

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**TECNICAS DE ATENUACION DE PERTURBACIONES CON  
FILTROS DESINTONIZADOS EN INSTALACIONES  
INDUSTRIALES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**EDWARD GENARO ZEGARRA HUAMÁN**

**PROMOCIÓN  
2003 - I**

**LIMA – PERÚ  
2006**

**TECNICAS DE ATENUACION DE PERTURBACIONES CON  
FILTROS DESINTONIZADOS EN INSTALACIONES  
INDUSTRIALES**

*A CADA UNA DE LAS PERSONAS  
QUE BUSCAMOS SER MEJORES HUMANOS CADA DIA,  
A MIS PADRES Y ESPOSA QUE SIEMPRE ESTAN CONMIGO.*

## **SUMARIO**

El presente informe trata de mostrar los diferentes factores y elementos que se tiene en consideración en el análisis de armónicas y el corrección del factor de potencia en sistemas industriales, se analiza cada elemento que compone los bancos automáticos con filtros desintonizados y se concluye en una evaluación de valores de distorsión armónica de tensión y corriente.

En el Capítulo I, se describen los métodos de corrección del factor de potencia y equipos de compensación de energía reactiva. En el Capítulo II se describen el origen de los armónicos y normas para límites de armónicos y la distorsión armónica en redes industriales. En el Capítulo III, se hace un análisis de la distorsión armónica como la compatibilidad electromagnética. En el Capítulo IV, se describen los efectos perjudiciales de los armónicos en los diferentes equipos que forma parte de la red de energía. En el Capítulo V, se describen las características del fenómeno de la resonancia serie y paralelo, su ocurrencia y análisis en los sistemas eléctricos. En el Capítulo VI, se describen soluciones a la atenuación de los armónicos, analizando el diseño de los elementos de los filtros desintonizados.

En el Capítulo VII, se muestra un proyecto de mejoramiento del factor de potencia. Adjuntando las consideraciones que se debe de tener en el análisis de THD y su evaluación para determinar el factor de desintonía del banco automático con filtros de rechazo.

## INDICE

<b>PRÓLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>COMPENSACION DE ENERGIA REACTIVA</b>	2
1.1 Introducción	2
1.2 Corrección Del Factor De Potencia (CFP)	2
1.2.1 Bases de la Corrección del Factor de Potencia	2
1.2.2 Métodos de la Corrección Del Factor De Potencia (CFP)	5
a) Compensación Individual (fija)	6
b) Compensación en Grupo	7
c) Compensación Centralizada	8
d) Compensación Dinámica	9
e) Filtro Activo de Armónicos	10
1.3 Equipos de compensación	11
1.3.1 Controlador Para Corrección Del Factor De Potencia	12
1.3.2 Capacitores	15
a) Expectativa de Vida Nominal	16
1.3.3 El Reactor	18
1.3.4 Contactor	19
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS</b>	23
2.1 Cargas Lineales	24
2.2 Cargas No Lineales	25
2.2.1 Electrónica de Potencia	25
2.2.2 Aparatos ferromagnéticos	26
2.2.3 Aparatos de arco	26
2.3 Normas para los límites de armónicos	28
2.3.1 Límites de armónicos para los receptores industriales	30
<b>CAPITULO III</b>	
<b>ANÁLISIS DE ARMÓNICOS</b>	37
3.1 Instrumentos de medida	37
3.2 Distorsión de armónicos	38
3.3 Compatibilidad Electromagnética:	41

**CAPÍTULO IV****EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS**

42

4.1	Disparo de interruptores y fusibles	43
4.2	Sobrecarga de Transformadores	43
4.3	Sobrecarga de Condensadores	44
4.4	Pérdidas en equipos de distribución	44
4.5	Excesiva corriente de Neutro	45
4.6	Mal funcionamiento de controles electrónicos y computadoras	46
4.7	Errores en sistemas de medición.	46

**CAPITULO V****RESONANCIA**

47

5.1	Resonancia Serie	47
5.1.1	Como ocurre la resonancia serie en sistemas de potencia.	48
5.2	Resonancia Paralelo	48
5.2.1	Como ocurre la resonancia paralelo en sistemas de potencia.	53

**CAPITULO VI****SOLUCIONES**

55

6.1	Circuitos de filtro	55
6.2	Filtros desintonizados	57
6.3	Absorción armónica	60
6.4	Cálculo de bancos de capacitores desintonizados	60
6.5	Cálculo del aumento de la tensión por el reactor serie.	60
6.5.1	Cálculo de la potencia requerida del capacitor.	60
6.5.2	Cálculo de la inductancia del reactor	61
6.6	Dimensionamiento del reactor del circuito de filtro.	61
6.6.1	ILIN Límite de la linealidad del núcleo	61
6.6.2	ITérmica	62
6.7	Clase de temperatura, pérdidas, costos de energía.	62
6.7.1	Carga armónica.	62
6.8	Que es el factor de desintonía.	63
6.9	Selección del factor de desintonía.	63
6.10	Protección de bancos de capacitores y otros equipos de la resonancia.	64
6.11	Instalación de bancos de capacitores desintonizados	64

**CAPÍTULO VII****PROYECTO DE COMPENSACIÓN ÓPTIMA DE ENERGIA REACTIVA**

68

## VIII

7.1 Medición y evaluación	68
7.2 Frecuencia de resonancia $f_R$	69
<b>CONCLUSIONES</b>	79
<b>ANEXO A</b>	
Consideraciones para CFP de alto rendimiento	81
<b>ANEXO B</b>	
Diagrama unifilar del sistema eléctrico evaluado y punto de medición	84
Plano mecánico del banco de condensadores con filtros desintonizados	85
<b>ANEXO C</b>	
Ficha para realización de un pre estudio de armónicos	87
<b>ANEXO B</b>	
Grafico de costo relativo de técnicas de reducción de armónicos	89
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	91

## PRÓLOGO

La energía eléctrica se distribuye generalmente en forma de tres tensiones que constituyen un sistema trifásico sinusoidal. Uno de los parámetros del sistema es la forma de onda, que debe ser lo más próxima a una senoide. Es necesario corregir esta forma de onda, si su deformación sobrepasa ciertos límites, frecuentemente alcanzados en las redes que tienen fuentes de perturbaciones armónicas, como son: hornos de arco, convertidores estáticos de potencia, y ciertos tipos de alumbrado, etc.

Las intensidades y tensiones de armónicos se crean a partir de cargas no lineales conectadas al sistema de distribución de potencia.

La distorsión por armónicos es una forma de contaminación en las plantas eléctricas que pueden provocar problemas si la suma de las intensidades de armónicos supera ciertos límites.

Para mejorar la calidad del «producto eléctrico» y evitar las fallas de funcionamiento y hasta la destrucción de componentes de las redes eléctricas y/o de los componentes sensibles, es imprescindible comprender el origen de las perturbaciones y valorar sus riesgos.

Todos los convertidores electrónicos de potencia empleados en distintos tipos de sistemas electrónicos pueden aumentar las perturbaciones introduciendo intensidades de armónicos directamente hacia la red.

La tecnología a usar acorde al análisis del costo-beneficio de las diferentes soluciones a aplicar ante la energía reactiva.

Con este fin, el presente documento pretende ser una contribución para un mejor conocimiento de problemas de resonancia por armónicos de sus causas, y de las soluciones más comúnmente utilizadas para presentar la teoría básica y respuestas en el diseño de bancos automáticos de condensadores con filtros de rechazo.

