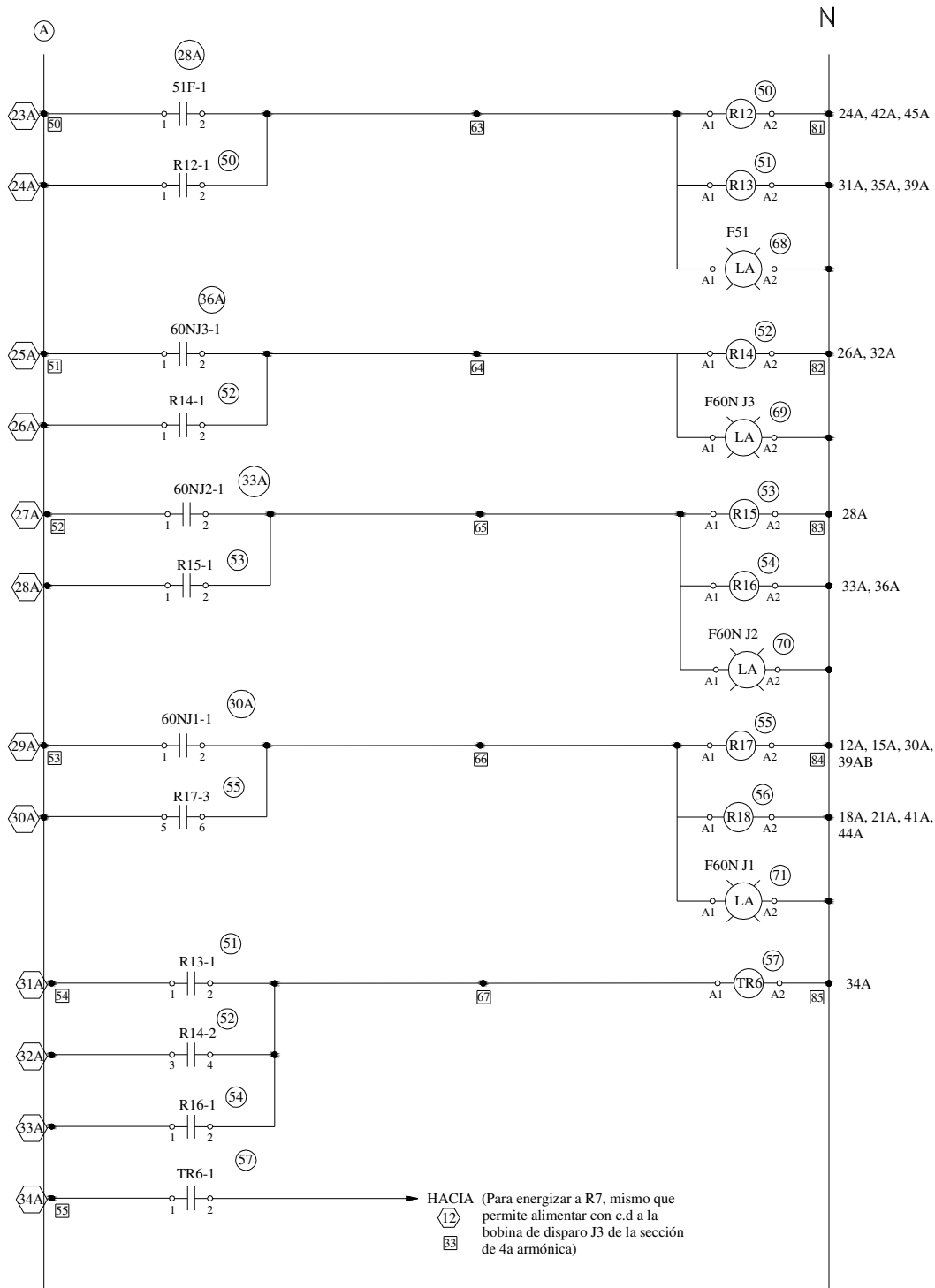
- Cuando se presenta una falla por sobrecorriente ésta es detectada por el relevador 50, que en respuesta cierra su contacto 50-1, para energizar a los relevadores R12 y R13. El relevador R13 a través de su contacto R13-3 energiza al relevador de tiempo TR6, mismo que cierto tiempo después permite energizar al relevador R7. A su vez el relevador R7 a través de su contacto R7-1 alimenta con corriente directa a la bobina de disparo del interruptor en vacío J3: T.C.J3, provocando la apertura del mismo J3. De esta manera se desenergiza la sección de cuarta armónica.
- Así también al mismo tiempo el relevador R13 a través de su contacto R13-2 energiza al relevador de tiempo TR7, el cual cierto tiempo después (mayor al de TR6) permite energizar al relevador R8, mismo que a través de su contacto R8-1 alimenta con corriente directa a la bobina de disparo del contactor en vacío J2: T.C.J2, provocando la apertura del mismo J2. De esta manera se desenergiza la sección de tercera armónica.
- Así también al mismo tiempo dicho relevador R13 por medio del contacto R13-3 energiza al relevador de tiempo TR8, el cual cierto tiempo después (mayor al de TR7) permite energizar al relevador R19. Este último relevador R19 a través de su contacto R19-1 en conjunto con el relevador R12 a través de su contacto R12-2, permiten energizar al relevador R9, mismo que a su vez alimenta con corriente directa a la bobina de disparo del contactor en vacío J1: T.C.J1, que inmediatamente provoca la apertura del mismo J3, sacando así de operación a la sección de segunda armónica.
- Una vez que han salido de operación las tres secciones de filtrado, los contactos auxiliares J3-3, J2-3 y J1-3 de los tres contactores vacío, se encuentran en posición cerrada, que en conjunto con el contacto R12-3, del relevador R12, permiten energizar al relevador R21. A su vez el relevador R21 permite energizar al relevador R10, mismo que a través de su contacto R10-1 alimenta con corriente directa a la bobina de disparo del interruptor general 52. De esta manera concluye la desenergización total del filtro.

- Falla detectada por los equipos de protección por desbalance del neutro de cada sección de filtrado.

- Para la sección de cuarta armónica
Al presentarse un desbalance de corriente en el neutro, ésta es detectada por el relevador 60NJ3 que en consecuencia cierra su contacto 60NE-1, para energizar al relevador R14. Éste último relevador a su vez, energiza al relevador TR6, el cual cierto tiempo después permite energizar al relevador R7, que como se ha mencionado anteriormente para las fallas detectadas por los elevadores 50 y 51, la energización de dicho relevador R7, trae como consecuencia la desenergización de la sección de cuarta armónica. En este caso, las dos secciones restantes podrán seguir operando, si la falla únicamente se presenta dicha sección de cuarta armónica.

- Para la sección de tercera armónica
En este caso, el relevador 60NJ2 al detectar una desbalance de corriente en el neutro cierra su contacto 60NJ3-1 para energizar a los relevadores R15 y R16. Donde el relevador R16 energiza al relevador de tiempo TR6, para desenergizar a la sección a la sección de cuarta armónica. Así también dicho relevador R16 a través energiza al relevador de tiempo TR7, mismo que a través de su contacto TR7-1 permite energizar al relevador R8, que al igual que en el caso anterior de fallas detectadas por los relevadores 50 y 51, esto trae como consecuencia la desenergización de la propia sección de tercera armónica.. Por su parte el relevador R15 energiza al relevador de tiempo TR8, que cierto tiempo después permite energizar al relevador R19, que al cerrar su contacto R19-1, prepara el circuito para que en caso de fallar la sección de segunda armónica, esta sea disparada instantáneamente, lo cual trae como consecuencia la desenergización total del filtro.

- Para la sección de segunda armónica
En este caso el relevador 60NJ2 cierra su contacto 60NJ2-1 para energizar a los relevadores R17 y R18. Los relevadores R17 y R18, por medio de sus contactos R17-2, R17-3, R18-1 y R18-2, respectivamente, permiten energizar a los relevadores R7, R8, R9 y R10 para sacar de operación a las tres secciones de filtrado junto al mismo tiempo, junto con la apertura del interruptor general, desenergizando así de esta manera al filtro en su totalidad.



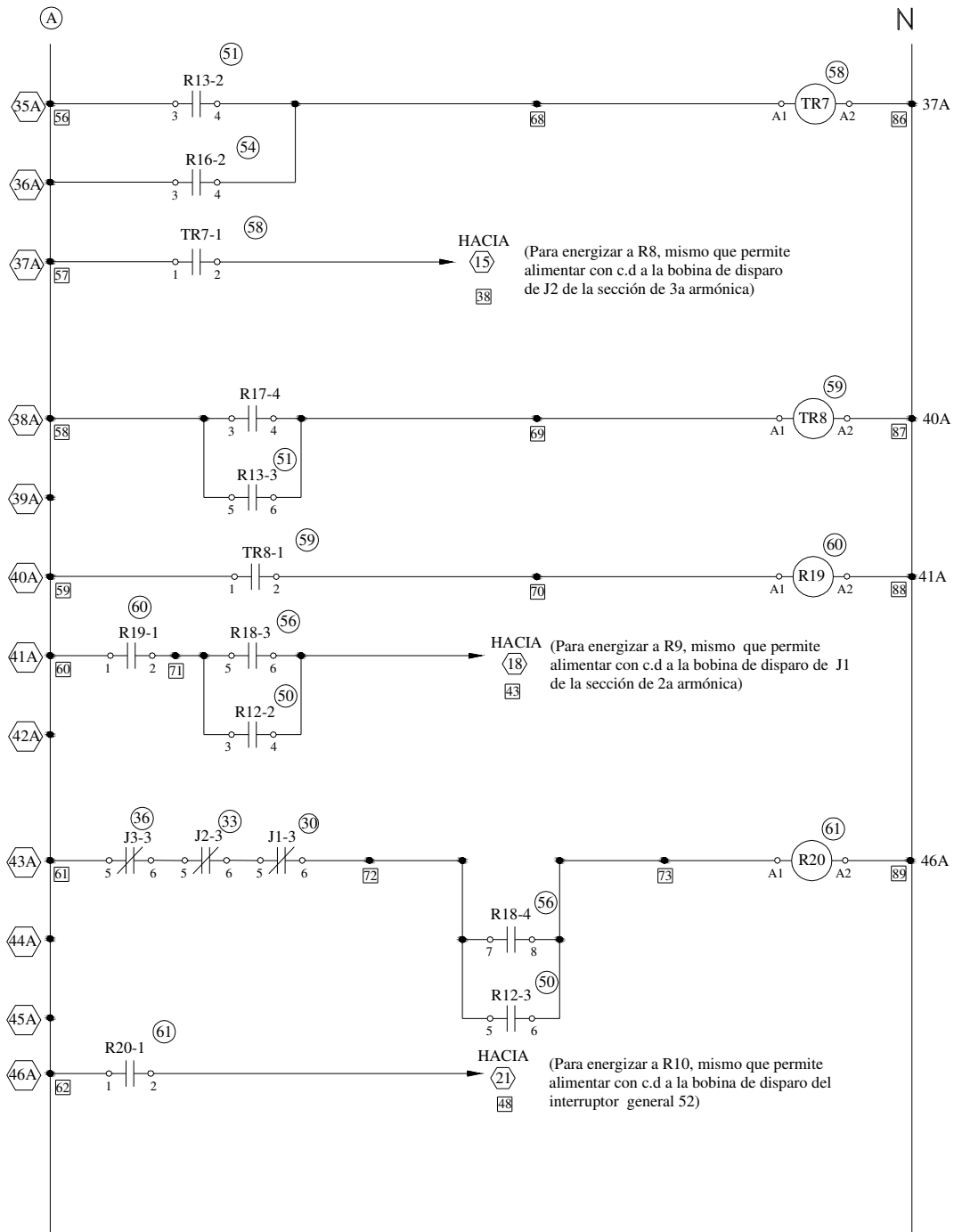


Figura 4.17.- Diagrama de control de corriente alterna de la secuencia de falla (diagrama cortesía de TNV Consulting Co)

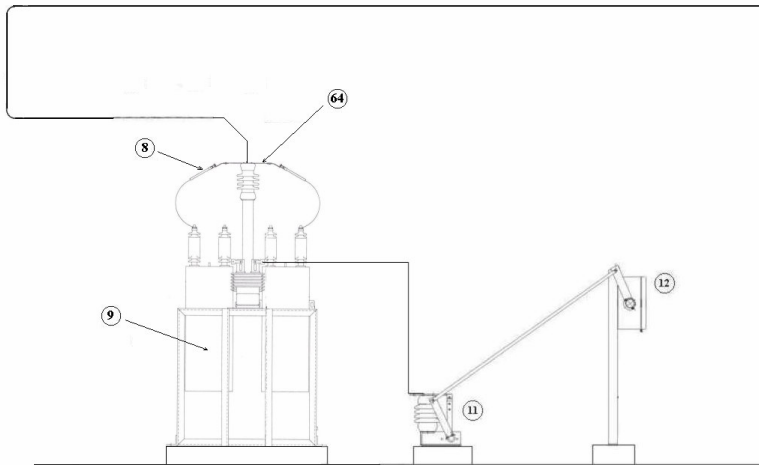
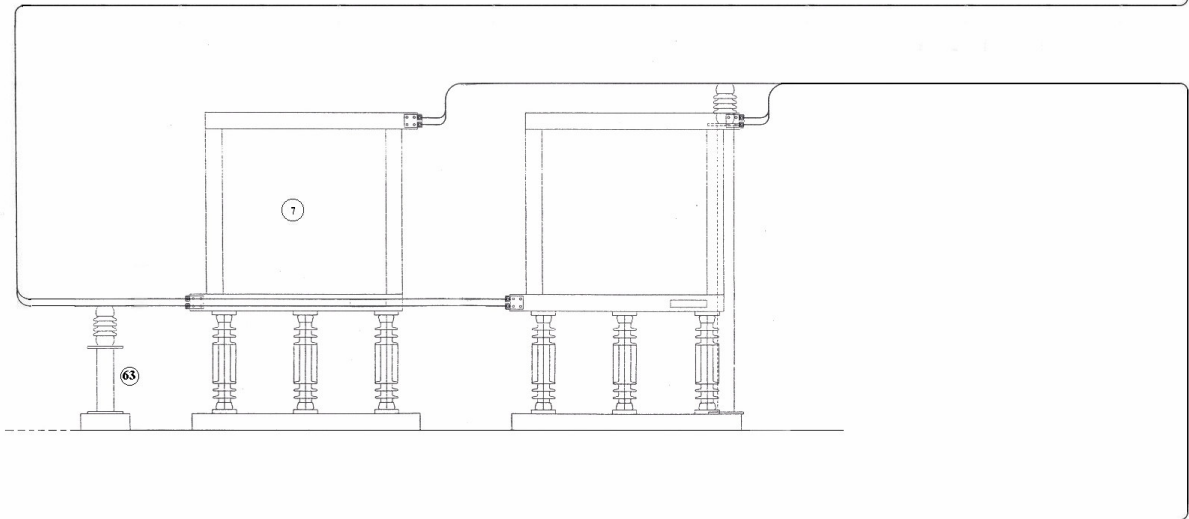
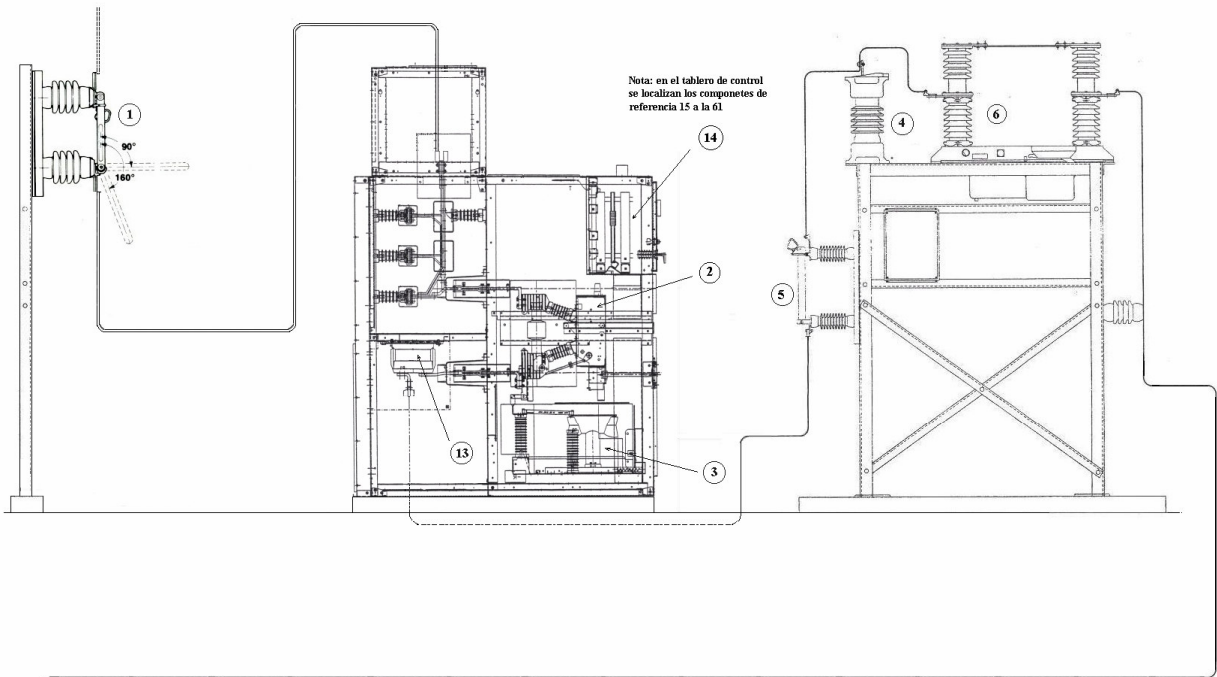
4.9.- Lista de los principales materiales del filtro de 14,404 KVAR, 13.8 KV, 3F, 60Hz

Los equipos y materiales que conforman a un filtro de absorción de corrientes armónicas, se dividen en dos grupos:

- a) Equipos y materiales eléctricos.- Son básicamente los equipos eléctricos de fuerza, los de protección y los de control, mostrados en los diagramas: unifilar, de protección y de control, respectivamente.
- b) Equipos y materiales mecánicos.- Incluye los materiales empleados en la construcción de la cimentaciones, las estructuras soporte, los gabinetes, arenas y minerales para acondicionamiento del terreno, etc.