# CAPÍTULO I

## COMPENSACION DE ENERGIA REACTIVA

### 1.1 Introducción

La utilización de equipos que incorporan “convertidores electrónicos de potencia”, ha dado lugar a un tipo de consumo en las redes, donde las ondas se apartan notablemente de la forma senoidal. Los receptores, tanto domésticos como industriales incorporan cada vez más convertidores electrónicos (rectificadores, onduladores, etc.). Éstos toman energía de la red en forma de corriente alterna pero para su uso la convierten en corriente continua. En este proceso, la forma de onda de la corriente que consumen resulta alterada, de forma que ya no es una onda senoidal, sino una superposición de ondas senoidales con frecuencias múltiplos pares e impares de la frecuencia de red.

En este capítulo se muestra los diferentes métodos de compensación de energía reactiva en los sistemas eléctricos y algunas consideraciones de ventajas y desventajas de cada uno respectivamente. También se incluye las características técnicas importantes de los elementos de los banco de condensadores con filtro desintonizados ha tener en el momento del diseño.

### 1.2 Corrección Del Factor De Potencia (CFP)

#### 1.2.1 Bases de la Corrección del Factor de Potencia

**Potencia Reactiva.**- Las máquinas eléctricas trabajan basadas en el principio de conversión de energía electromagnética (por ej. motores eléctricos, transformadores). Una parte de la energía de entrada se consume para crear y mantener el campo magnético. Esta parte de la energía de entrada no puede ser convertida en energía activa y es retornada a la red eléctrica al removerse el campo magnético. Esta potencia se conoce como Potencia “Reactiva” Q, y se define como:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{VAR}] \dots \dots \dots (1.1)$$

**Potencia Aparente.-** Las aplicaciones de los equipos eléctricos se basan en la conversión de la energía eléctrica en alguna otra forma de energía. La potencia eléctrica tomada por un equipo desde el suministro se denomina Potencia Aparente, y consiste de potencia activa y reactiva y se define como:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{VA}] \dots \dots \dots (1.2)$$

Que es necesaria para la producción de campos magnéticos requeridos para la operación de muchos equipos como transformadores, motores de inducción, válvulas solenoides, relevadores etc.

**Factor de potencia y  $\cos \varphi_1$ .-** Según la CEI, el factor de potencia es el cociente entre la potencia activa P y la potencia aparente S:

$$PF = \frac{P}{S} \dots \dots \dots (1.3)$$

Este factor de potencia no debe confundirse con el factor de desfase ( $\cos \varphi_1$ ) que representa el coseno del ángulo formado por los fasores de los componentes fundamentales de la tensión y de la corriente:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \dots \dots \dots (1.4)$$

Donde:

$P_1$  = potencia activa de la componente fundamental y

$S_1$  = potencia aparente de la componente fundamental

Por tanto, el  $\cos \varphi$  se asocia únicamente a la frecuencia fundamental, en presencia de armónicos, es diferente del factor de potencia PF.

**Principio teórico.-** Instalar un condensador generador de energía reactiva es la manera más simple, flexible y rápidamente amortizada de asegurar un buen factor de potencia. Esto se llama compensar una instalación.

En la Fig. 1.1 ilustra el principio de compensación de la potencia reactiva  $Q_1$  de una instalación a un valor más bajo  $Q_2$  mediante la instalación de una batería de condensadores de potencia  $Q_c$ . Al mismo tiempo, la potencia aparente pasa de  $S_1$  a  $S_2$ .

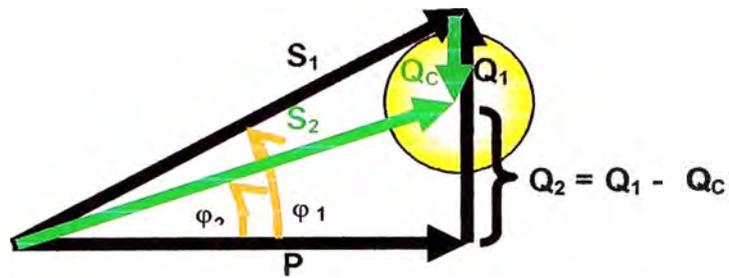


Fig. 1.1 Principio de la CFP. [4]

Donde: S = Potencia Aparente, P = Potencia Activa, Q = Potencia Reactiva.

Tabla 1.1 Valores industriales de factor de potencia no compensado. [7]

Fábrica	FP Típico No Compensado
Cervecerías	0,6..0,7
Carnicerías	0,6..0,7
Plantas de cemento	0,6..0,7
Compresores	0,7..0,8
Grúas	0,5..0,6
Plantas de secado	0,8..0,9
Maquinaria, gran tamaño	0,5..0,6
Maquinaria, pequeño tamaño	0,4..0,5
Plantas de papel	0,6..0,7
Molinos	0,6..0,7
Fábrica de acero	0,6..0,7
Azúcar	0,8..0,85
Tabaco	0,6..0,7
Bombas de agua	0,8..0,85
Transformadores de soldadura	0,4..0,5

#### Razones para mejorar el Factor de Potencia

- Para la reducción del costo de energía.
- Reducción de pérdidas ohmicas.
- Mejoramiento de la Calidad de Energía (armónicas, caídas de tensión).
- Mayor carga de kW de equipos de transmisión y distribución y/o menor dimensionamiento de estos equipos (cable, transformador, barras,..).
- Protección Climática.

## Métodos De Controlar Potencia Reactiva

- Utilizando Capacitores de CFP (HV o LV, automáticos o fijos).
- Reduciendo la cantidad de carga inductiva.
- Uso de convertidores de moderna tecnología.
- Generadores sincrónicos sobre-excitados.
- CFP Activa (tiempo real) con switches con tiristores.

### 1.2.1 Métodos de la Corrección Del Factor De Potencia (CFP)

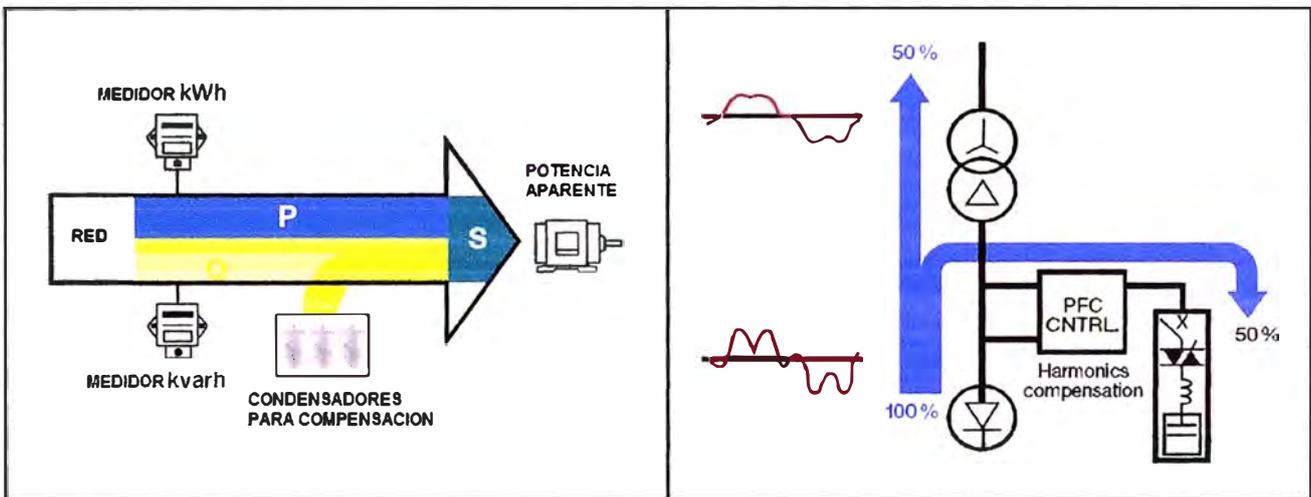


Fig. 1.2 CFP Convencional. [2]

Fig. 1.3 CFP Con filtro de armónicos. [2]

En la Fig. 1.2 se muestra la forma convencional del flujo de potencia para la corrección del factor de potencia, la Fig. 1.3 muestra la corrección del factor de potencia en presencia de armónicos generados por cargas no lineales.