Con la clasificación antes presentada se ha laborado la tabla 4.10, en la que se presenta un lista de los principales equipos y materiales de un filtro de absorción de corrientes armónicas

LISTA GENERAL DE EQUIPOS Y MATERIALES DEL FILTRO		
MATERIALES ELÉCTRICOS	FUERZA	1 Cuchilla de aislamiento general, de operacion sin carga
		2 Interruptor general
		3 Transformador de potencial para medición
		4 Apartarrayos
		5 Cuchilla de aislamiento de la sección, de operación sin carga
		6 Contactor en vacío de la sección, de operación con carga
		7 Reactor de sintonia, nucleo de aire
		8 Fusible de protección individual
		9 Capacitor de potencia
		10 Transformador de corriente, del equipo de protección por desbalance de corriente en el neutro
		11 Cuchilla de puesta a tierra
		12 Dispositivo de accionamiento de la cuchilla de puesta a tierra: DACPT
		13 Transformador de corriente, del equipo de medición
		14 Tablero de medición, protección y control
MATERIALES MECANICOS	PROTECCION Y CONTROL	15 Equipo de medición
		16 Relevador de sobrecorriente
		17 Relevador de sobrecorriente instantáneo
		18 Relevador de desbalance de corriente en el neutro
		19-61 Componentes del circuito de control (ver inciso 4.8.3): - Contactores: R11, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21 - Relevadores de tiempo: TR1, TR2, TR3, TR4, TR5, TR6, TR7, TR8 - Bobinas de disparo, de los contactores en vacío, del interruptor gneral y de los dispositivos de accionameinto de las cuchillas de puesta a tierra
		62 Estructuras soporte de acero galvanizado para capacitores y desconectadores
	63 Aisladores de porcelana	
	64 Bus de soleras de aluminio y herrajes de conexión	
	65 Cimentaciones	



CAPITULO V

5.- COMPROBACION DE RESULTADOS, A TRAVES DE MEDICIONES DE CAMPO TOMADAS EN UN CASO REAL

Introducción

En el capítulo anterior se describe el método para diseñar filtros de absorción de corrientes armónicas para hornos de arco eléctrico. Se ha utilizado un caso real, como ejemplo de aplicación. Es decir, que el horno de arco eléctrico, así como el filtro de absorción mostrado como ejemplo de diseño, son equipos que actualmente se encuentran en operación, desempeñando satisfactoriamente sus respectivas funciones.

Al tratarse de equipos reales, fue posible efectuar mediciones eléctricas para diferentes casos de operación del horno, como son: horno operando sin equipo de compensación, horno operando con un banco de capacitores y horno operando con el filtro de absorción de corrientes armónicas (mismo cuyo diseño se muestra en el capítulo IV).

Las mediciones correspondientes a la operación del horno sin equipo de compensación, fueron efectuadas como parte de una serie de pruebas realizadas al sistema eléctrico del horno. Una de éstas pruebas consistió en operar el horno de arco sin equipo de compensación, con objeto de conocer el comportamiento del horno operando solo, así como también el comportamiento de su sistema eléctrico.

Las mediciones correspondientes a la operación del horno con un banco de capacitores, se efectuaron tomando la precaución de no elevar demasiado el factor de potencia, con la finalidad de, por una parte, mantener controlada la resonancia armónica entre el banco de capacitores y el transformador de acometida, provocada por la emisión de corrientes armónicas del horno y, por otra parte, estudiar el comportamiento del horno operando con capacitores solos, aunque en una forma controlada. La prueba la efectuó el autor de la presente tesis, conectando únicamente el arreglo de capacitores correspondiente a la sección de segunda armónica del filtro, pero sin incluir los reactores de sintonía, cuando el filtro se encontraba en fase de instalación y pruebas de campo.

Finalmente, las mediciones correspondientes a la operación del horno de arco eléctrico con el filtro de absorción completo, fueron efectuadas una vez que, tanto el horno como el filtro, iniciaron sus operaciones de manera definitiva.

5.1.- Contenido de las mediciones eléctricas, que se analizarán, en cada caso de operación del horno

Las mediciones eléctricas que se presentan a continuación, corresponden a los diferentes casos de operación del horno mencionados anteriormente y, en cada caso, estas mediciones se tomaron durante un mismo ciclo de fundición. Se mostrará el efecto del filtro de corrientes armónicas objeto de esta tesis sobre los principales parámetros eléctricos del horno, incluyendo los espectros de corrientes armónicas, a través de mediciones que fueron tomadas en un punto de medición localizado entre el punto de conexión del filtro al alimentador del horno y el transformador de acometida.

Vamos a presentar los efectos del filtro sobre los parámetros eléctricos siguientes:

- a) Factor de potencia
- b) Corriente rms
- c) Voltaje rms
- d) Distorsión armónica total, en voltaje: TDH (V) y en corriente: TDH (I)
- e) Espectros de frecuencias armónicas presentes en la onda de tensión y en la de corriente.

5.2.- Mediciones eléctricas efectuadas durante la operación del horno sin equipo de compensación

a) Factor de potencia

En la figura 5.1, se muestra el factor de potencia en función del tiempo, durante un ciclo de operación del horno. Se observan cuatro etapas bien definidas, donde las tres primeras etapas corresponden al proceso de fundición, mientras que en la cuarta etapa corresponde al proceso de afino. Los ciclos de mediciones presentados en la figura, corresponden a períodos de tiempo en los que el horno se encuentra operando y las interrupciones en la medición muestran los períodos de tiempo en los que se están efectuando operaciones de recarga.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición, el factor de potencia promedio es aproximadamente 0.70, con grandes fluctuaciones instantáneas en todo el proceso (ver inciso 2.1.1 del capítulo II). Las fluctuaciones instantáneas presentan valores que se encuentran entre 0.07 y 0.99.
- Durante el proceso de afino, el factor de potencia promedio se mantiene aproximadamente igual, mientras que la cantidad de fluctuaciones instantáneas disminuye notablemente.
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de material, no se muestran valores del factor de potencia, debido a que se pierde la señal de corriente en el analizador con el que se efectúan las mediciones, al desenergizarse el horno.

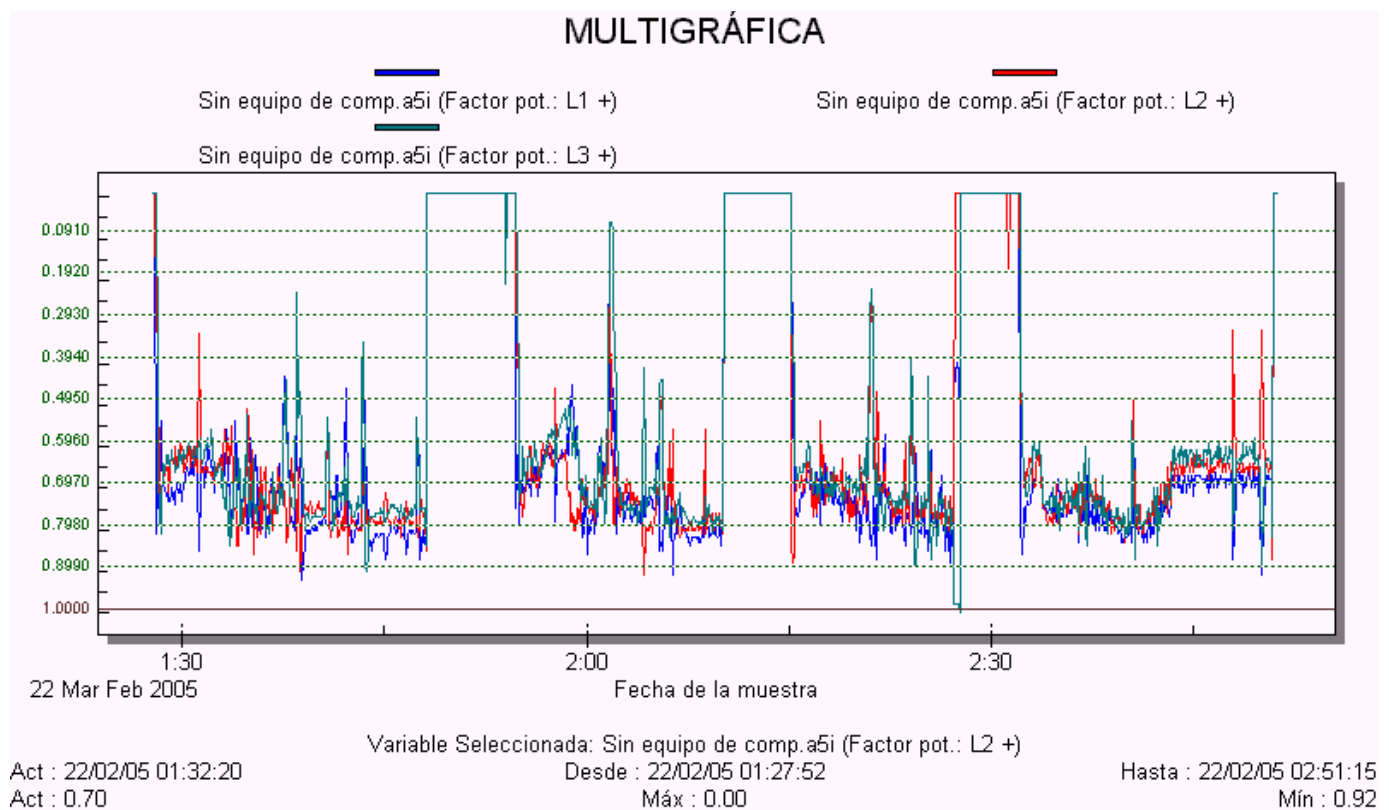


Figura 5.1.- Factor de potencia durante el ciclo de operación del horno, sin equipo de compensación (imagen cortesía de TNV Consulting Co.)

b) Corriente rms

En la figura 5.2, se muestra la corriente por fase en valor eficaz, en función del tiempo, que demanda el horno durante el ciclo de operación.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición, la corriente promedio, es de aproximadamente 900 A, con grandes fluctuaciones instantáneas a lo largo del proceso. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores que se encuentran entre 150 y 1800 A.
- Durante el proceso de afino, la corriente promedio se mantiene prácticamente igual, mientras que la cantidad de las fluctuaciones disminuyen notablemente.
- Cabe señalar que, la corriente antes mencionada, proviene en su totalidad de la compañía suministradora, puesto el horno esta operando sin equipo de compensación del factor de potencia.

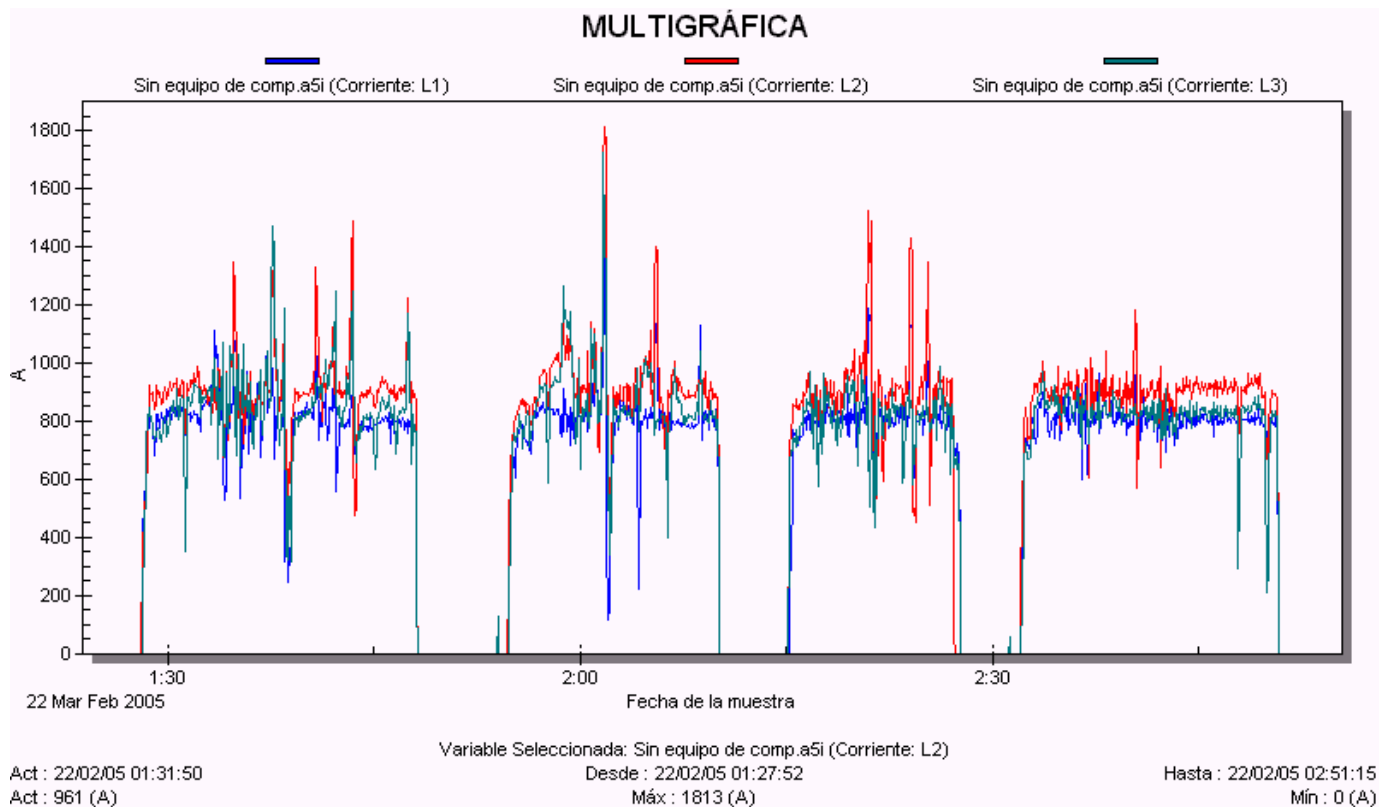


Figura 5.2.- Corriente por fase durante el ciclo de operación del horno, sin equipo de compensación (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

c) Tensión rms

La figura 5.3, muestra la tensión de fase a neutro en valor eficaz, en función del tiempo, durante el ciclo de operación del horno.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición, la tensión promedio es de aproximadamente 7.2 kV, con grandes fluctuaciones instantáneas a lo largo del proceso. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores que se encuentran entre 6.2 kV y 7.6 kV, aproximadamente.
- Durante el proceso de afino la tensión promedio, es la misma, mientras que la cantidad de fluctuaciones instantáneas disminuyen notablemente.
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, la tensión promedio es de aproximadamente 7.8 kV. Que es la tensión, nominal proporcionada por la compañía suministradora.

De acuerdo a los puntos anteriores, la caída de tensión promedio durante el ciclo de operación es de aproximadamente 8% (600V).

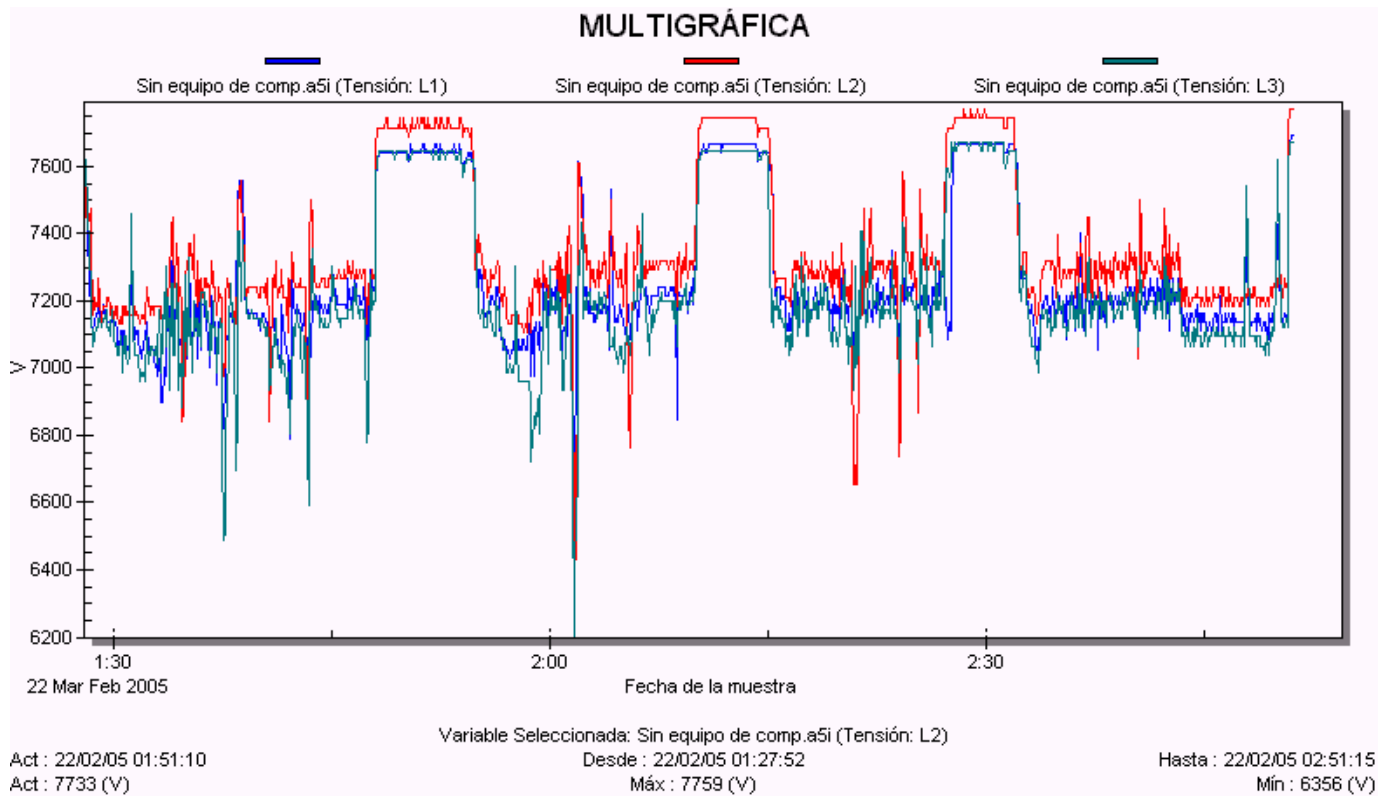


Figura 5.3.- Tensión de fase a neutro durante el ciclo de operación del horno, sin equipo de compensación (medición cortesía de TNV Consulting Co.).

d) Distorsión armónica total, en voltaje: TDH (V) y en corriente: TDH (I)

La figura 5.4, muestra la forma que adquieren las ondas de tensión y de corriente a frecuencia fundamental, al ser contaminadas por el espectro de frecuencias armónicas emitido por la operación del horno. Ya que dicho espectro es emitido con el horno operando sin equipo de compensación, se puede decir que se trata del espectro nominal.