#### Los métodos de corrección del factor de potencia (CFP) son:

- Compensación individual motor o transformador.
- Compensación en grupo
- Compensación automática centralizada.
- Compensación combinada.
- CFP Activa (Tiempo Real, por medio de semiconductores).
- CFP Con filtros desintonizados (tratado en el presente trabajo).

### a) Compensación Individual (fija)

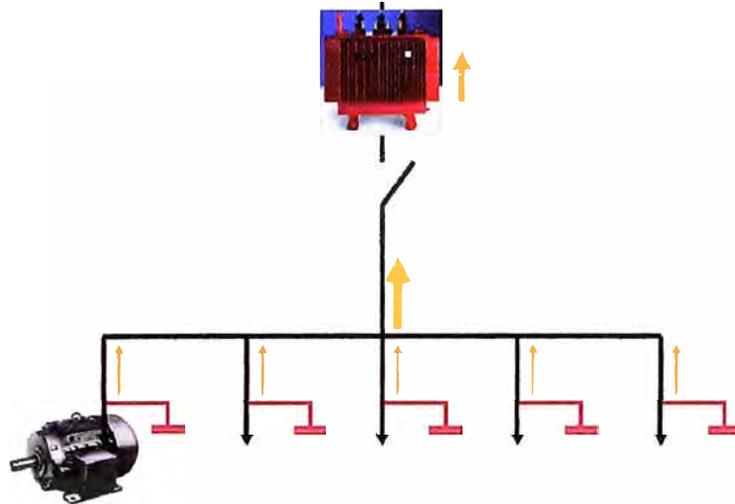


Fig. 1.4 Compensación Individual (fija).

#### Ventajas

- Ahorro de Interruptor (desconectador).
- Reducción de las pérdidas por efecto Joule en los cables.
- Reducción de caídas de tensión.
- Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.
- KVAR producidos en el lugar descarga el centro de transformación (potencia disponible en KW) , optimizando toda la instalación eléctrica.

#### Desventajas

- Muchos capacitores pequeños
- Son más caros que uno centralizada
- Bajo factor de utilización de capacitores para equipos de operación no habitual.

#### • Compensación Individual - Motor

Para compensar motores asíncronos la potencia del capacitor debería ser como máximo 90 % de la potencia reactiva de vacío del motor.

Mayores relaciones de KVAR provocan la auto-excitación del motor después de la desconexión de la red.

Riesgo de Sobre Tensión  $> 1,1 * U$  nominal

La relación de KVAR recomendada asegura un FP  $< 1$  pero  $> 0,9$  en vacío, así como también a plena carga del motor.

Una regla práctica recomienda: KVAR = 35% de la potencia activa (KW) del motor.

La potencia activa se puede encontrar en la placa de características del motor.

Después de realizar la compensación fija de un motor, la intensidad eficaz consumida por el conjunto motor-condensador es más baja que antes. En consecuencia, se deberán reajustar las protecciones del motor según la siguiente relación:

$$\text{Factor de reducción} = \frac{\cos\phi \text{ Inicial}}{\cos\phi \text{ final}} \dots\dots\dots(1.5)$$

- **Compensación Individual - Transformadores.**

Para la compensación de la potencia reactiva de vacío de transformadores, el dimensionamiento de los KVAR de los capacitores se basa en el consumo de energía reactiva propio del transformador.

Los valores recomendados compensan sólo la potencia magnetizante de un transformador en vacío.

Se puede usar la siguiente fórmula aproximada:

$$Q_0 = S_0 = I_0 \times SN / 100$$

$Q_0$  = Potencia reactiva de vacío del transformador en KVAR

$S_0$  = Potencia aparente de vacío del transformador en KVA

$I_0$  = Corriente de vacío del transformador en % de la corriente nominal

$SN$  = Potencia nominal del transformador en KVA

### b) Compensación en Grupo

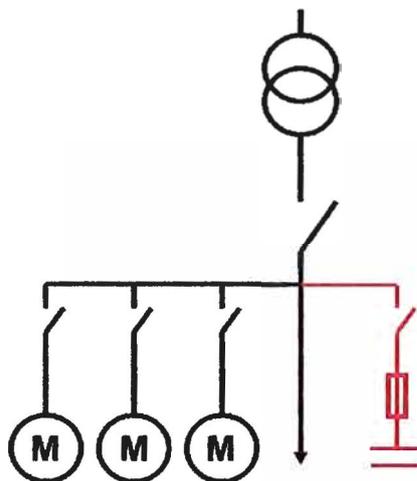


Fig. 1.5 Compensación a grupo de cargas.

### Ventajas

- Reducción de la inversión de capital.
- Pérdidas reducidas en líneas de distribución.
- Caídas de tensión reducidas en líneas de distribución.

- Mayor factor de utilización de capacitores.

### c) Compensación Centralizada

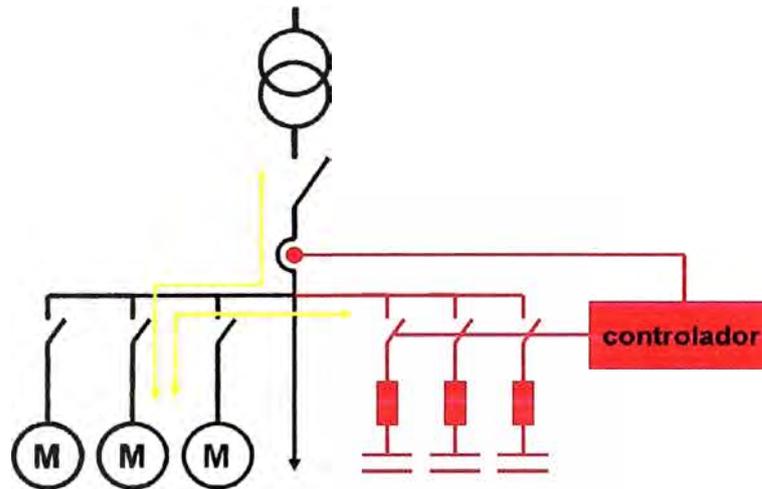


Fig. 1.6 Compensación centralizada.

#### Ventajas

- Mejor utilización de capacitores.
- Solución más efectiva (costo).
- Más fácil supervisión.
- Control automático.

En fábricas con muchas cargas de distintas potencias y tiempos de operación, la compensación fija es generalmente demasiado costosa y no efectiva.

La solución más económica para aplicaciones complejas es generalmente un banco centralizado y automático de capacitores, controlado por un controlador automático de CFP. El punto de conexión generalmente es el tablero general de distribución.

Las baterías automáticas permiten adaptarse a las variaciones de la demanda de reactiva en función de la programación realizada en el regulador.

#### d) Compensación Dinámica

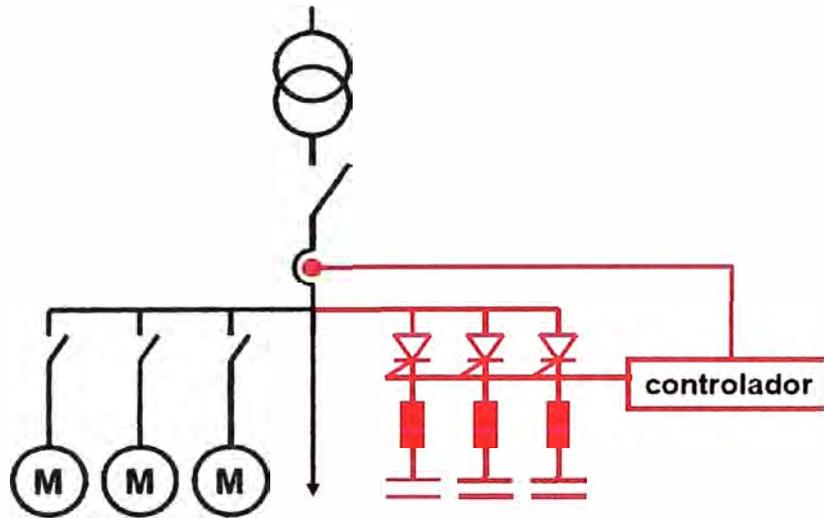


Fig. 1.7 Compensación dinámica.

#### Ventajas

- Compensación del factor de potencia en tiempo real por ejemplo esencial para grúas o ascensores.
- Conmutación suave de capacitores, evita las corrientes de inserción.
- Menos problemas de calidad de energía, tales como caídas de tensión.
- Estabilización de la tensión.
- Mayor ciclo de vida de los bancos de capacitores.

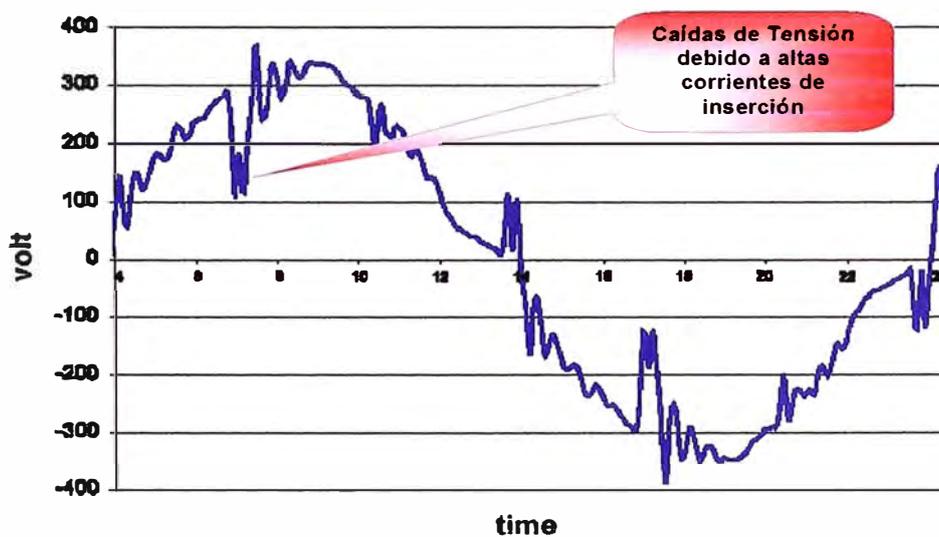


Fig. 1.8 Caídas de tensión por corrientes de inserción. [2]

### e) Filtro Activo de Armónicos

Los filtros activos son equipos basados en convertidores con modulación de ancho de pulso PWM. Aplicaciones típicas son en instalaciones comerciales con un conjunto de generadores de armónicos de potencia total inferior a aproximadamente 200 kVA (variadores de velocidad, equipos de oficina,...) como en situaciones en las que es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de corriente para evitar las sobrecargas. El filtro activo reinyecta en fase opuesta los armónicos que circulan por la carga, de tal forma que la corriente de línea  $I_s$  permanece sinusoidal.

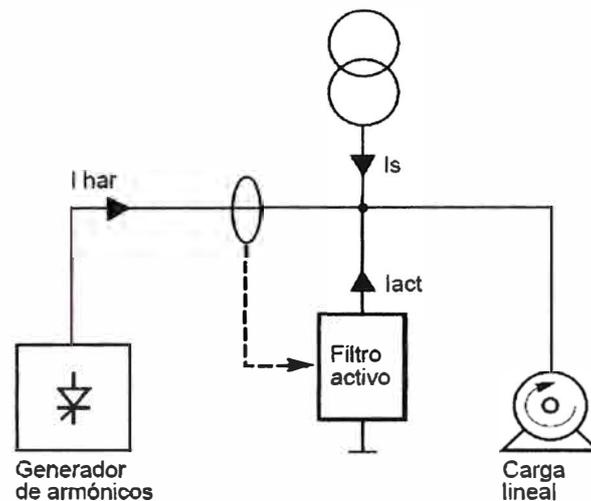


Fig. 1.9 Principio de utilización de un filtro activo. [7]

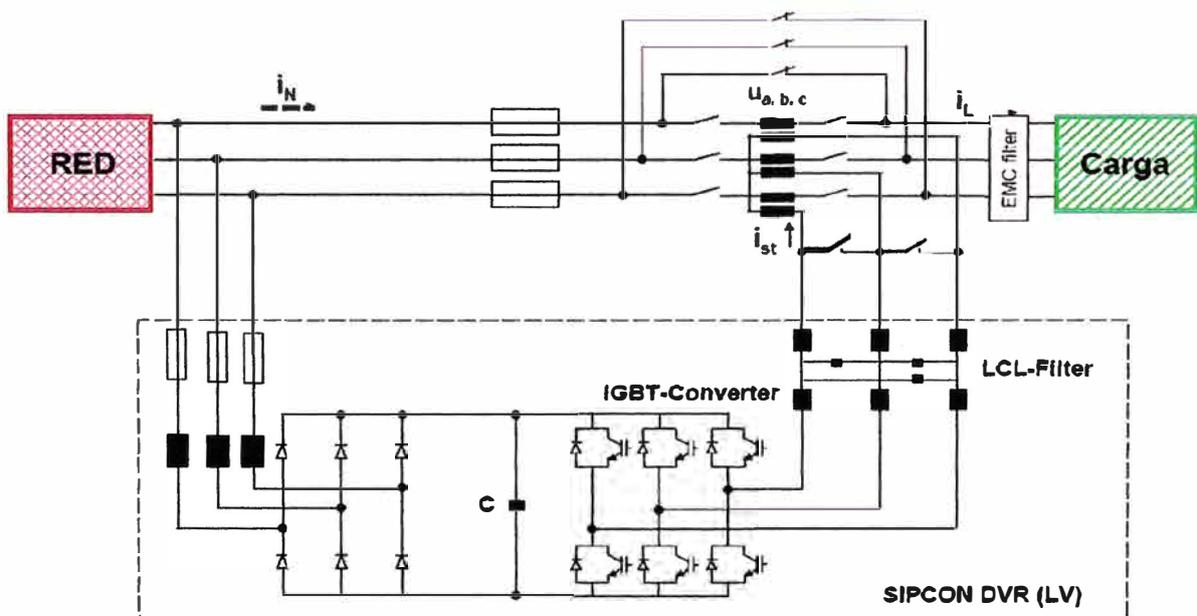


Fig. 1.10 Circuito de filtro activo. [2]