El valor del TDH (V) y del TDH (I), se proporciona en, por ciento, del valor eficaz de las ondas de voltaje y de corriente a frecuencia fundamental. Dichas formas de onda, son una muestra que ha sido tomada en un instante de tiempo (1:34:05) correspondiente al proceso de fundición. Ya que durante este proceso el horno emite una mayor cantidad de armónicas.

Se observa que:

- El TDH (V) promedio, es aproximadamente 2.5%, por consiguiente, éste valor se encuentra dentro de los límites permitidos por la norma IEEE -519, que establece un valor máximo del 5%, para niveles de tensión menores que 69 kV.
- El TDH (I) promedio, es aproximadamente 13 %, por lo que no se cumple con la norma IEEE 519, que establece un valor máximo de 5 %, para una relación de $I_{CC} / I_1 < 20$.

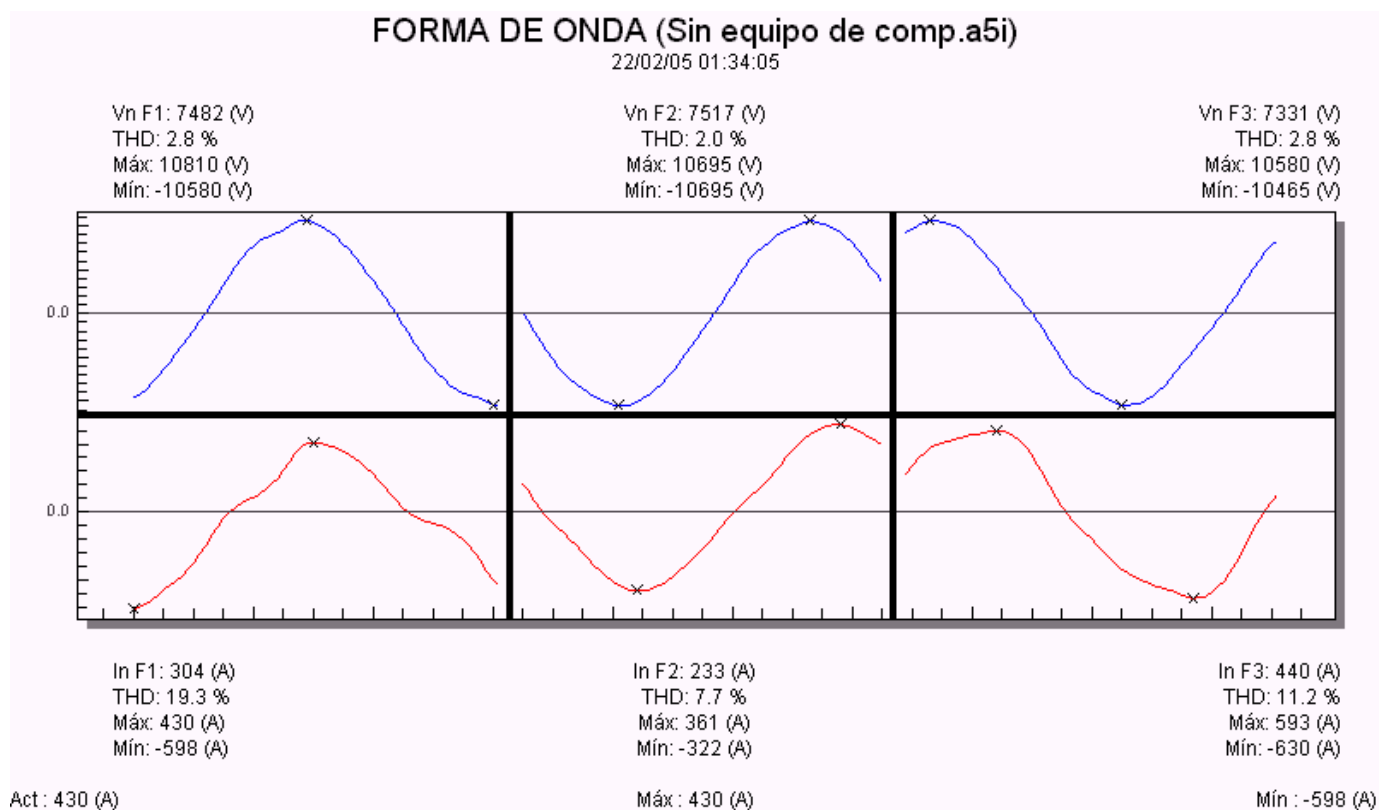


Figura 5.4.- Ondas de voltaje y de corriente, mostrando el parámetro de distorsión armónica, en voltaje: TDH (V) y, en corriente TDH (I), para un instante de tiempo correspondiente al proceso de fundición, sin equipo de compensación (medición cortesía de TNV Consulting Co)

e) Espectros de frecuencias armónicas presentes en la onda de tensión y en la onda de corriente.

La figura 5.5, muestra el espectro de frecuencias armónicas emitido por la operación del horno, sin la presencia de un equipo de compensación, junto los valores de voltaje y de corriente de dicho espectro, dados en por ciento del valor eficaz de las onda de voltaje y de corriente a frecuencia fundamental, respectivamente. Dicho espectro, corresponde a un instante de tiempo en que se realiza el proceso de fundición. Las frecuencias, cuyos valores nos interesa conocer, son las de 2º, 3º, 4º y 5º, orden, ya que estas frecuencias, son las que usualmente se eligen para ser filtradas, a la hora de diseñar un filtro de absorción de corrientes armónicas.

Se observa que:

- El voltaje de las armónicas de 2º, 3º, 4º y 5º, orden, en por ciento, de la fundamental, es: 0.6%, 1.7%, 0.3%, 2.1%, respectivamente.
- La corriente de las armónicas de 2º, 3º, 4º y 5º, orden, en por ciento, de la fundamental, es: 6%, 1.7%, 0.3% y 2.1%, respectivamente.

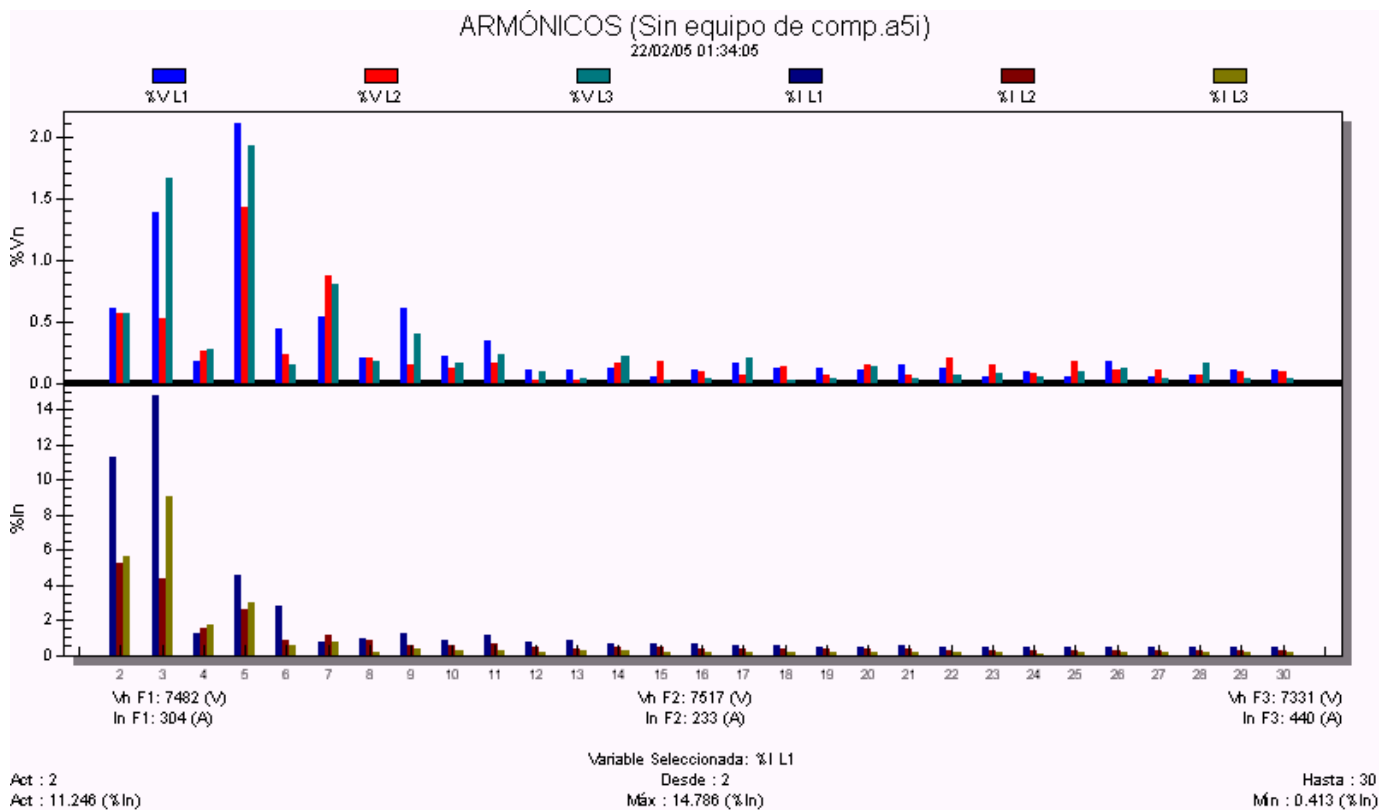


Figura 5.5.- Espectro de frecuencias armónicas con sus valores de voltaje y de corriente, durante la operación del horno sin equipo de compensación (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

5.3.- Mediciones eléctricas efectuadas durante la operación del horno con un banco de capacitores

a) Factor de potencia

La figura 5.6, muestra el factor de potencia en función del tiempo, durante un ciclo de operación del horno. En dicha figura se observan cuatro etapas bien definidas, donde las primeras tres y media etapas, corresponden al proceso de fundición; mientras que la segunda mitad de la tercera etapa junto con la cuarta etapa, corresponden al proceso de afino.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición el factor de potencia promedio es de aproximadamente 0.80, con esporádicas y grandes fluctuaciones instantáneas. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores que se encuentran ente 0.04 y -0.08 (el signo menos, indica que es del tipo capacitivo)
- Durante el proceso de afino, el factor de potencia promedio es prácticamente el mismo, sin presentar fluctuaciones instantáneas.
- El factor de potencia promedio durante los intervalos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, es de aproximadamente -0.14 . En estos intervalos, el sistema eléctrico del horno se comporta como una fuente de potencia reactiva hacia la red eléctrica de la compañía suministradora.

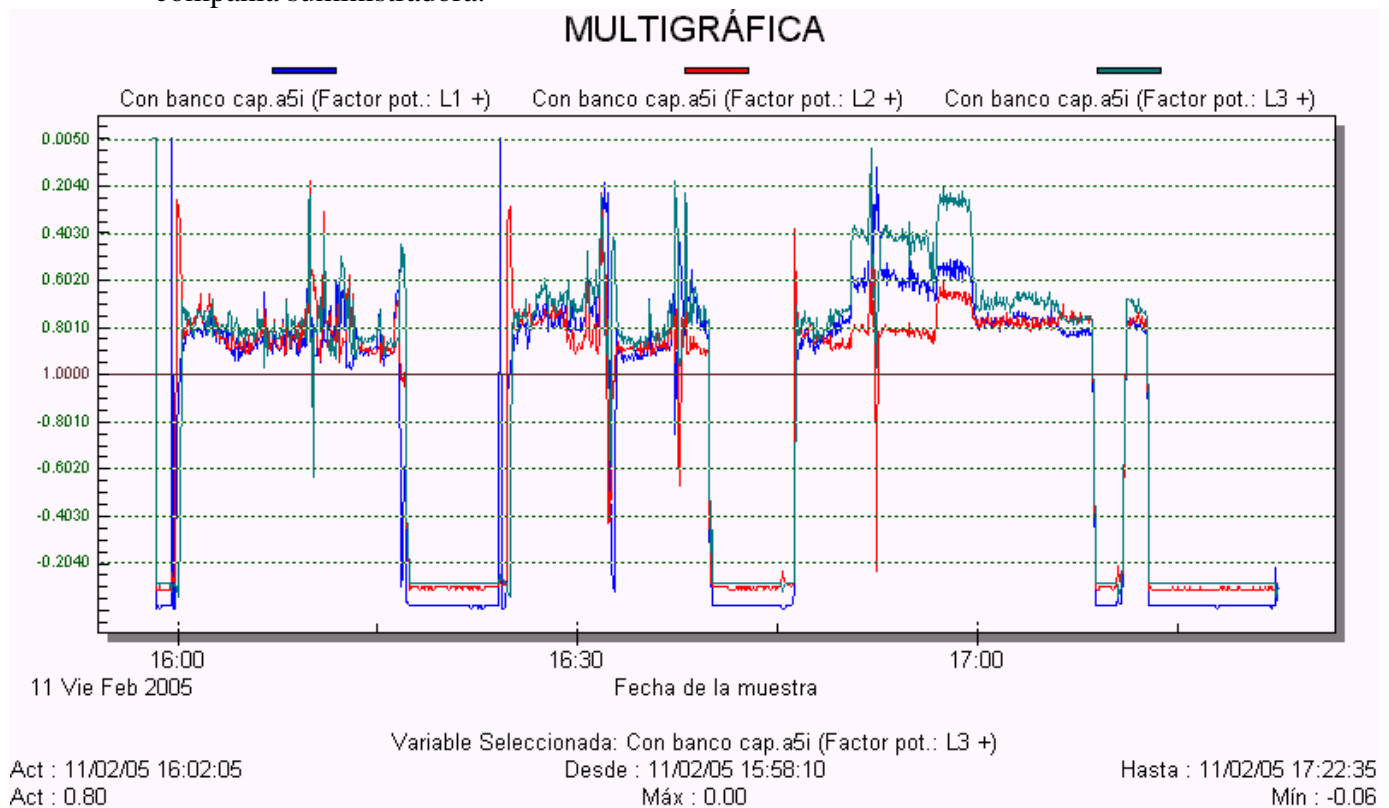


Figura 5.6.- Factor de potencia durante el ciclo de operación del horno, con un banco de capacitores (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

b) Corriente rms

La figura 5.7, muestra la corriente por fase en valor eficaz, en función del tiempo, que demanda el horno durante el ciclo de operación.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición la corriente promedio, es de aproximadamente 800 A, con grandes fluctuaciones instantáneas. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores que se encuentran entre 150 y 1700 A, aproximadamente.
- Durante el proceso de afino, la corriente promedio se mantiene prácticamente igual, pero en cambio, no presenta fluctuaciones instantáneas
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, se presenta un flujo de corriente de aproximadamente 170 A. Se trata de la corriente aportada por el banco de capacitores, la cual durante, fluye hacia la red eléctrica de la compañía suministradora.

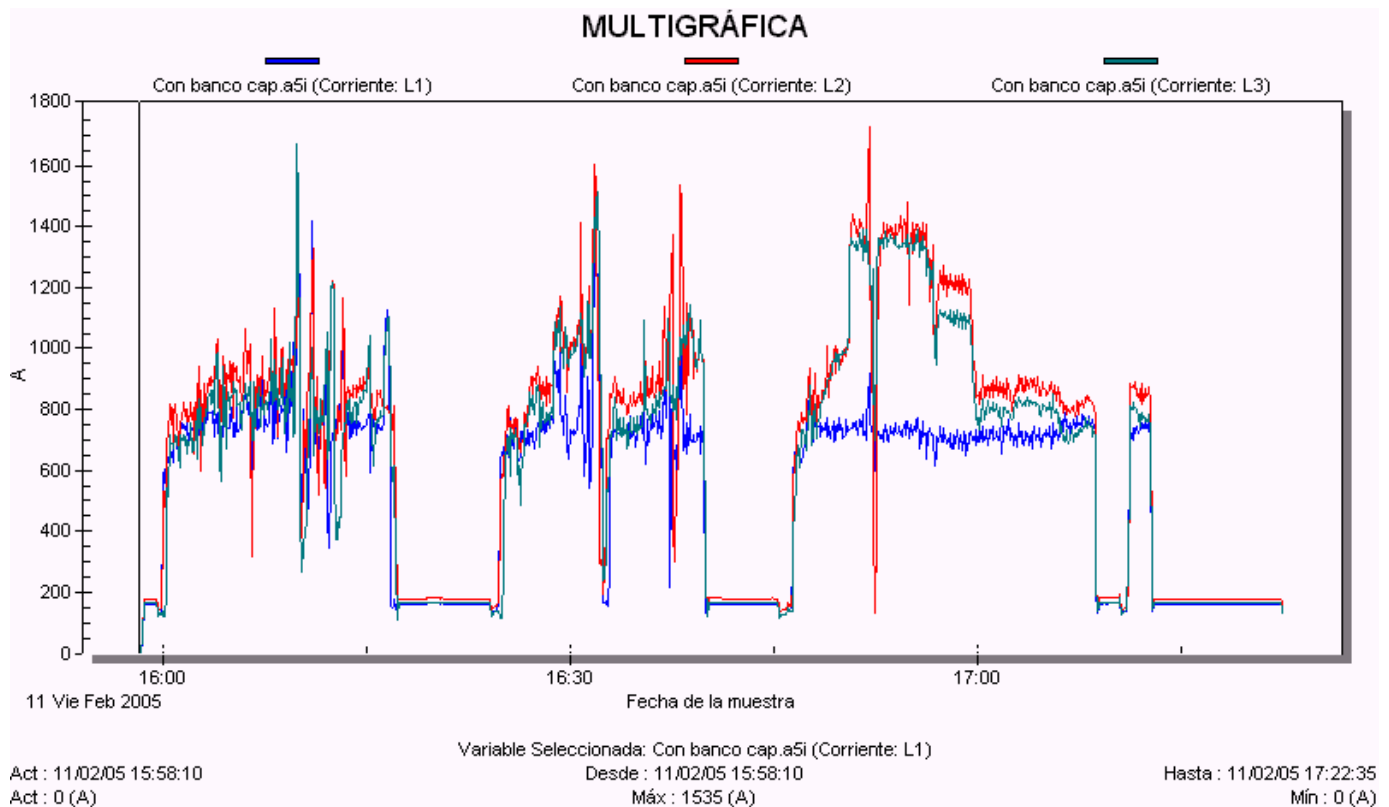


Figura 5.7.- Corriente por fase durante el ciclo de operación del horno, con banco de capacitores (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

c) Tensión rms

La figura 5.8 muestra la tensión de fase a neutro en valor eficaz, en función del tiempo, durante el ciclo de operación del horno.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición la tensión promedio es de aproximadamente 7.4 kV, con grandes fluctuaciones instantáneas. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores entre 6.2 kV y 7.8 kV.
- Durante el proceso de afino, el voltaje promedio se mantiene prácticamente igual, pero en cambio, no se presentan fluctuaciones instantáneas.
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, la tensión promedio es de aproximadamente 7.85 kV.

De acuerdo a los puntos anteriores, la caída de tensión durante el proceso de fundición y de afino es de aproximadamente 6 %.

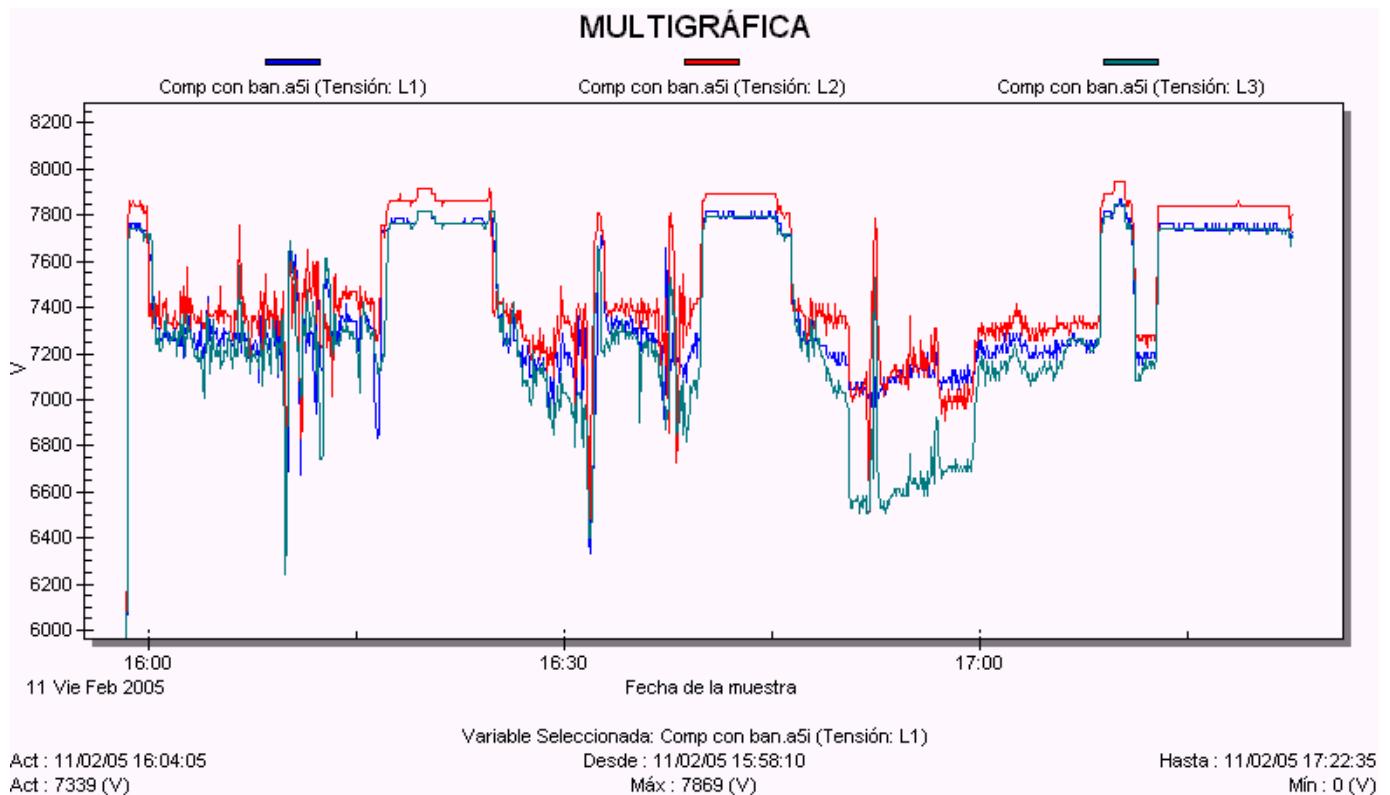


Figura 5.8.- Tensión de fase a neutro durante el ciclo de operación del horno, con banco de capacitores (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

d) Distorsión armónica total, en voltaje: TDH (V) y en corriente: TDH (I)

La figura 5.9, muestra la forma que adquieren las ondas de tensión y de corriente a frecuencia fundamental, cuando el espectro de frecuencias armónicas emitido por la operación del horno, es amplificado por la presencia del banco de capacitores. El valor del TDH (V) y del TDH (I), se proporciona en, por ciento, del valor eficaz de las ondas de voltaje y de corriente fundamentales. Dichas formas de onda, corresponden a un instante de tiempo: 16:00:45, correspondiente al proceso de fundición.

Se observa que:

- El TDH (V) promedio es de 8 %, por consiguiente, no se cumple con la norma IEEE-519, que establece un valor máximo del 5%, para niveles de tensión menores que 69 kV.
- El TDH (I) promedio es 25 %, por consiguiente, no se cumple con la norma IEEE-519, que establece un valor máximo del 5%, para una relación de $I_{CC}/I_1 < 20$.

El incremento del TDH (V) y del TDH (I), que se menciona en los puntos anteriores, se debe a que ha empezado a generarse un fenómeno de resonancia serie entre el banco de capacitores y el transformador de acometida al sistema eléctrico del horno (ver inciso 3.1.4, del capítulo III).

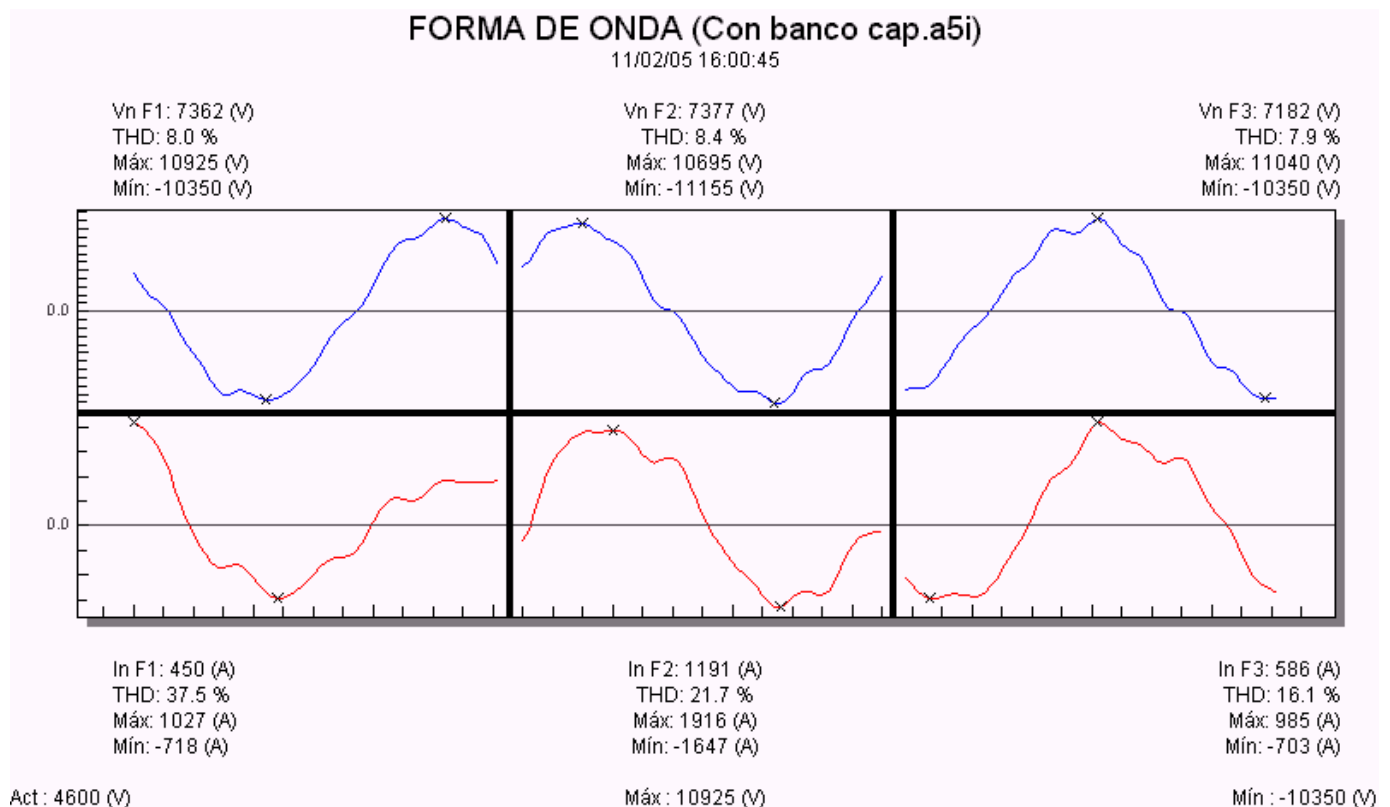


Figura 5.9.-Ondas de voltaje y de corriente, mostrando el parámetro de distorsión armónica, en voltaje: TDH (V) y, en corriente TDH (I), durante la operación del horno con un banco de capacitores (medición cortesía de TNV Consulting Co)

e) Espectros de frecuencias armónicas presentes en la onda de tensión y en la onda de corriente.

La figura 5.5, el espectro de frecuencias armónicas emitido por la operación del horno y los valores de voltaje y de corriente, que adquiere el espectro en presencia de un banco de capacitores. Los valores de voltaje y de corriente, son dados en valor eficaz de la onda de voltaje y de corriente a frecuencia fundamental, respectivamente. Las frecuencias, cuyos valores nos interesa conocer, son las de 2º, 3º, 4º y 5º, orden, por los mismo motivos que se han mencionado en el caso anterior.

Se observa que:

- La tensión de las armónicas de 2º, 3º, 4º y 5º, orden, en por ciento, de la onda fundamental es: 2%, 2.5%, 1% y 4%, respectivamente.
- La corriente de las armónicas de 2º, 3º, 4º, y 5º, orden, en por ciento, de la onda fundamental es: 22%, 13%, 6%, 11%, respectivamente.

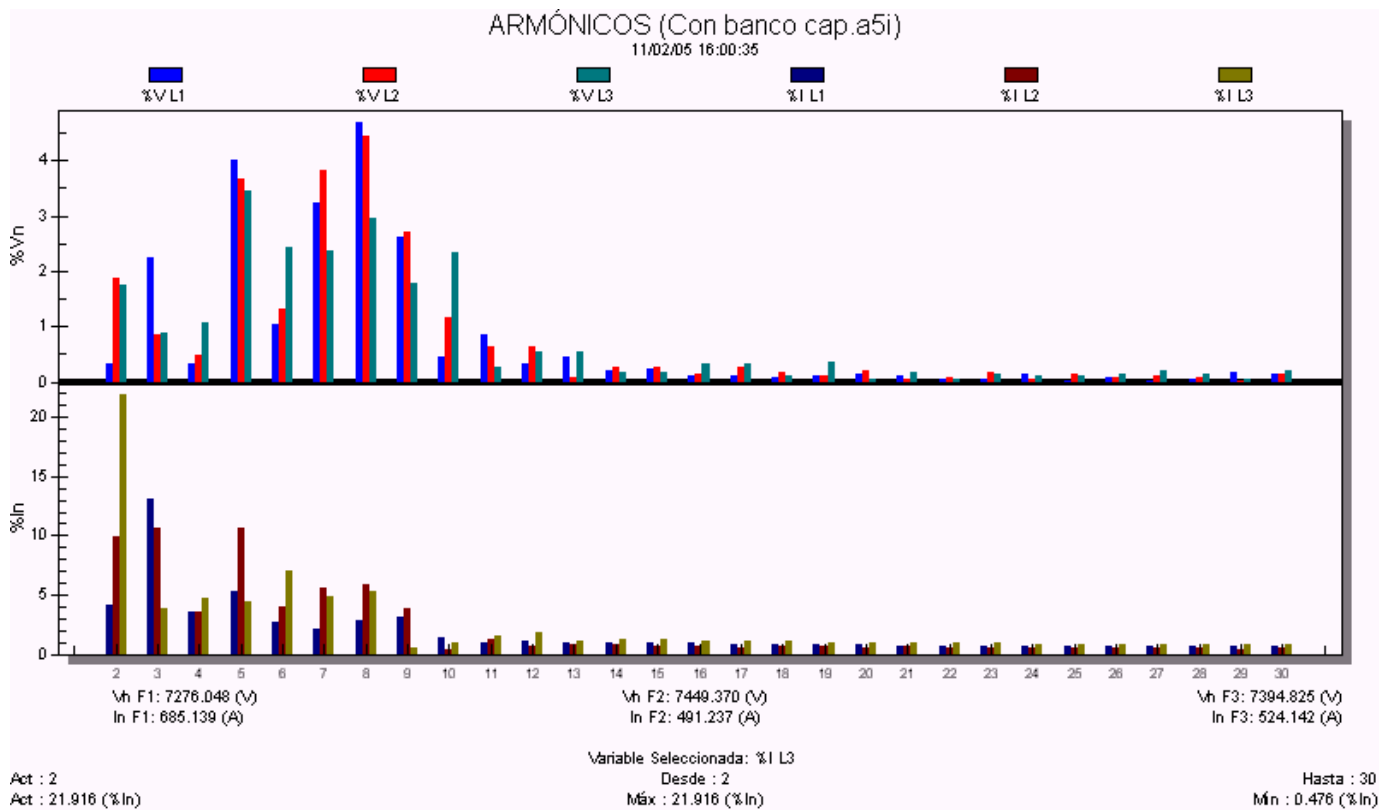


Figura 5.10.- Espectro de frecuencias armónicas con sus valores de voltaje y de corriente, durante la operación del horno con el banco de capacitores (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

5.4.- Mediciones eléctricas efectuadas durante la operación del horno con el filtro de absorción de corrientes armónicas, cuyo diseño es motivo de esta tesis

a) Factor de potencia

La figura 5.11, muestra el factor de potencia por fase en valor eficaz, en función del tiempo, durante un ciclo de operación del horno. Las primeras tres etapas más el primer tercio (aproximadamente) de la cuarta etapa, corresponden al proceso de fundición, mientras que los dos últimos tercios de la cuarta etapa junto con las siguientes etapas, corresponden al proceso de afino.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición, el factor de potencia promedio es de aproximadamente -0.95 (capacitivo), con fluctuaciones instantáneas al inicio del proceso. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores que se encuentran entre 0.45 y -0.07
- Durante el proceso de afino, el factor de potencia promedio, se mantiene aproximadamente a un valor unitario, sin presentar fluctuaciones instantáneas.
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, el factor de potencia promedio, es de aproximadamente -0.1. Durante éstos periodos el sistema eléctrico del horno, se comporta como una fuente importante de potencia reactiva capacitiva, hacia la red eléctrica de la compañía suministradora.