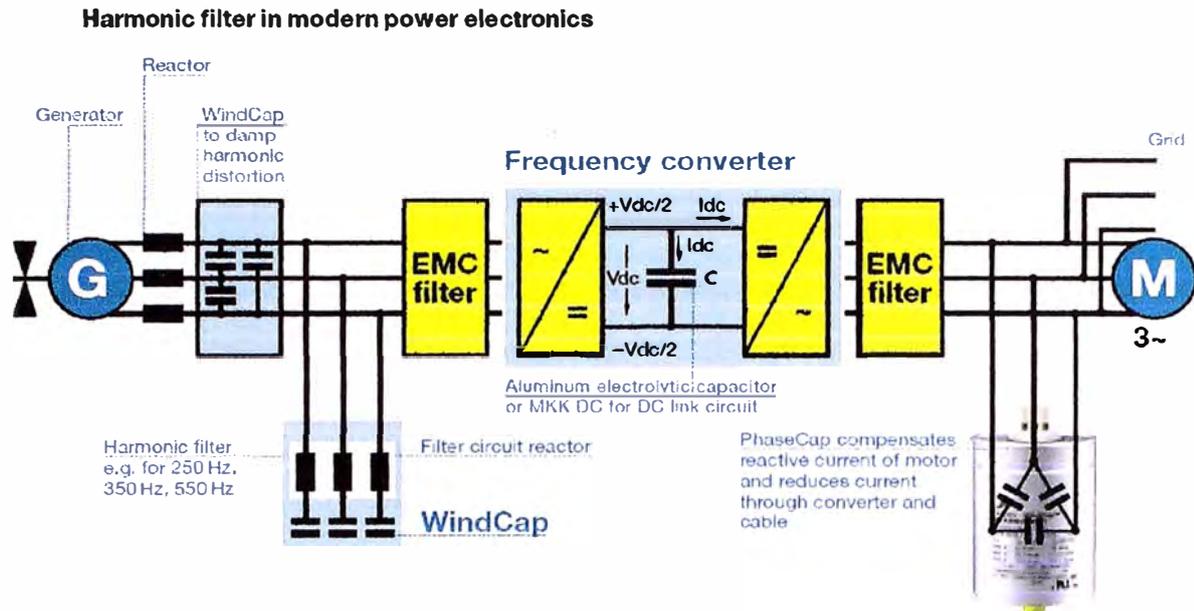


Fig. 1.11 Filtro de armónicos en electrónica de potencia moderna. [2]

### 1.3 Equipos de compensación

Los elementos que se encuentran aguas arriba de los equipos de compensación están dimensionados según las normas de instalación y por las corrientes absorbidas por las cargas.

Cuando los condensadores están funcionando, la corriente que está circulando por ellos depende de la tensión aplicada, de la capacidad y de los componentes armónicos de la tensión.

Las variaciones armónicas pueden llevar a una amplificación de corriente. La norma admite un 30% como valor y hay que añadir las posibles variaciones debidas a la tolerancia de los condensadores.

**Disyuntores.-** Su calibre debe ser elegido en función que permita un reglaje de la protección térmica a:

- 1,36  $I_n$  para los equipos estándar
- 1,5  $I_n$  para los equipos ligeramente contaminados
- 1,36  $I_n$  para los equipos con gran cantidad de armónicos

El reglaje de las protecciones de cortocircuito (magnéticas) deberá permitir el paso de los transitorios de conexión:  $19 \times I_n$ .

$$(1) \text{ Corriente nominal sobre } U_n = I_n = \frac{Q_c}{U_n \cdot \sqrt{3}} \dots \dots \dots (1.6)$$

**Los fusibles.-** Hay que utilizar fusibles de tipo Gg y la elección de calibres en función de:

- 1,6 In (1) para los equipos estándar
- 1,6 In para los equipos Ligeramente contaminados
- 1,5 In para los equipos con gran cantidad de armónicos

**Los cables de potencia.-** Se deberán sobredimensionar para una corriente de 1,5 In mínimo. De cualquier forma la sección de los cables de potencia debe ser compatible con: La temperatura ambiente, alrededor de los conductores y o forma de conexión (en bandeja, subterráneo, trenzados...).

Los aparatos de corte y protección de los condensadores deberán soportar en régimen permanente de 1,5 a 1,8 veces la In asignada a cada condensador.

### 1.3.1 Controlador Para Corrección Del Factor De Potencia

Generalmente con los controladores del factor de potencia, CFP convencional vía contactores o compensación dinámica vía switches de tiristores es posible una característica única del controlador, es la llamada "operación mixta", significa que la carga básica está compensada con contactores, pero sólo los picos de carga de variación rápida se compensan via tiristores.

Por lo tanto, no es necesario que todo el sistema esté equipado con muy costosos tiristores, sino sólo unos pocos pasos



Fig.1.12 Controlador para CFP. [2]

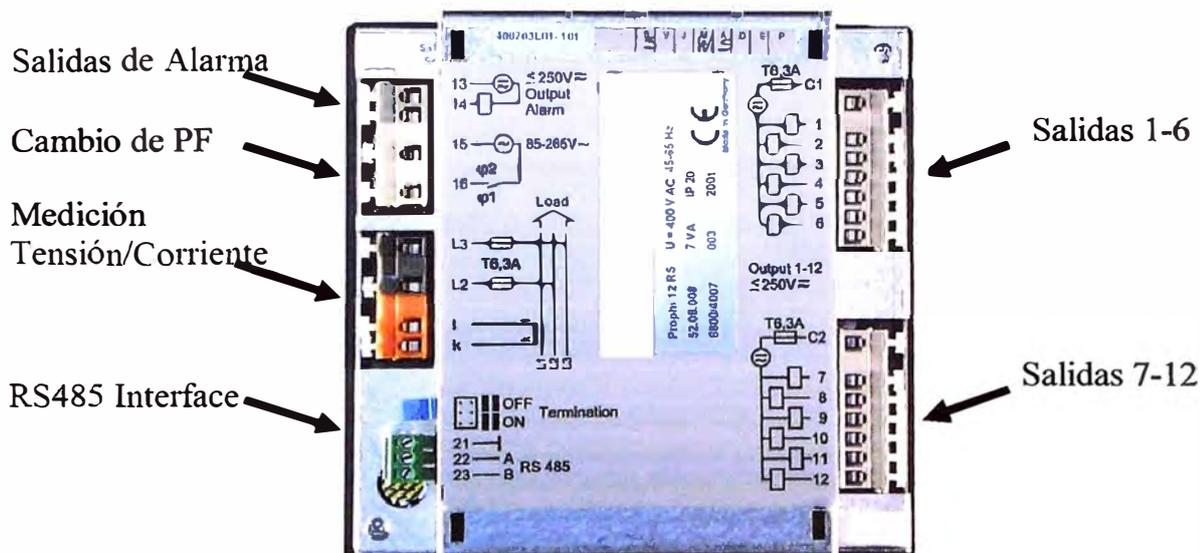


Fig. 1.13 Parte posterior del controlador. [2]

### Características

- El comportamiento de control es inteligente, con comportamiento de conmutación optimizado.
- El controlador conecta siempre el capacitor con el menor número de operaciones para usar todos los pasos del banco en forma igual y mejorar el tiempo de vida del total del banco de capacitores.
- Cualquier relación de pasos es posible.
- El controlador selecciona el paso con el tamaño mas óptimo para minimizar el número total de maniobras y así incrementar el tiempo de vida del banco de capacitores.

### Detección automática:

- KVAR de cada paso.
- Ajuste del valor de C/k.
- Conexión de fases.
- Terminales k/l.

### Ventajas:

- Valioso para rastreo de fallas.
- Fácil identificación, reparación más rápida de capacitores o contactores defectuosos.
- Práctico para mantenimiento, baja carga o período de instalación
- La sobre temperatura es una de las principales razones de defectos de los capacitores.
- Detectar defectos el sistema de ventilación.
- Detectar esporádicos sobrecalentamientos.

- Control de Inestabilidad.
- Reemplazo de contactores al final de su vida de servicio.

Durante el mantenimiento:

- Medición de la corriente de cada paso de capacitores.
- Comparándolo con la corriente nominal del paso.
- Operación manual.
- Todos los capacitores pueden ser conectados manual e individualmente
- Control de temperatura.
- Maxima temperatura registrada.
- Contador de maniobras de contactores las maniobras de cada paso son almacenadas individualmente.

El tiempo de descarga es el tiempo que cada paso de capacitores tiene para la descarga será comenzado después de cada retorno de alimentación y después de desconectar un paso. Los pasos controlados por salidas a transistor no consideran el tiempo de descarga, ya que los switches por tiristores conectan en los cruce por cero.