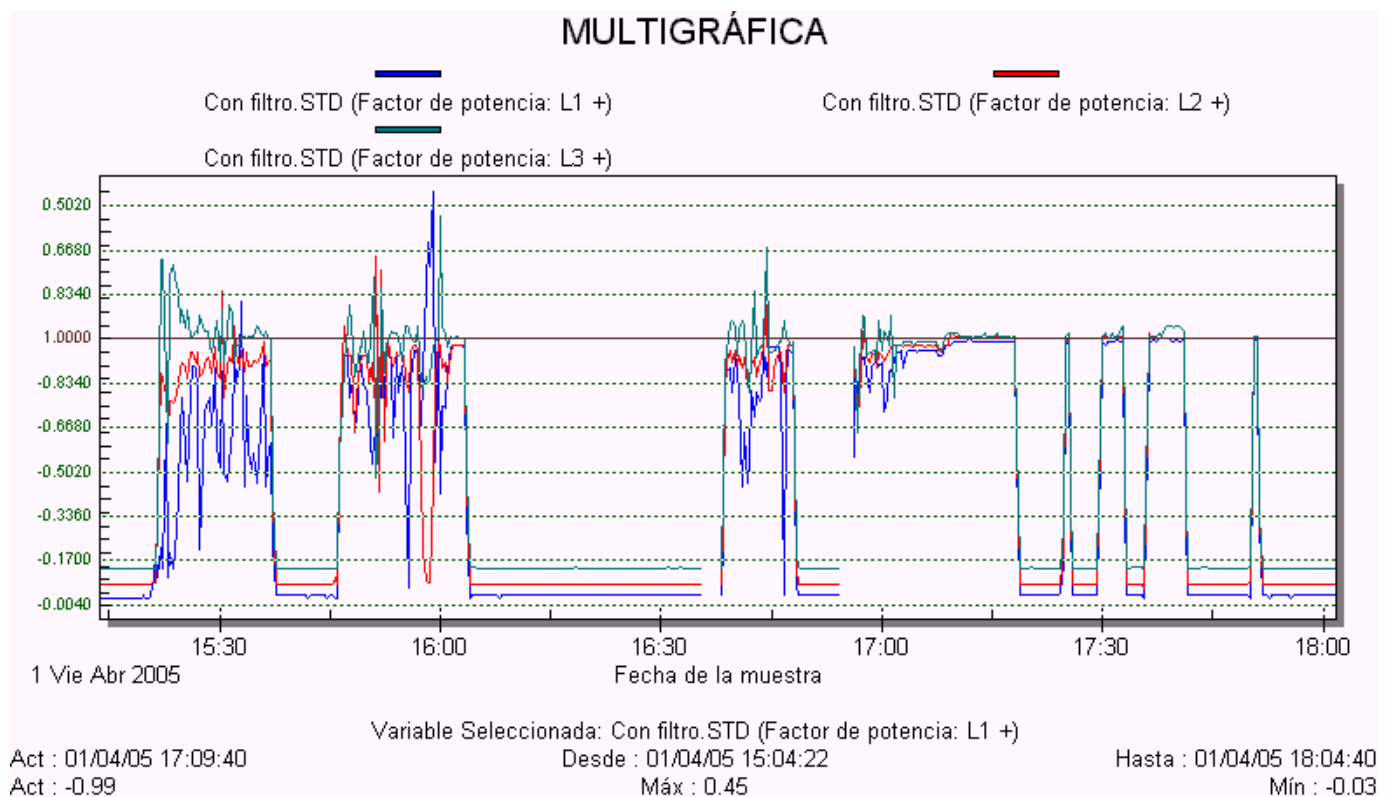


Figura 5.11.- Factor de potencia durante el ciclo de operación del horno, con el filtro de absorción de corrientes armónicas (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

b) Corriente rms

La figura 5.12, muestra la corriente por fase en valor eficaz, en función del tiempo, que demanda el horno durante el ciclo de operación.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición, la corriente promedio es de aproximadamente 700 A, con fluctuaciones instantáneas cuyos valores se encuentran entre 400A y 1,000A, aproximadamente.
- Durante el proceso de afino, la corriente presenta el mismo valor, y en cambio, no presenta fluctuaciones instantáneas.
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, se tiene un flujo de corriente de aproximadamente 650 A. Esta corriente proviene del filtro de absorción de corrientes armónicas y viaja hacia la red eléctrica de la compañía suministradora. Ya que durante estos periodos, por razones de seguridad el transformador del horno es desenergizado.

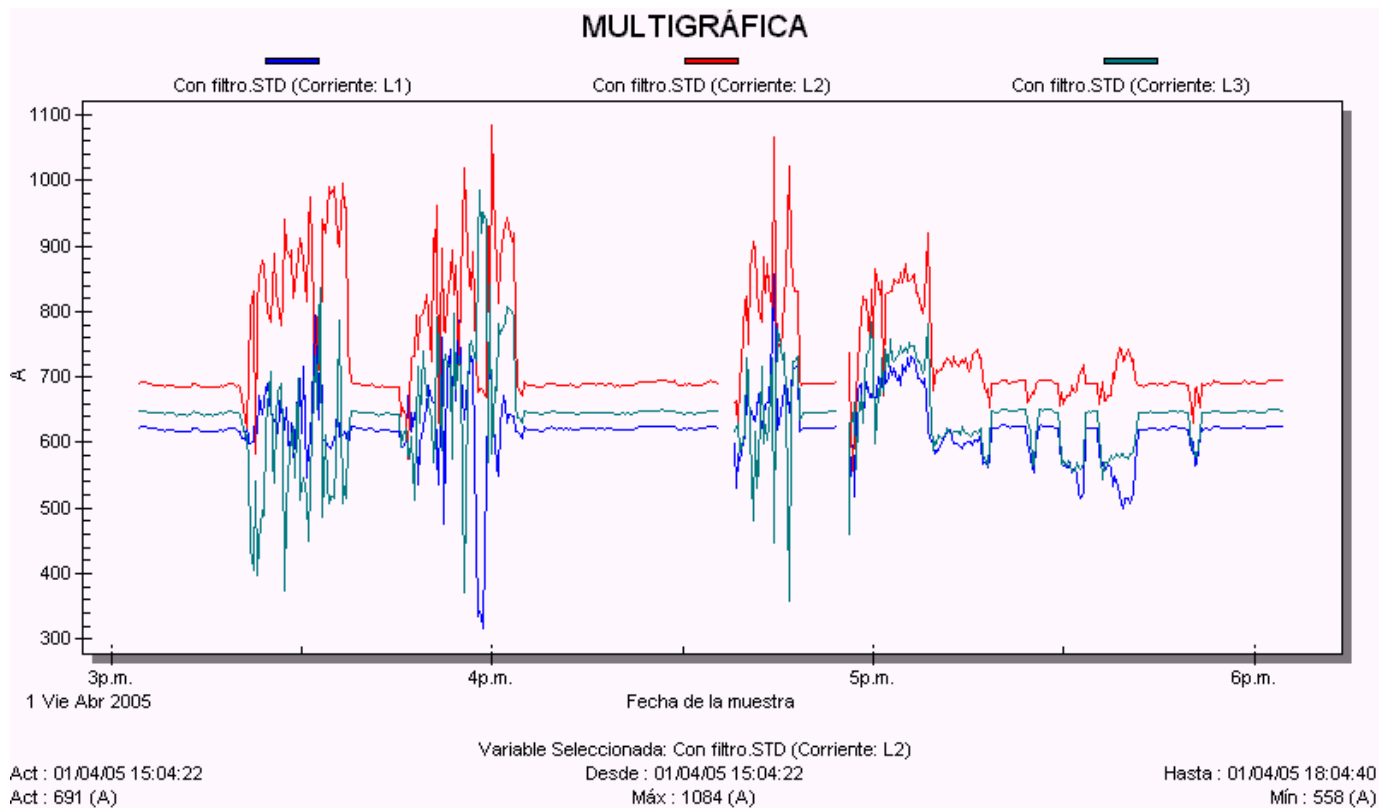


Figura 5.12.- Corriente por fase durante el ciclo de operación del horno, con el filtro de absorción de corrientes armónicas (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

c) Tensión rms

La figura 5.13, muestra la tensión entre fases en valor eficaz en función del tiempo, durante el ciclo de operación del horno. En las mediciones presentadas en los casos de operación anteriores, se muestra la tensión de fase a neutro, ya que el analizador de redes con el que se realizaron las mediciones, fue configurado de dicha manera.

Se observa que:

- Durante el proceso de fundición, el voltaje promedio entre fases es de aproximadamente 13.2 kV, o bien de 7.6 kV de fase a neutro. Las fluctuaciones instantáneas presentan valores entre 12.2 kV hasta 14 kV, aproximadamente; ó bien de 7 kV a 8 kV para voltajes de fase a neutro
- Durante el proceso de afino, el voltaje promedio es aproximadamente el mismo, en cambio, no presenta fluctuaciones instantáneas.
- Durante los periodos en que se realizan maniobras de recarga de chatarra, el voltaje promedio, es de aproximadamente 14 kV.

De acuerdo a los puntos anteriores, la caída de tensión es de aproximadamente 6%, durante el proceso de fundición y de afino.

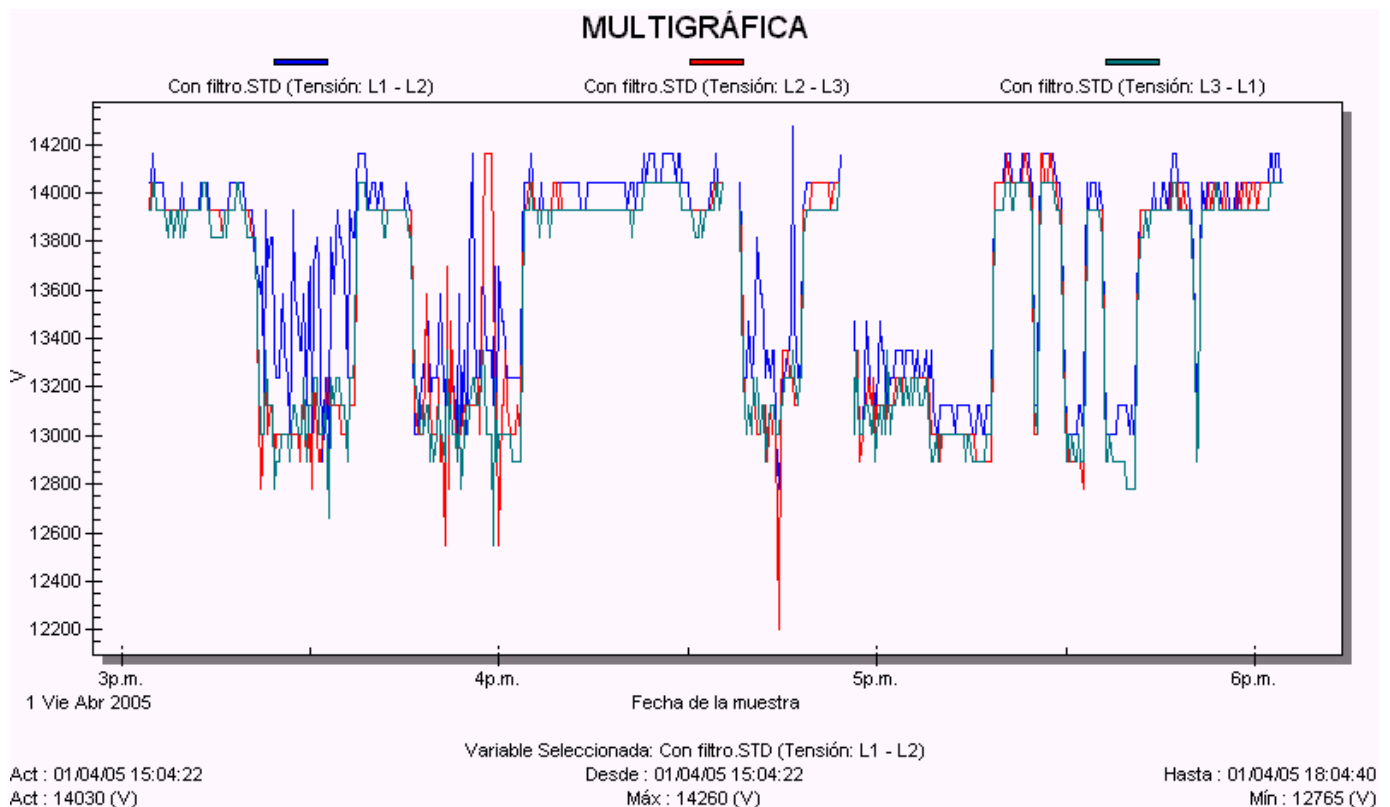


Figura 5.13.- Tensión entre fases durante el ciclo de operación del horno, con el filtro de absorción de corrientes armónicas (medición cortesía de TNV Consulting Co.).

d) Distorsión armónica total, en voltaje: TDH (V) y en corriente: TDH (I)

La figura 5.14, muestra la forma que adquieren las ondas de tensión y de corriente a frecuencia fundamental, cuando el valor del TDH (I) y del TDH (V), se encuentra dentro de valores normalizados. El valor del TDH (V) y del TDH (I), son dados, en por ciento, del valor eficaz de las ondas de voltaje y de corriente a frecuencia fundamental. Estas formas de onda corresponden a un instante de tiempo correspondiente al proceso de fundición (15:42:00)

Se observa que:

- El TDH (V) promedio es de 1 %, por consiguiente, se cumple con la norma IEEE-519, que establece un valor máximo del 5% para niveles de tensión menores que 69 kV.
- El TDH (I) promedio es de 3%, por consiguiente, se cumple con la norma IEEE-519, que establece un valor máximo del 5% para una relación de $I_{CC}/I_1 < 20$.

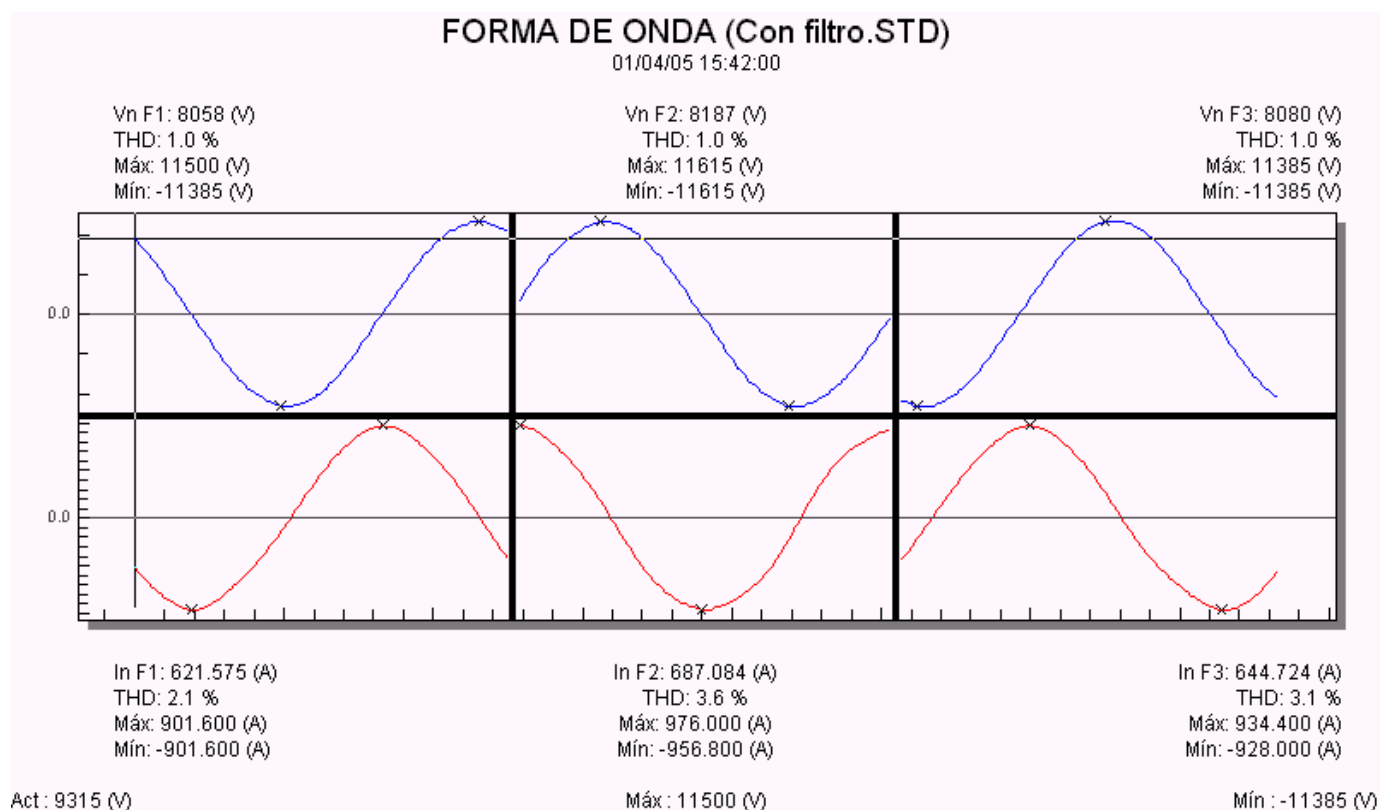


Figura 5.14.-Ondas de voltaje y de corriente, mostrando el parámetro de distorsión armónica, en voltaje: TDH (V) y, en corriente TDH (I), para un instante de tiempo correspondiente al proceso de fundición y con compensación mediante el filtro de absorción de corrientes armónicas (medición cortesía de TNV Consulting Co)

e) Espectros de frecuencias armónicas presentes en la onda de tensión y en la onda de corriente

La figura 5.15, muestra el espectro de frecuencias armónicas emitido por la operación del horno y los valores de voltaje y de corriente que adquiere el espectro en presencia del filtro de absorción de corrientes armónicas. Los valores de corriente y de voltaje, son dados, en por ciento del valor eficaz de la onda de corriente y de voltaje a frecuencia fundamental, respectivamente. Las frecuencias armónicas cuyos valores nos interesa conocer son las de 2°, 3°, 4° y 5°, orden, por los mismo motivos mencionados en el primer caso de operación del horno.

- La tensión promedio, que presentan las armónicas de 2°, 3°, 4° y 5°, orden, son: 1.2%, 1.7%, 0.6%, 1.3%, respectivamente.
- La corriente promedio que presentan las armónicas de 2°, 3°, 4° y 5°, orden, son: 6%, 5.9%, 2% y 1.5%, respectivamente.

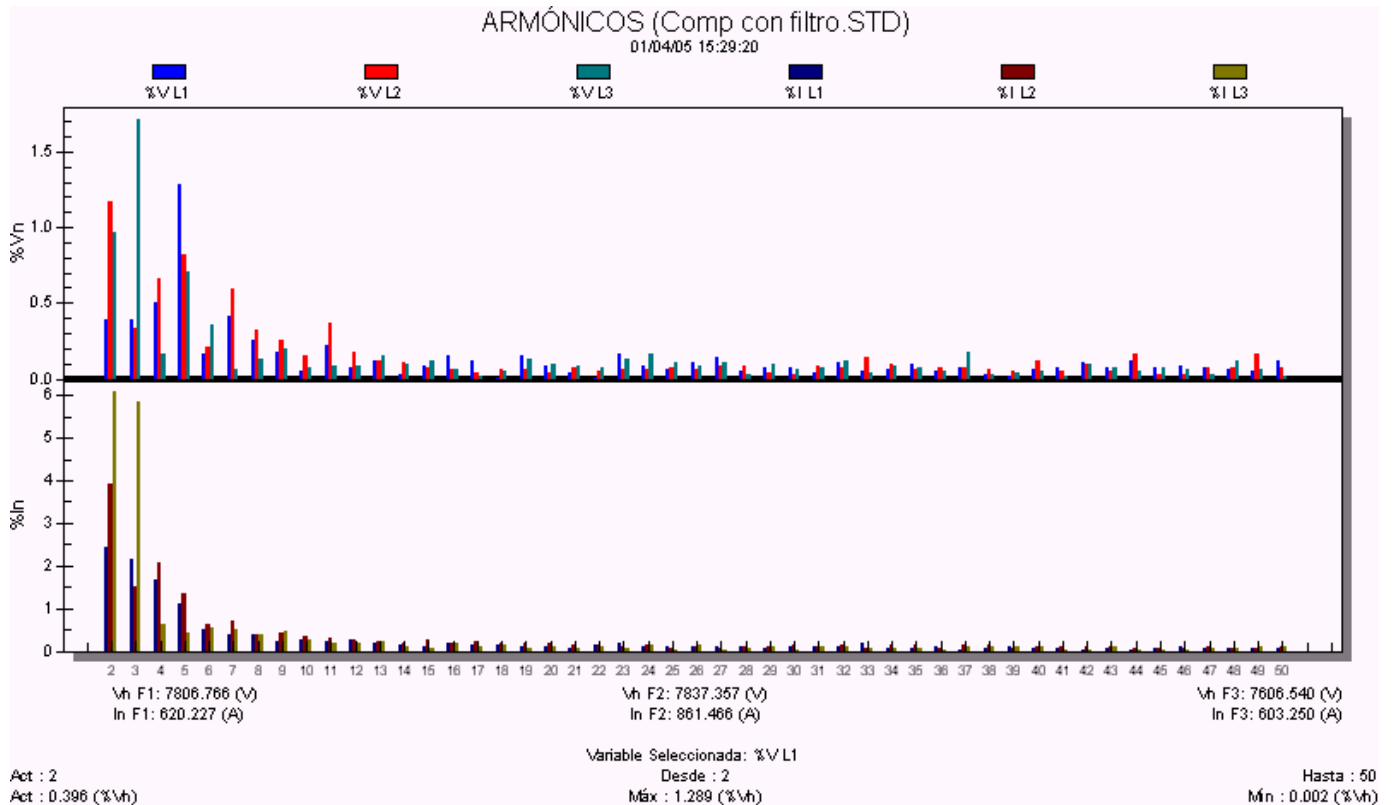


Figura 5.15.- Espectro de frecuencias armónicas con sus valores de voltaje y de corriente, durante la operación del horno con el filtro de absorción de corrientes armónicas (medición cortesía de TNV Consulting Co.)

5.5.- Evaluación de los resultados

Para cada caso de operación del horno, el comportamiento de los parámetros eléctricos y el del espectro de frecuencias armónicas emitido por la operación del horno, es diferente. Con objeto, de resumir dichas diferencias, se hará una comparación de las observaciones hechas en cada caso de operación. Esto se llevará a cabo de la siguiente manera:

- a) Horno operando sin equipo de compensación frente a horno operando con el banco de capacitores
- b) Horno operando sin equipo de compensación frente a horno operando con el filtro de absorción de corrientes armónicas
- c) Horno operando con el banco de capacitores frente a horno operando con el filtro de absorción de corrientes armónicas

a) Horno operando sin equipo de compensación frente al horno operando con el banco de capacitores

- Factor de potencia
 - Sin equipo de compensación: 0.70
 - Con el banco de capacitores: 0.80

- Corriente
 - Sin equipo de compensación: 900 A,
 - Con el banco de capacitores: 800 A.

- Caída de tensión
 - Sin equipo de compensación: 7.8 kV, con una caída del 10 %
 - Con el banco de capacitores: 7.85 kV con una caída del 6%

- TDH (V)
 - Sin equipo de compensación: 2.5%
 - Con el banco de capacitores: 8%

- TDH (I)
 - Sin equipo de compensación: 13%
 - Con el banco de capacitores: 25%

- Voltaje de las armónicas de 2º, 3º, 4º y 5º orden, en porciento, de la onda fundamental
 - Sin equipo de compensación: 0.35%, 0.6%, 0.30%, 1%, respectivamente.
 - Con el banco de capacitores: 2%, 2.5%, 1%, 4%, respectivamente

- La corriente de las armónicas de 2º, 3º, 4º, y 5º orden, en por ciento, de la onda fundamental
 - Sin equipo de compensación: 11%, 6%, 5% y 4%, respectivamente.
 - Con el banco de capacitores: 22%, 13%, 6% y 11%, respectivamente.

- b) Horno operando sin equipo de compensación frente a horno operando con el filtro de absorción de corrientes armónicas
- El factor de potencia
 - Sin equipo de compensación: 0.70
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 0.99
 - Corriente
 - Sin equipo de compensación: 900 A.
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 650 A.
 - Tensión
 - Sin equipo de compensación: 7.8 kV con una caída de 10 %
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 8.2 kV ($14.2/\sqrt{3}$), con una caída del 5.7%
 - TDH (V)
 - Sin equipo de compensación: 2.5%
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 1%.
 - TDH (I)
 - Sin equipo de compensación: 13%.
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 3%
 - Voltaje de las armónicas de 2°, 3°, 4° y 5° orden, en porciento, de la onda fundamental
 - Sin equipo de compensación: 0.35%, 0.6%, 0.30% y 1%, respectivamente.
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 1.2%, 1.7%, 0.6% y 1.3%, respectivamente.
 - La corriente de las armónicas de 2°, 3°, 4°, y 5° orden, en por ciento, de la onda fundamental
 - Sin equipo de compensación: 11%, 6%, 5% y 4%, respectivamente.
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 6%, 5.9%, 2% y 1.5%, respectivamente

- c) Horno operando con el banco de capacitores frente a horno operando con el filtro de absorción de corrientes armónicas
- El factor de potencia
 - Con el banco de capacitores: 0.80
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 0.99
 - Corriente
 - Con el banco de capacitores: 800
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 650 A.
 - Tensión
 - Con el banco de capacitores: 7.85 kV con una caída del 6%
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 8.2 kV ($14.2/\sqrt{3}$), con una caída del 5.7%
 - TDH (V)
 - Con el banco de capacitores: 8%
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 1%.
 - TDH (I)
 - Con el banco de capacitores: 25%
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 3%
 - Voltaje de las armónicas de 2°, 3°, 4° y 5° orden, en por ciento, de la onda fundamental
 - Con el banco de capacitores: 2%, 2.5%, 1% y 4%, respectivamente
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 1.2%, 1.7%, 0.6% y 1.3%, respectivamente.
 - La corriente de las armónicas de 2°, 3°, 4°, y 5° orden, en por ciento, de la onda fundamental
 - Con el banco de capacitores: 22%, 13%, 6% y 11 %, respectivamente
 - Con el filtro de absorción de corrientes armónicas: 6%, 5.9%, 2% y 1.5%, respectivamente

CONCLUSIONES

Se presentó en esta Tesis una guía de diseño de filtros de absorción de corrientes armónicas y compensación del factor de potencia para hornos de arco de fundición de acero, donde, se explican los criterios de diseño de los filtros y la metodología a seguir para el cálculo completo de los mismos, con lo cual se cumple con el objetivo general de esta Tesis.

Como caso particular, que sirve de ejemplo para este tipo de diseños, se aplicó la técnica de diseño mencionada al caso de un horno de arco de 27 MVA, a 13.8 kV, 3F, 60 Hz, operando actualmente en una planta siderúrgica, en el Estado de Veracruz, México.

El autor de esta Tesis colaboró en el diseño del filtro que se presenta, así como en su instalación y puesta en operación.

Además como conclusiones del trabajo presentado, se pueden mencionar:

- a) Se puede compensar el factor de potencia de un horno de arco con un banco de capacitores solos, es decir, sin protección por medio de reactores de rechazo o de sintonía. Sin embargo, al compensar con este procedimiento, el factor de potencia que se puede lograr no sobrepasa valores de 0.92, aproximadamente, porque si se instalan más capacitores para lograr un factor de potencia más alto, se incurre invariablemente en fenómenos de resonancia armónica entre el banco de capacitores y el transformador de acometida al horno. Con este procedimiento de compensación: banco de capacitores solos, además de quedar limitados los beneficios de bonificación monetaria, por alto factor de potencia, por parte de la compañía eléctrica suministradora; no se garantiza el cumplimiento de la normatividad relativa a emisiones de corrientes armónicas hacia la red externa, ni se consigue, normalmente, que el horno de arco alcance su plena capacidad de producción, debido a la saturación eléctrica del transformador de acometida.
- b) Una forma efectiva y económica de compensar la potencia reactiva de un horno de arco, o sea su factor de potencia, es por medio de un filtro capacitivo de absorción de corrientes armónicas. Compensando con este procedimiento, el factor de potencia promedio que se logra en la operación del horno puede ser de 0.98%, e incluso más alto (aunque se incurre en un costo marginal ineficiente, cuando pretendemos llegar a factor de potencia unitario). De esta forma logramos los máximos beneficios de bonificación por alto factor de potencia, por parte de la compañía eléctrica suministradora y cumplimos con la normatividad que limita las emisiones de corrientes armónicas permisibles hacia el exterior de la red que alimenta con energía eléctrica al horno. Se evita el fenómeno de resonancia armónica. Se estabiliza mejor el voltaje, al compensar de esta forma y se opera al horno a un nivel de voltaje que propicia una mayor productividad. Se libera de esta forma, también, el máximo de capacidad en el transformador de acometida al horno. Así mismo, se disminuyen al máximo las pérdidas eléctricas provocadas por el flujo de armónicas a través de dicho transformador. También se reducen vibraciones mecánicas en el mismo y se garantiza su vida media esperada.
- c) Al compensar el horno con un filtro capacitivo de corrientes armónicas, a valores de 0.98 del factor de potencia, se logran, normalmente, aumentos de producción en el mismo del orden de 20%.

ANEXOS

ANEXO A

**FUSIBLES DE POTENCIA TIPO EXPULSIÓN PARA LA PROTECCIÓN
INDIVIDUAL DE LOS CAPACITORES DE UNA SECCIÓN DE FILTRADO**

Para elegir un fusible de potencia tipo expulsión destinado a proteger un capacitor unitario de una determinada sección del filtro, deben tenerse en cuenta los parámetros siguientes:

- 1.- Voltaje nominal del capacitor que va a ser protegido por el fusible.
- 2.- Corriente nominal del capacitor.
- 3.- Corriente que pasará por el fusible (corriente de fallo) al fallar el capacitor protegido.
- 4.- Energía almacenada en los capacitores conectados en paralelo por fase

Se explica a continuación el criterio a seguir:

- a) El voltaje nominal del fusible debe ser igual al voltaje del capacitor que va a ser protegido por dicho fusible, de forma que en caso de fallo del capacitor, la caída de tensión que aparezca a través del fusible no sea superior a su voltaje nominal.
- b) La corriente nominal del fusible debe exceder en un 65%, como mínimo, a la corriente nominal del capacitor. Esto es para que el fusible soporte el paso de corrientes armónicas captadas por el capacitor, así como los transitorios de conexión y desconexión de los capacitores y evitar que el fusible opere sin necesidad. En la práctica, es usual elegir el fusible con una corriente nominal que incluso exceda en un 100% (doble) a la corriente nominal de dicho capacitor.
- c) La capacidad interruptiva del fusible debe ser superior a la corriente de fallo del capacitor, según el arreglo eléctrico en que éste se encuentre instalado. La corriente de fallo depende esencialmente del tipo de conexión en que se han alambrado los capacitores de la sección de filtrado, estrella o delta y del número de capacitores instalados en serie y en paralelo en cada fase. En el caso de una conexión en estrella con neutro flotante y con una sola fila de capacitores conectados en paralelo por fase, la corriente de fallo de uno de los capacitores de una cierta fase es tres veces la corriente nominal de dicha fase. Al elegir la capacidad interruptiva del fusible, debe tenerse en cuenta que ésta suele venir expresada, en los datos del fabricante, en términos de corriente asimétrica máxima que puede soportar dicho fusible durante medio ciclo después de haberse producido el fallo. En la práctica, en las aplicaciones de alta tensión (más de 1000 V), esta corriente asimétrica se considera como de 1.6 veces el valor de la corriente simétrica de fallo. En las aplicaciones de baja tensión (menos de 1000 V), se considera una relación de 1.4.
- d) La energía almacenada en los capacitores conectados en paralelo por fase, no debe sobrepasar los 20 KJ, de lo contrario la energía de descarga i^2t , provocara la ruptura del tanque del capacitor, si, ésta, no es interrumpida a tiempo. Cuando se alcanza un nivel de energía almacenada que pasa los 20 KJ, se deben utilizar fusibles limitadores de corriente, ya que éstos tienen la capacidad de interrumpir dicha energía de descarga en tiempos mucho menores que los fusibles de potencia tipo expulsión. En la práctica, se considera recomendable no sobrepasar los 6000 KVAR (20,000 Joules), la potencia reactiva instalada en los capacitores en paralelo. Por lo antes mencionado, no se deben utilizar fusibles de potencia tipo expulsión, si las corrientes de fallo exceden los niveles indicados en la tabla A.1, siguiente:

Tabla A.1.- Corrientes de fallo a diferentes niveles de voltaje para fusibles de potencia tipo expulsión (tabla tomada de la página de internet: www.abb.com, hoja de datos 38-852, de la guía de selección).

Fuse Rating	*Rated Maximum Voltage	Fuse Applied At	Interrupting Rating (60 Hz, Amps RMS)	
			Sym.	Asym.
9.7 kV	10.67	8 kV	7,400	10,000
16.6 kV	18.26	15 kV	3,600	5,000
26.2 kV	28.82	20 kV	1,800	2,500
26.2 kV	28.82	25 kV	1,800	2,500

* Ref: IEEE C37.40

Fuse Rating (kV)	Capacitor Unit Voltage kV
9.7	2.4 to 8.8
16.6	8.3 to 15.1
26.2	15.1 to 23.8

Nota: esta tabla, puede diferir con la proporcionada por otros fabricantes, principalmente en cuanto a capacidad interruptiva y voltaje nominal, se refiere, por tal motivo se debe consultar la tabla que corresponde al fusible a utilizar.

Además de lo mencionado anteriormente, es necesario coordinar las características de fusión del fusible con la curva de probabilidad de ruptura del tanque del capacitor. Esto es con objeto de que, en caso de una falla en el capacitor, el fusible pueda fundirse y cortar el paso de corriente antes de que el tanque del capacitor corra el riesgo de explotar. La posibilidad de una explosión del capacitor, proviene de que, mientras está pasando corriente de fallo por el mismo, antes de que opere el fusible, se está gasificando el líquido impregnante del dieléctrico del capacitor. Los gases producidos de esta forma, aumentan la presión interna del tanque del capacitor fallado, a niveles que pueden producir una rotura de alta fuerza explosiva de dicho tanque.

De las curvas de fusión completa del fusible elegido puede deducirse el tiempo que tardará el fusible en interrumpir la corriente de fallo de un capacitor. La combinación de estos dos parámetros: corriente de fallo y tiempo de apertura del fusible, se lleva a las curvas de probabilidad de ruptura del tanque del capacitor y, en ellas, se determina un punto que debe quedar situado en una zona de seguridad de las definidas en dichas curvas. De no ser así, debe elegirse un fusible más sensible, cuya combinación: corriente de fallo / tiempo de fusión, determine una localización satisfactoria en las curvas de probabilidad de ruptura del tanque.

Para ejemplificar lo que se ha mencionado anteriormente, en la figura A.1 se muestran las curvas de fusión completa (máxima) para diferentes fusibles, tipo NEMA K, así también en la figura A.2, se muestran las curvas de probabilidad de ruptura correspondientes a un capacitor de 150 KVAR. El fusible adecuado para proteger a dicho capacitor es un 25 K, cuya curva de fusión completa se muestra en la figura A.1. Si se sobreponen dichas curvas, puede verse que en cualquier punto de la curva de fusión del fusible, éste alcanza su punto de fusión dentro de la zona segura de las curvas de probabilidad de ruptura del tanque del capacitor.