Con el sensor de temperatura insertado dentro del controlador y un ventilador, se puede establecer un control de ventilación simple. Para ello deben ser programados los límites superior e inferior a una salida.

### Ejemplo

Si programamos el controlador a 4 pasos, relación 1:1:2:2 (25:25:50:50 KVAR), Considerando que no hay capacitores conectados cuales serán las secuencias de operaciones con 3 escenarios.

#### a. El sistema requiere 20 KVAR

Debido a la función de tomar la potencia reactiva promedio, el controlador conectará un paso de 25 kvar. Conectará el paso 1 o el 2 dependiendo de cual tiene menos maniobras. Sin embargo será conectado sólo si el Factor de Potencia no excede 1.0 (factor de potencia unitario).

#### b. El sistema requiere 60 KVAR

Conectará los pasos 3 ó 4, significa 50 KVAR. Conectará el 3 o el 4 dependiendo de cual tenga el menor número de maniobras.

#### c. El sistema requiere 130 KVAR

Conectará los pasos 3 y 4, y 1 ó 2, significa 50 + 50 + 25 KVAR.

Conectará los pasos 1 ó 2 dependiendo de cual tenga menor número de maniobras.

**Nota.**-La inestabilidad puede ser evitada usando valores promedio de  $\cos\phi$  y de energía reactiva. Este tiempo de promedio puede ser ajustado de acuerdo a la aplicación y la tensión de operación para los contactores debe ser tomada de una fase conectada al controlador.

### 1.3.2 Capacitores

Los condensadores cubren una extensa gama de tensiones (230 V a 690 V) y de potencias a partir de un reducido número de referencias.



Fig. 1.14 Condensador 25 KVAR 480 V. [2]

Su diseño modular permite el ensamblaje de distintos elementos para conformar potencias superiores.

Utilización una tecnología de un film de polipropileno metalizado que evita la necesidad de cualquier impregnante, proporcionando la ventaja de la autocicatrización capaz de soportar fallas parciales.

El sistema de protección que integra cada elemento frente a los defectos que se pueden dar fin de vida de los condensadores:

La protección contra los defectos de baja intensidad se realiza por la combinación de una membrana de sobrepresión asociada al fusible interno

## PhaseCap – Diseño Térmico

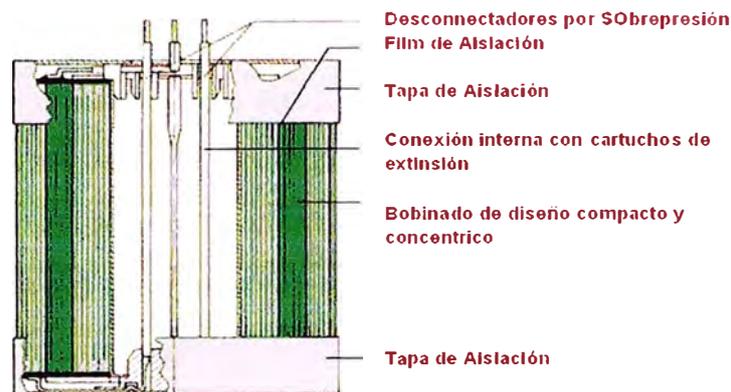


Fig. 1.15 Diseño interno de condensador. [2]

Para asegurar el corte del circuito eléctrico la envolvente de los condensadores posee doble aislamiento eléctrico y ofrece unas excelentes propiedades mecánicas y una máxima autoextinguibilidad (certificación UL).

### Características técnicas

Tipo Seco – Impregnado en Gas de Protección

Desconector de seguridad por sobrepresión 55 ° C

Rango de Producto: 5 – 31 kVAr , 230 – 690 V

Temperature Class: -25°C / +55°C

Standard IEC 831-1/2

Alta capacidad de sobrecorriente: 1.5 In

Alta capacidad de corrientes de inserción: 200 In

Expectativa de Vida: 115 000 horas

Rango de Temperatura: -25°C to +55°C máx.

Especial para Filtros desintonizados de PFC

#### a) Expectativa de Vida Nominal

Esta basada en análisis estadístico en condiciones nominales de operación:

- Tensión nominal.
- Corriente nominal, sin armónicas.
- Atenuando las corrientes de inserción.
- Con menos de 5000 maniobras por año.
- Dentro de los límites de la clase de temperatura.

Expectativa de vida en función de la tensión:

$$EV = EV_n \cdot X_v \dots\dots\dots(1.7)$$

U = 1,10 U <sub>n</sub>	X <sub>v</sub> = 0,50
U = 1,05 U <sub>n</sub>	X <sub>v</sub> = 0,70
U = 1,00 U <sub>n</sub>	X <sub>v</sub> = 1,00
U = 0,95 U <sub>n</sub>	X <sub>v</sub> = 1,25
U = 0,90 U <sub>n</sub>	X <sub>v</sub> = 1,50

Expectativa de vida en función de la temperatura:

$$EV = EV_n \cdot X_T \dots\dots\dots(1.8)$$

T <sub>prom Anual</sub> = 42°C	X <sub>T</sub> = 0,50
T <sub>prom Anual</sub> < 35°C	X <sub>T</sub> = 1,00
T <sub>prom Anual</sub> < 28°C	X <sub>T</sub> = 2,00

Expectativa de vida en función del número de maniobras:

$$EV = EV_n \cdot X_N \dots\dots\dots(1.9)$$

Maniobras con atenuación < 5000/año	X <sub>N</sub> = 1,00
Maniobras con atenuación < 10000/año	X <sub>N</sub> = 0,70
Maniobras sin atenuación < 5000/año	X <sub>N</sub> = 0,40
Maniobras sin atenuación < 10000/año	X <sub>N</sub> = 0,20

Son factores importantes

El Número de maniobras y el uso de contactores especialmente diseñados para la atenuación de las corrientes inserción.

El uso de controladores inteligentes con secuencia de maniobras optimizada

Desclasificación de la EV teniendo en cuenta todos los factores:

$$EV = EV_n \cdot X_v \cdot X_T \cdot X_N \dots\dots\dots(1.10)$$

Compensar en la selección del capacitor aquellos factores que no se pueden controlar en la aplicación.

Expectativa de Vida: Confiabilidad & Seguridad

La Confiabilidad y la Seguridad no pueden ser desclasificadas con una fórmula, pero deben ser altamente apreciadas cuando se selecciona un capacitor.

### 1.3.3 El Reactor

Se usa para generar un circuito sintonizado a una frecuencia tal que:

- Se elimine riesgo de resonancia paralelo.
- Se corrija el factor de potencia.
- Se filtren corrientes armónicas.



Fig. 1.16 Reactor para circuito de filtro trifásico. [2]

La función es formar un circuito resonante y evitar la resonancia como reducción de la contaminación armónica. La reactancia se define por:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots \dots \dots (1.11)$$

Con  $L =$  constante, resulta una respuesta en frecuencia directa de la reactancia inductiva. Las Cargas No-lineales causan perturbaciones en la línea en forma de armónicas y tienen una demanda de energía reactiva. Para diferentes aplicaciones los reactores tienen diseños técnicos muy diferentes. El uso de reactores con frecuencias mayores que la frecuencia nominal puede conducir a excesivas pérdidas y disipación de calor tiene que ser considerado en la etapa de diseño de un reactor.

Reactores para compensación de energía reactiva usados en combinación con capacitores ayudan a aliviar la red de energía reactiva y reducir la polución armónica.

Seleccionando la frecuencia de resonancia de un circuito desintonizado la frecuencia de resonancia es preferiblemente debajo de la 5° armónica.

#### **Ventajas / Características.**

Tamaño pequeño, bajo peso, fácil montaje.