FUSIBLES DE POTENCIA TIPO EXPULSIÓN PARA LA PROTECCIÓN INDIVIDUAL DE LOS CAPACITORES DE UNA SECCIÓN DE FILTRADO ANEXO A

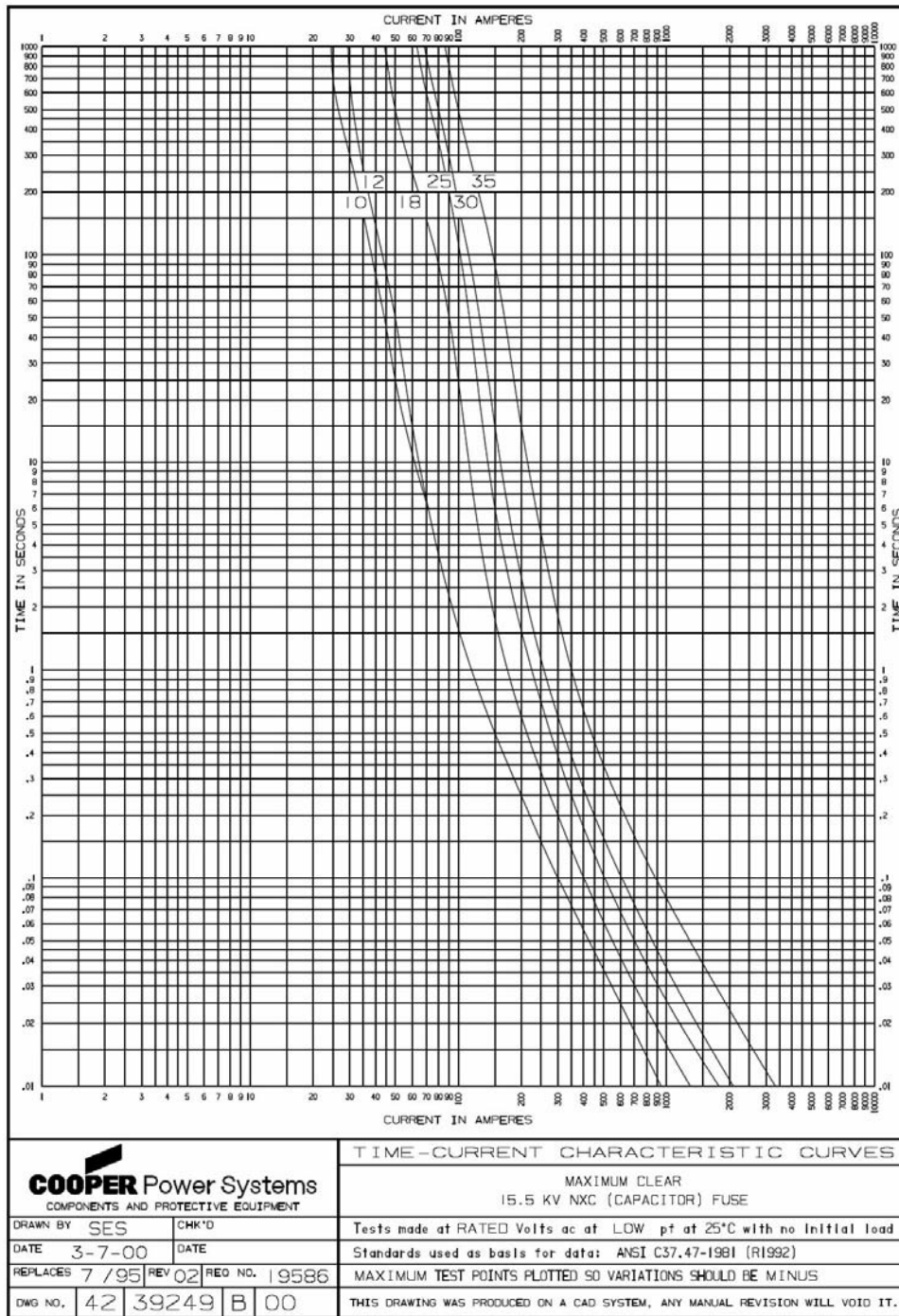


Figura A.2.- Curvas características tiempo-corriente, de fusión mínima, para fusibles de potencia tipo expulsión (imagen tomada de la página de internet: www.cooperpower.com)

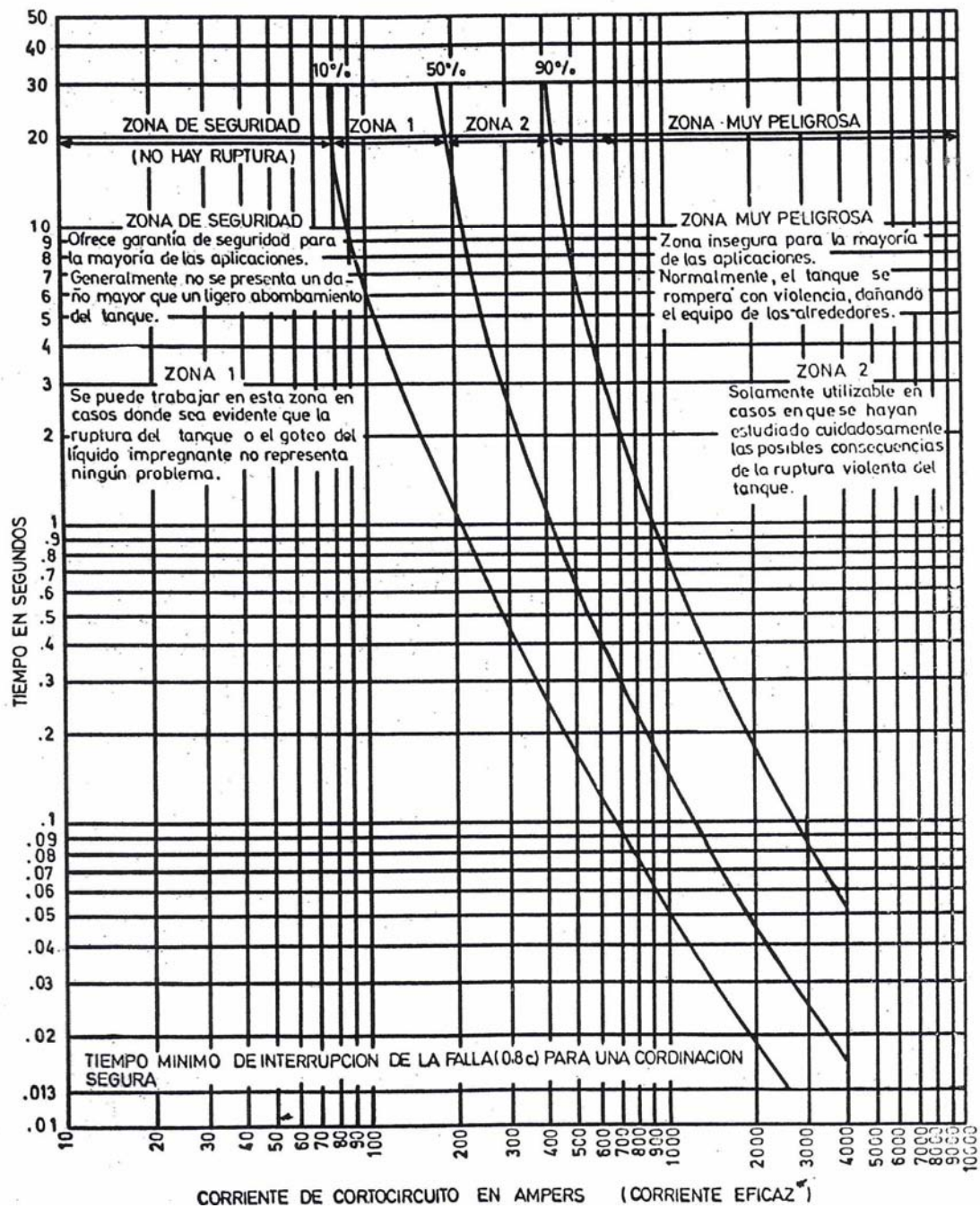


Figura A.1.- Curvas de probabilidad de ruptura del tanque de un capacitor de 150 KVAR, en condiciones de un cortocircuito interno (imagen tomada del libro: Capacitores de potencia del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

En resumen, para seleccionar el fusible, es necesario determinar los parámetros siguientes:

1.- Corriente nominal del fusible

$$I_{NFUS} = (I_{NCU} \times 2) / 1.5$$

Donde:

I_{NCU} Es la corriente nominal del capacitor

Nota: El divisor 1.5, debe a que los fusibles de potencia tipo expulsión pueden conducir hasta 1.5 veces el valor de su corriente nominal. Sin embargo, este dato se debe comprobar en la hoja de datos del fusible.

2.- Corriente de fallo simétrica: I_{CCSIM} , que se genera por el fallo del capacitor protegido

Con esta corriente, es posible comprobar que:

- a) La combinación corriente de fallo y el tiempo de fusión del fusible, se encuentre en un punto dentro de la zona de seguridad en las curvas de ruptura del tanque del capacitor.
- b) La capacidad interruptiva del fusible, proporcionada por el fabricante, sea de un valor igual o mayor a la corriente de fallo I_{CCSIM} , esto es con objeto de asegurar que el listón alcance su punto de fusión, sin que los componentes del fusible sufran daños destructivos por el paso de dicha corriente.

3.- Energía almacenada: J (Joules), en los capacitores conectados en paralelo por fase

$$J = (1/2) \times C_n \times V^2$$

Siendo C la capacidad total del los capacitores instalados en paralelo y V el voltaje nominal de los capacitores multiplicado por $\sqrt{2}$ y por 1.1 (este ultimo factor prevé que en el momento del fallo, los capacitores puedan estar operando al limite máximo de tolerancia de voltaje).

Una vez determinadas las características eléctricas que debe reunir el fusible, se procede a seleccionar un fusible de fabricación comercial, que cumpla con dichas características. Para esto es necesario recurrir a las hojas de datos proporcionadas por el fabricante.

Los fusibles tipo NEMA K, usualmente se fabrican para niveles de voltaje a partir de los 2.4 kV hasta los 23 kV, aunque hay fabricantes que proporcionan fusibles para voltajes mayores (hasta 36 kV). Mientras que los valores nominales de los listones fusible, más usuales son los siguientes: 6K, 8K, 10K, 12K, 15K, 20K, 25K, 30K, 40K, 50K, 65K, 80K y 100 K, donde la letra K indica que es un fusibles de expulsión tipo NEMA K.

ANEXO B

SOBREVOLTAJE EN LOS CAPACITORES DE UNA SECCIÓN DE FILTRADO CONECTADA EN ESTRELLA CON NEUTRO FLOTANTE Y LA CORRIENTE DEL NEUTRO, QUE PROVOCA LA FALLA DE UNO O MAS DE SUS CAPACITORES UNITARIOS.

Los parámetros eléctricos que definen el funcionamiento del equipo de protección por desbalance del neutro, son el voltaje que se produce en los capacitores conectados en paralelo a la unidad fallada, así como la corriente que se produce entre los neutros de la sección de filtrado, la cual como se ha mencionado en el inciso 3.1.2.6, debe ser dividida en dos estrellas conectadas en paralelo con los neutros flotantes unidos entre si.

En la figura B.1 se representa una carga trifásica desbalanceada, conectada en estrella con el neutro unido al neutro de la línea a través de una cierta impedancia. Y_1 , Y_2 y Y_3 representan las admitancias de cada una de las fases de la carga e Y_0 , la admitancia entre los neutros del generador y de la carga. En realidad Y_0 puede representar la admitancia entre el neutro de la carga y tierra. El generador que alimenta esta carga está representado por tres bobinas conectadas en estrella, \bar{I}_1 , \bar{I}_2 e \bar{I}_3 , representan las corrientes que toma cada una de las fases de la carga e I_0 , la corriente que toma el neutro.

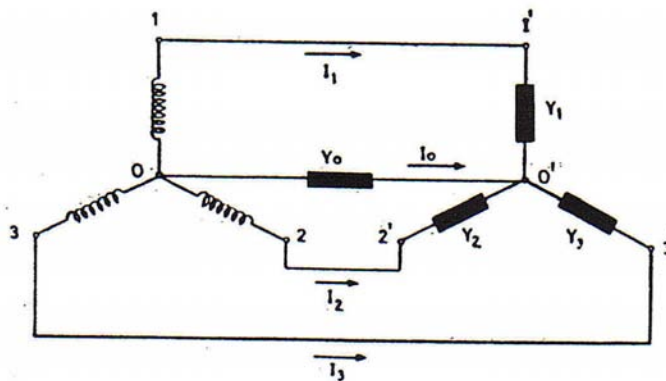


Figura B.1.- Carga trifásica, en estrella con neutro conectado al neutro de la línea a través de una impedancia (imagen tomada del libro: Capacitores de potencia, Dr. Alfredo Navarro Crespo)

En la figura B.2 se representan por \bar{V}_{o1} , \bar{V}_{o2} y \bar{V}_{o3} los voltajes de fase a neutro producidos en el generador y por \bar{V}_{c1} , \bar{V}_{c2} y \bar{V}_{c3} , las caídas de voltaje resultantes en cada fase de la carga. V_o representa el desplazamiento del neutro, anteriormente mencionado.

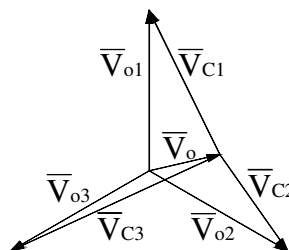


Figura B.2.- Desplazamiento eléctrico del neutro V_o , originado en la carga por falta de simetría (imagen tomada del libro: Capacitores de potencia, del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

Aplicando la ley de corrientes de Kirchoff al nudo O' de la carga (figura B.1) y suponiendo que, en general, se trata de un sistema de n fases, resulta que el desplazamiento del neutro viene dado por la expresión:

$$\bar{V}_o = \frac{\sum_1^n \bar{V}_{oi} Y_i}{Y_o + \sum_1^n Y_i} \quad [1]$$

En el caso particular de que la carga que acabamos de describir, represente una sección conectada en estrella, se deduce de la expresión [1] que solo se pueden producir desplazamientos del neutro cuando éste se deja flotante: $Y_0 = 0$. En la alternativa de neutro conectado a tierra $Y_0 = \infty$, el desplazamiento del neutro resulta nulo. En éste último caso, así como en el caso de la conexión en delta, solamente pueden originarse desbalances de voltaje si se efectúan conexiones serie-paralelo con los capacitores de cada fase.

En la figura B.3 se representa una sección de filtrado conectada en estrella con neutro flotante, formada por M unidades conectadas en paralelo por cada fase. En la figura se muestra también el desplazamiento del neutro \bar{V}_0 que se produce en esta sección cuando fallan N capacitores de la fase 1.

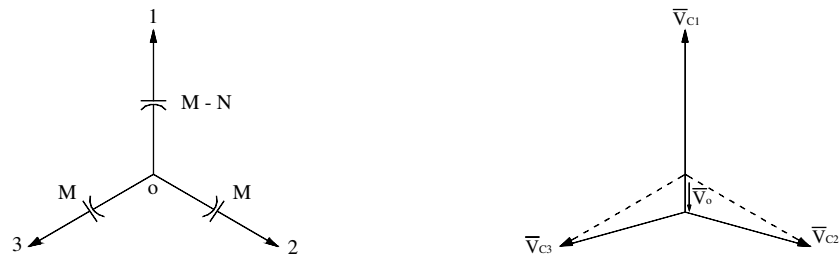


Figura B.3.- Desplazamiento del neutro \bar{V}_0 , en una sección de filtrado conectada en estrella con neutro flotante, formada por M unidades en paralelo por fase y habiendo fallado N unidades en la fase 1 (imagen tomada del libro: Capacitores de potencia, del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

De la expresión [1] se deduce que:

$$\bar{V}_0 = -\bar{V}_{o1} \frac{N}{3M - N}$$

Es decir, el desplazamiento del neutro se efectúa en la misma dirección y sentido contrario al del voltaje \bar{V}_0 , que existía en la fase 1, antes de que fallaran los capacitores. Por consiguiente, dicho desplazamiento se traduce íntegramente en un sobrevoltaje en los capacitores restantes en la fase 1, tal como se indica en la figura B.3.

Llamando S a este sobrevoltaje, expresado en tanto por uno respecto al voltaje nominal de los capacitores:

$$S = \frac{|\bar{V}_0|}{|\bar{V}_0|}$$

Resulta:
$$S = \frac{N}{3M - N} \quad [2]$$

De la expresión [2] se deduce que en un tipo de sección de filtrado tan usual en la práctica como es la sección descrita anteriormente (conexión estrella con neutro flotante y una sola fila de capacitores en paralelo por fase), el tamaño mínimo de la sección para el que es factible proteger individualmente los capacitores es el de 4 capacitores por fase. Si se protegiese individualmente un banco de capacitores formado con tres capacitores por fase, en caso de fallar un capacitor se produciría un sobrevoltaje:

$$S = \frac{1}{9 - 1} = 0.125 \equiv 12.5\%$$

que pondría en peligro a los dos capacitores restantes en la fase donde ocurriese el fallo.

Las tablas B.1y B.2proporcionan, para el caso más general de bancos de capacitores conectados en estrella con fases formadas por varias filas de capacitores en serie, las corrientes de fallo de un capacitor y el sobrevoltaje producido por el fallo y desconexión de un capacitor, en bancos que cuentan con el número mínimo de unidades con que todavía es factible la protección individual. La tabla B.1 se refiere a bancos conectados en estrella, con neutro flotante y la tabla B.2 se refiere a bancos conectados en estrella, con neutro a tierra.

Tabla B.1.- Corriente de fallo y sobrevoltaje producidos por el fallo y desconexión de un capacitor unitario (tabla tomada del libro: Capacitores de potencia del Dr. Alfredo Navarro Crespo)

Número de filas en serie	Número mínimo de unidades en cada fila	Corriente de fallo de un capacitor, en veces la normal	Sobrevoltaje ocasionado por la desconexión de un capacitor, en tanto por ciento
1	4	12.0	9
2	8	12.0	9
3	9	11.6	9.5
4	9	10.8	10
5	10	11.5	10
6	10	11.2	10
7	10	11.0	10
8	10	10.9	10
9	11	11.9	Menos que 10
10	11	11.8	Menos que 10
11	11	11.7	Menos que 10
12	11	11.6	Menos que 10
13	11	11.6	Menos que 10
14	11	11.5	Menos que 10
15	11	11.5	Menos que 10
16	11	11.5	Menos que 10

Tabla B.2.- Corriente de fallo de un capacitor y sobrevoltaje producido por el fallo y desconexión de una unidad, en un banco de capacitores conectado en estrella con neutro a tierra, con varias filas de capacitores en serie por fase.