Altos beneficios económicos.

Línea completa de 5 a 100 KVAR.

Construcción optimizada para EMC.

Diseño inductivo para  $I_{eff}$ , térmicamente permanente con  $1,05 \times I_{eff}$  sobrecarga probada.

## Reactores de Filtro para Bancos de Capacitores

Al contrario de los transformadores se requiere alto conocimiento técnico para selección y diseño de reactores y circuitos de filtro. Sólo si todas las condiciones importantes en una aplicación son conocidas, se puede hacer un diseño que conduzca a una perfecta operación en la práctica

Principales parámetros a considerar:

- Inductancia.
- Tensión.
- Corrientes nominales y sus frecuencias.
- Requiere de linealidad requerida a la correspondiente corriente nominal.
- Temperatura ambiente.

### Características Técnicas

Serie Standard

Potencia efectiva	5 KVAR... 100 KVA.
Factor de desintonía	5,67 % - 7 % -14 %.
Tensión nominal	3AC 400 V.
Aprobaciones	UL.

#### 1.3.4 Contactador

Cuando se conecta un capacitor a la red, en el momento de la conexión ocurre una gran corriente de inserción. Especialmente conectando capacitores en paralelo a otros ya energizados, causa extremadamente altas corrientes de inserción. Altas densidades de potencia y pérdidas reducidas de los modernos capacitores para CFP en BT significan aumento de estas corrientes de inserción. La corriente de inserción puede ser hasta 200 veces la corriente nominal.

Este fenómeno es causado por la baja resistencia del capacitor cuando es conectado.

Los condensadores forman parte en el proceso de la conexión de un condensador con los circuitos a cuyas bornes están conectados a circuitos oscilantes que pueden producir en el momento de la conexión corrientes transitorias de elevada intensidad ( $> 180 I_n$ ) y de frecuencias elevadas (de 1 a 15 KHz).

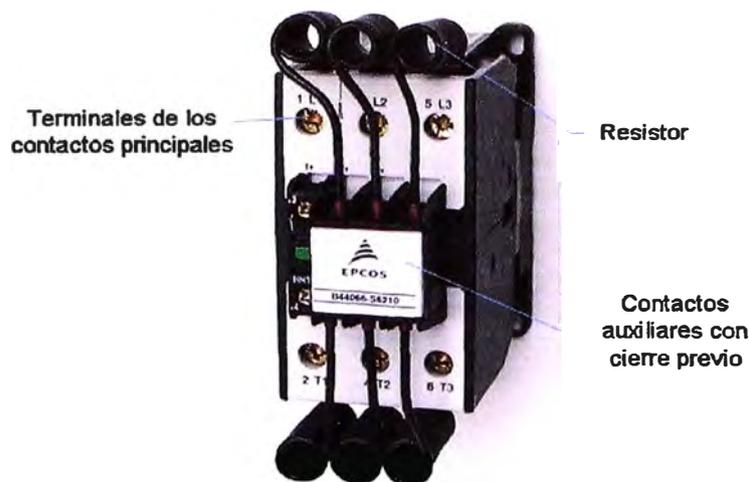


Fig. 1.17 Contactores para conexión de Condensadores. [2]

Para solucionar este problema sin tener que acudir a contactores extraordinariamente sobredimensionados se aumentaba la inductancia de la línea con el acoplamiento en serie de inductancias de choque. Un contactor específicamente diseñado para el mando de condensadores.

Los contactores están equipados con un bloque de contactos adelantados y con resistencias de pre-inserción que limitan el valor de la corriente en la conexión a 60 In.

El diseño patentado del aditivo garantiza la limitación de la corriente de conexión con lo que aumenta la durabilidad de los componentes de la instalación y en particular la de los fusibles y condensadores.

#### **Condiciones de utilización:**

No es necesario utilizar inductancias de choque ni en baterías de un solo escalón ni de escalones múltiples.

La protección contra cortocircuitos se realizará por medio de fusibles gI de calibre comprendido entre 1,7 y 2 In.

Temperatura media sobre 24 h: 45 · C.

Corriente de llamada con cresta presumible de: 200 In.

#### **Circuito de mando:**

Tensiones disponibles: 24/42/48/110/220/230/240/380/400/415/440/500/600 VCA.

Frecuencias: 50 Hz, 60 Hz, 50-60 Hz.

#### **Normas:**

CEI 70, CEI 831, NFC 54-100, VDE 0560, UL y CSA.

Se realiza los ensayos en fábrica a todos los bancos en:

Medida de la continuidad de masa.

Ensayo dieléctrico del circuito de mando.

Ensayo dieléctrico del circuito de potencia.

Medida de la capacidad individual para cada condensador.

Test de alimentación del regulador.

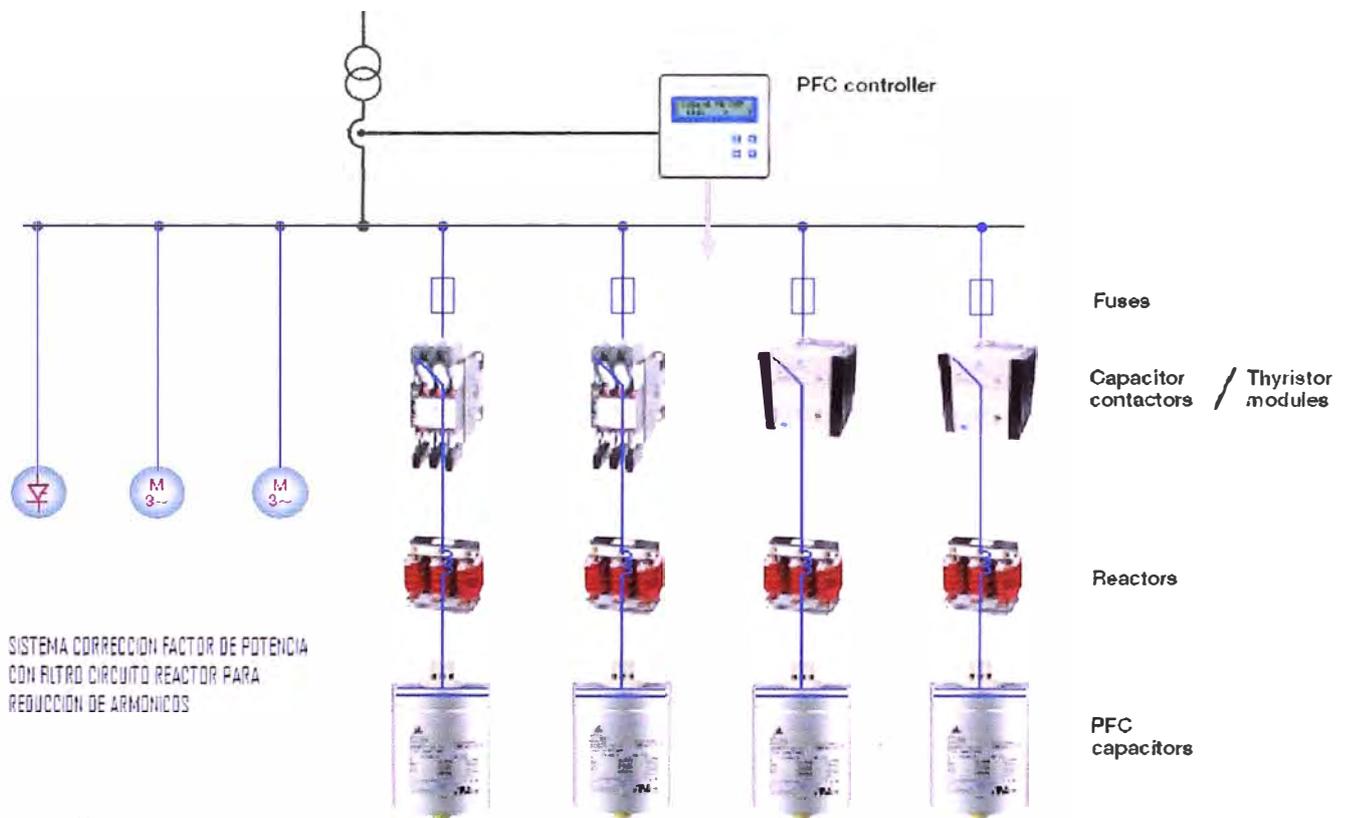


Fig. 1.18 Sistema de correccion del factor de potencia con filtro Desintonizados. [2]