Número de filas en serie	Número mínimo de unidades en cada fila	Corriente de fallo de un capacitor, en veces la normal	Sobrevoltaje ocasionado por la desconexión de un capacitor, en tanto por ciento
1	1	Corto a fase de tierra	Nulo
2	6	12	9
3	8	12	9
4	9	12	9
5	9	11.2	9.8
6	9	10.8	10.0
7	10	11.7	9.4
8	10	11.4	9.5
9	10	11.2	Menos que 10
10	10	11.1	Menos que 10
11	10	11.0	Menos que 10
12	10	10.9	Menos que 10
13	10	10.8	Menos que 10
14	11	11.8	Menos que 10
15	11	11.8	Menos que 10
16	11	11.7	Menos que 10

Para una sección de filtrado cuyo arreglo de capacitores esta dividido en dos estrellas con neutro flotante, tal como la que se muestra en la figura B.4, el desbalanceo entre ambas estrellas produce un flujo de corriente I_0 entre los neutros O y O' de las mismas que, como vamos a ver, es posible relacionar con el sobrevoltaje S (en tanto por uno) a que quedan sometidos los capacitores de las fases. Se supone que la sección original, que se muestra en la figura B.4, consta de M capacitores por fase, conectados en paralelo entre si y que ha sido dividida en dos estrellas M/2 capacitores por fase, cuyos neutros respectivos, O y O', se unen entre si por medio de un cable de impedancia despreciable. Se

supone también que en la fase 1' han fallado N unidades, que han salido de operación al actuar sus fusibles individuales. Esto origina un desplazamiento eléctrico del neutro común O-O' y, según la expresión [1], un sobrevoltaje en los capacitores restantes en las fases 1 y 1'. Se trata de proteger estos capacitores de dicho sobrevoltaje, por medio del relevador de corriente A.

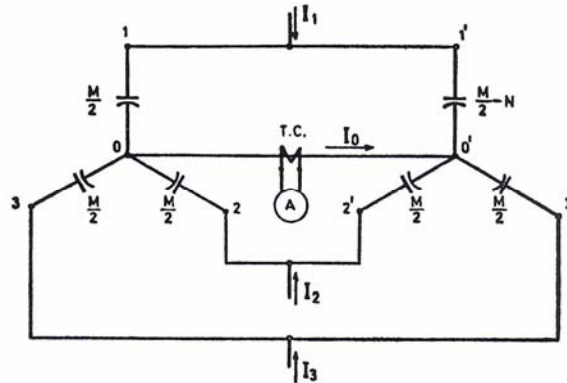


Figura B.4.- Sección de filtrado, dividido en dos estrellas con neutro flotante y protegido por desbalanceo, por medio de un relevador de corriente (figura tomada del libro: Capacitores de potencia, del Dr. Alfredo Navarro Crespo).

Conociendo la relación \bar{I}_0 y S, es posible calibrar el relevador A, de forma que origine una señal de apertura en el momento en que el sobrevoltaje alcance valores críticos. La figura B.5 representa el diagrama de corrientes que fluyen por el arreglo de capacitores, una vez que se ha producido el fallo y la desconexión de las N unidades en la fase 1'.

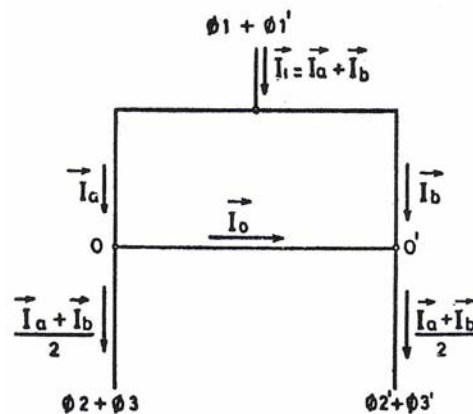


Figura B.5.- Diagrama de flujo de corrientes en la sección de filtrado desbalanceada de la figura B.4

La corriente \bar{I}_1 se divide entre las dos fases 1 y 1', proporcionalmente a sus admitancias. \bar{I}_a representa la corriente que toma la fase 1 e \bar{I}_b representa la corriente que toma la fase 1'. Por simetría, la corriente total que toman las fases 2 y 3, debe ser idéntica a la corriente total que toman las fases 2' y 3'.

La suma de estas corrientes debe ser, a su vez, igual y de sentido contrario a la corriente total \bar{I} que toman las fases 1 y 1', tal como se representa en la figura. Aplicando la ley de corrientes de Kirchoff a cualquiera de los nudos O u O', se obtiene:

$$\bar{I}_o = \frac{\bar{I}_a - \bar{I}_b}{2}$$

Deducción de la expresión de I_a :

Puesto que la caída de voltaje que produce el flujo de corriente I_a es prácticamente igual a la caída de voltaje de la fase V_{10} , se tiene que:

$$\bar{V}_a = \bar{I}_a Z_a = \bar{V}_{10} = \bar{I}_1 Z_1$$

Reagrupando parámetros

$$\frac{\bar{I}_a}{\bar{I}_1} = \frac{Z_1}{Z_a} \quad [3]$$

Donde:

Z_1 Es la impedancia de toda la fase

Z_a Es la impedancia de la fase correspondiente a la estrella con capacitores sanos

La impedancia de la fase esta dada por:

$$Z_1 = \frac{Z_c}{M-N}$$

La impedancia de la fase correspondiente a la estrella con capacitores sanos:

$$Z_a = \frac{Z_c}{\frac{M}{2}}$$

Donde:

Z_c Es la impedancia de un capacitor unitario

$M-N$ Es la cantidad de capacitores sanos que quedan en la fase, despues de fallar N capacitores

Sustituyendo Z_1 y Z_a en [3] y despejando \bar{I}_a :

$$\bar{I}_a = \frac{\frac{M}{2}}{M-N} \times \bar{I}_1$$

Deducción de la expresión de I_b :

Puesto que la caída de voltaje que produce el flujo de corriente I_b es prácticamente igual a la caída de voltaje de la fase V_{10} , se tiene que:

$$\bar{V}_b = \bar{I}_b Z_b = \bar{V}_{10} = \bar{I}_1 Z_1$$

Reagrupando parámetros

$$\frac{\bar{I}_b}{\bar{I}_1} = \frac{Z_1}{Z_b} \quad [5]$$

Donde:

Z_1 Es la impedancia de toda la fase

Z_b Es la impedancia de la fase correspondiente a la estrella donde ha fallado N cantidad de capacitores

La impedancia de la fase esta dada por:

$$Z_1 = \frac{Z_c}{M-N}$$

La impedancia de la fase correspondiente a la estrella con N capacitores fallados:

$$Z_b = \frac{Z_c}{\frac{M}{2} - N}$$

Donde:

Z_c Es la impedancia de un capacitor unitario

$M-N$ Es la cantidad de capacitores sanos que quedan en la fase, despues de fallar N capacitores

Sustituyendo Z_1 y Z_b en la expresión [5] y despejando \bar{I}_b :

$$\bar{I}_b = \frac{\frac{M}{2} - N}{M-N} \bar{I}_1$$

Sustituyendo I_a e I_b en la expresión [3]

$$\bar{I}_o = \frac{\bar{I}_1}{2} \frac{N}{M-N} \quad [6]$$

La corriente I_1 correspondiente a la fase donde han fallado N capcitores

$$\bar{I}_1 = \frac{V_N (1 + S)}{\frac{Z_c}{M-N}} = 3 \frac{V_N}{Z_c} M \frac{M-N}{3M-N} \quad [7]$$

La corriente nominal de cada fase de la sección antes de que fallara ninguna unidad

$$I_N = \frac{V_N}{\frac{Z_c}{M}} = \frac{V_N}{Z_c} M \quad [8]$$

Relacionando el módulo de I_1 con el módulo de I_N :

$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_N} = 3 \frac{M - N}{3M - N}$$

Despejando I_1

$$\bar{I}_1 = 3\bar{I}_N \frac{M - N}{3M - N}$$

Sustituyendo I_1 en la expresión [6], resulta:

$$\bar{I}_0 = \frac{3}{2} I_N \frac{N}{M - N} \quad [9]$$

Sustituyendo la ecuación [2] en la expresión anterior, resulta finalmente:

$$\bar{I}_0 = \frac{3}{2} I_N S \quad [10]$$

Aplicando la ecuación anterior, se puede determinar la corriente de desbalance del neutro para diferentes sobrevoltajes: S . Para fines prácticos, se desea conocer el valor de la corrientes \bar{I}_0 , que corresponde a un sobrevoltaje $S = 10\%$, que expresado en tanto por uno $S = 0.10$.

Una vez deducida la expresión [10], en seguida se muestra, de manera simplificada el proceso a seguir para determinar las características eléctricas del equipo de protección por desbalance del neutro.

a) Sobrevoltaje: S , en función de la cantidad de capacitores fallados

$$|I_0| = \frac{3}{2} S \cdot |I_N|$$

Donde:

I_N Es la corriente nominal por fase de la sección si capacitores unitarios fallados (para el filtro que se diseña en el capítulo IV, $I_N = I_{Fn1}$)

Para mostrar, el incremento de voltaje en función del número de capacitores fallados, se elabora la siguiente tabla, aplicando la ecuación de \bar{I}_0 :

M (Piezas)	N (Piezas)	S (en tanto por 1)
M	1	S^1
	2	S^2
	3	S^3

De acuerdo a la tabla, para $S^1, S^2, \dots, S^n < 0.10$, la corriente de disparo del relevador: I_{DREL} debe ser mayor que la corriente I_o provocada por S^1, S^2, \dots, S^n (corregida según la relación de transformación del TC), ya que en caso contrario la sección saldrá de operación al presentarse un sobrevoltaje menor del 10%.

b) Corriente I_o provocada por un sobrevoltaje critico $S = 0.10$

$$|I_o| = \frac{3}{2} S \cdot |I_N|$$

c) Corriente de disparo del relevador de desbalance del neutro: 60N, corregida según la relación del T.C.

$$I_{DIS.60N} = I_o / R_{TRANSF}$$

Donde:

R_{TRANS} Relación de transformación del T.C, comercial más próximo, es decir, cuya corriente nominal en su lado primario: I_p , sea de un valor cercano (inmediato superior) a la corriente I_o . O sea $R_{TRANSF} = I_p / 5$

ANEXO C

**FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRAN EL PROCESO DE CONSTRUCCION DEL
FILTRO DE ABSORCION DE CORRIENTES ARMÓNICAS DE 14,404 KVAR,
13.8 KV, 3F, 60 Hz, OBJETO DE DISEÑO EN LA PRESENTE TESIS**

Las fotografías que se muestran a continuación, muestran las siguientes actividades:

- a) Limpieza y nivelado del terreno donde se localizara el filtro
- b) Mediciones y trazado del terreno
- c) Construcción de cimentaciones
- d) Montaje de capacitores y desconectores
- e) Montaje de reactores
- f) Instalación de cables de señalización
- g) Montaje del interruptor general y del tablero de control
- h) Filtro completo

a) Limpieza y nivelado del terreno



Figura C.1.- Extracción de cimentaciones correspondientes a un banco de capacitores, previamente removido. Los dos postes que se observan en la fotografía también fueron extraídos, mientras que el árbol fue transplantado.



Figura C.2.- Extracción de tierra para nivelar y compactar el terreno. Así también, continúan los trabajos descritos en la figura anterior.



Figura C.3.- Zanja para la instalación del sistema de tierra física (se cavaron zangas en todo el perímetro de terreno, designado para la instalación del filtro)

b) Mediciones y trazado del terreno



Figura C.4.- Trazo de los perímetros de las cimentaciones de los componentes del filtro (se utiliza cal)



Figura C.5.- Continúa el trazado de los perímetros de las cimentaciones, se observa que uno de los postes ha sido extraído

c) Construcción de cimentaciones



Figura C.6.- Proceso de construcción de una de las tres cimentaciones de los Rack (arreglos) de capacitores. La capa de cemento que se observa, es una primera capa que sirve para aislar otras capas de la cimentación con la tierra.



Figura C.7.- Continuación de los trabajos para la construcción de las cimentaciones



Figura C.8.- Autor de la presente tesis en el área de trabajo



Figura C.9.- Cimentaciones de una sección de filtrado, terminadas

d) Montaje de capacitores y desconectores



Figura C.10.- Autor de la presente tesis junto con los desconectores de dos secciones de filtrado



Figura C.11.- Racks (arreglos) de capacitores de las tres secciones de filtrado y desconectores de dos secciones de filtrado



Figura C.12.- Racks de capacitores y desconectores del filtro



Figura C.13.- Autor de la presente tesis en la parte frontal de un desconector. Para fines prácticos, se puede decir que la parte frontal del filtro, es la parte frontal de los desconectores. Los cables color rojo conectan a los desconectores con el interruptor general, mismo que se localiza en el interior del cuarto que se observa al fondo.



Figura C.14.- Caja de control de uno de un desconetadores cuyos cables de señalización se conectan al tablero de control. La zanja que se observa, es para colocar la canalización de dichos cables.



Figura C.15.- Vista izquierda del filtro (sin reactores núcleo de aire), se observa que el terreno a sido acondicionado con grava y que las cimentaciones han sido pintadas (se utilizo pintura para uso intemperie, sin ingredientes metálicos).



Figura C.16.- Montaje de los desconectadores terminado. Los conductores (cables color rojo) de cada sección de filtrado, se introducen a la trinchera (ducto rectangular con tapas metálicas) para ser conectados al interruptor general, localizado en el interior del cuarto del fondo.

e) Montaje de reactores



Figura C.17.- Autor de la presente tesis junto con los reactores núcleo de aire del filtro, durante el proceso desembalaje de los mismos.



Figura C.18.- Reactores núcleo de aire



Figura C.19.- Vista posterior de los racks de capacitores, desconectadores (las cajas de madera que contienen componentes de los soportes de los reactores)



Figura C.20.- Autor de la presente tesis en la parte superior de un reactor núcleo de aire, durante la instalación del mismo



Figura C.21.- Montaje de los reactores núcleo de aires y racks de capacitores, terminados

f) Instalación de cables de señalización



Figura C.22.- Instalación de las canalizaciones para los cables de señalización de transformadores de corriente y dispositivos de accionamiento de las cuchillas de puesta a tierra

g) Montaje del interruptor general y del tablero de control



Figura C.23.- Cuartos localizados al lado lateral izquierdo del filtro (en el cuarto de menor altura es donde se localiza el tablero de control y el interruptor general)



Figura C.24.- Instalación del tablero de control (izquierda) y del interruptor general (derecha)



Figura C.25.- Tablero de control



Figura C.26.- Interruptor general



Figura C.27.- Filtro y tablero de control. Los cables que se observan en la parte superior del interruptor general (esquina superior derecha), conectan al filtro en su conjunto con el sistema eléctrico del horno (ver figura 4.14, del capítulo IV). Los cables que conectan a las secciones de filtrado (ver figura C.16), con el interruptor, llegan a éste en una canalización subterránea

h) Filtro completo



Figura C.28.- Filtro completamente ensamblado, se observa la parte posterior del filtro, ya que su parte frontal apunta hacia la pared. Para fines prácticos, la parte frontal del filtro es el punto de conexión de los cables color rojo que se muestran en la figura C.16.



Figura C.29.- Filtro completamente ensamblado, también muestra la parte posterior del filtro como se puede ver la toma de la fotografía es mas centrada.



Figura C.30.- Filtro completamente ensamblado, como puede verse la toma de la fotografía se hizo con cierta altitud en un punto cercano a la esquina izquierda del filtro, como ya se ha mencionado, la parte frontal del filtro apunta hacia la pared.



Figura C.31.- Autor de la presente tesis, junto al filtro, la toma de la fotografía se hizo desde el lado derecho del filtro



Figura C.32.- Filtro de absorción y autor de la presente tesis

BIBLIOGRAFIA

Libros:

- Capacitores de potencia
Dr. Ing. Alfredo Navarro Crespo
- Corrientes armónicas
Dr. Ing. Alfredo Navarro Crespo
- Calidad de la energía eléctrica
Dr. Ing. Alfredo Navarro Crespo
- Diccionario enciclopédico de la metalurgia
Editores Técnicos Asociados, S.A.
Maignón, 26-Barcelona (12) – España
1969
- El condensador ep 31
Heinz Paeg
Siemens Aktiengesellschaft, Berlín Munich & Marcombo, S.A.
- Electrodo de grafito y el horno de arco
UNION CARBIDE
Unión Carbide Mexicana, S.A de C.V
División de productos de carbón
- The art and science of protective relaying
C. Russell Mason
Engineering Planning and Development Section General Electric Company
Schenectady, N.Y.
John Wiley & Sons, inc
- Fabricación de hierro, aceros y fundiciones
Tomo II
Fabricación de acero
José Apraiz Barreiro
Urmo, S.A de Ediciones
Primera edición en español, 1978
- Hornos para fundir metales y sus aleaciones
José Maria de la Poza Lleida
Editorial
Oikos-tau

- Power Systems Harmonics
Fundamentals, Analysis and Filter Design
George J. Wakileh
Editorial: Springer
- Protección de sistemas de potencia e interruptores
B. Ravindranath
M. Chander
Malaviga Regional Engineering
Collage Jaipur
Noriega editores
Editorial: Limusa

Artículos:

- Capacitor Fuses
Boletín TD 38 852 -1/99
ABB Power T & D Company Inc
- Capacitor Expulsion Fuse
Boletín 240-37
Cooper Power Systems
McGraw-Edison® is trademark of Cooper Power Industries, Inc.
- Commentary Undertandig Electric Arc Furnace Operations
Boletín: TechCommentary/TC-107714 6
Published By The EPRI Center for materials Production
Dr. Jeremy Jones, Consultant.
1997 Electric Power Research Institute, Inc.
- Increased productivity with Larger Static VAR Compensator
Reprinted from
AISE 1997 Annual Convention
Sept. 29–Oct. 2, 1997
Cleveland, Ohio
Authors:
Dieter Fink
Dr. Wolfgang Hörger
Dean Di Lillo
Siemens Aktiengesellschaft
Printed in Germany

- Steel plant performance, power Supply system design and power Quality aspects
Draft Paper abstract - 54th Electric Furnace Conference - Dec. 96.
Boletin 96.11.08

Power Quality leads to improved production and costs savings

Antonio Silva

ABB Power T&D Company Inc.

Raleigh NC

Lars Hultqvist and Aleksander Wilk-Wilczynski

ABB Power Systems AB

Västerås Sweden