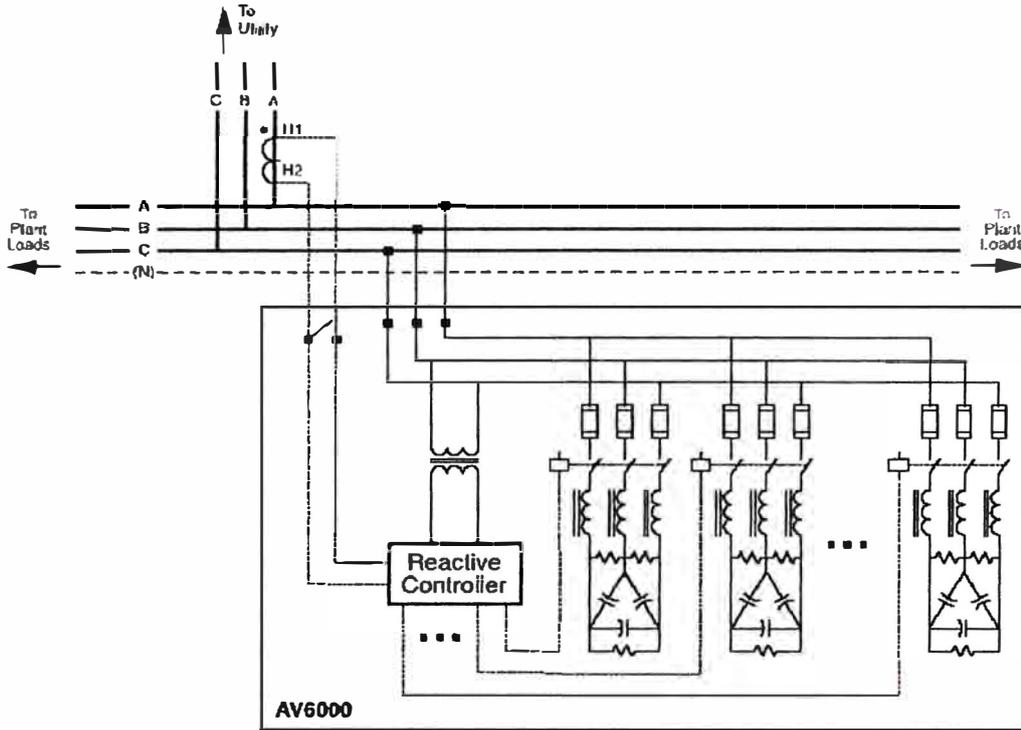


Fig. 1.19 Circuito de fuerza del CFP-DF. [7]

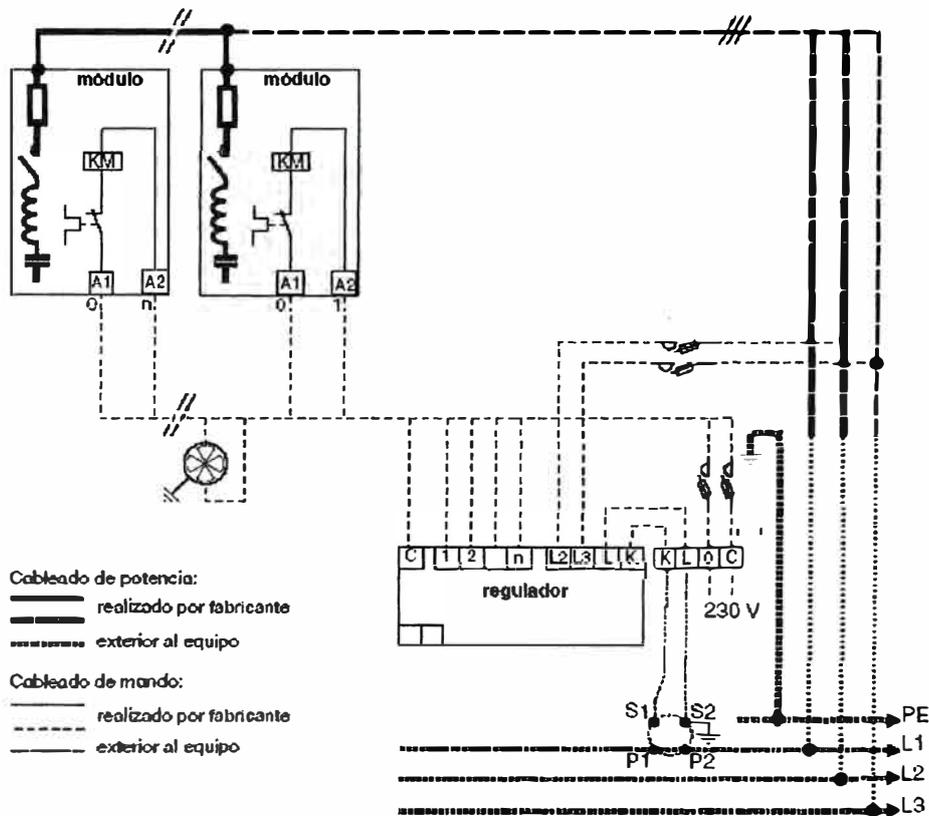


Fig. 1.20 Circuito de conexión del regulador de CFP. [7]

## **CAPÍTULO II**

### **ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS**

El progreso en el campo de la electrónica de potencia ha traído una revolución a la industria moderna. Estos avances son el resultado de continuos desarrollos en el campo de los semiconductores, así como en la tecnología de diseño de convertidores, las cuales van de la mano.

Con estos rápidos desarrollos, más y más sistemas convencionales están siendo reemplazados por modernos sistemas de potencia electrónicos, trayendo una gran cantidad de ventajas a los clientes. Ejemplos clásicos son modernos sistemas de control de motores, fuentes ininterrumpidas de alimentación, arrancadores suaves, sistemas de realimentación de energía y muchos más. Esta tendencia va a prevalecer en el desarrollo industrial en el futuro.

Como la tecnología de los convertidores está ganando terreno rápidamente en las plantas industriales modernas, los sistemas de suministro de energía están contaminados y la forma de onda de tensión y corriente senoidal ideal se encuentra raramente.

Sin embargo, estos sistemas electrónicos de potencia modernos están generando un creciente número de problemas, especialmente en el contexto de los temas de calidad de energía.

Por lo tanto, vale la pena discutir los efectos de estos equipos en las redes de alimentación y en otros equipos, especialmente en capacitores para corrección del factor de potencia.

La presencia de armónicos y desequilibrios, hace que la compensación convencional a base de simples condensadores, no sea apropiada en muchos casos a causa de los fenómenos de resonancia.

El origen del problema de armónicos son los receptores que consumen corrientes distorsionadas (no senoidales). A pesar de que la tensión en origen suele ser senoidal, las caídas de tensión provocadas por dichas corrientes no senoidales hacen que en los puntos de consumo (PCC, "Point of common coupling, en la fig. 2.1)

Se tiene una tensión distorsionada y por tanto los usuarios conectados a la red distorsionada sufren los efectos de los usuarios que generan la distorsión de corriente.

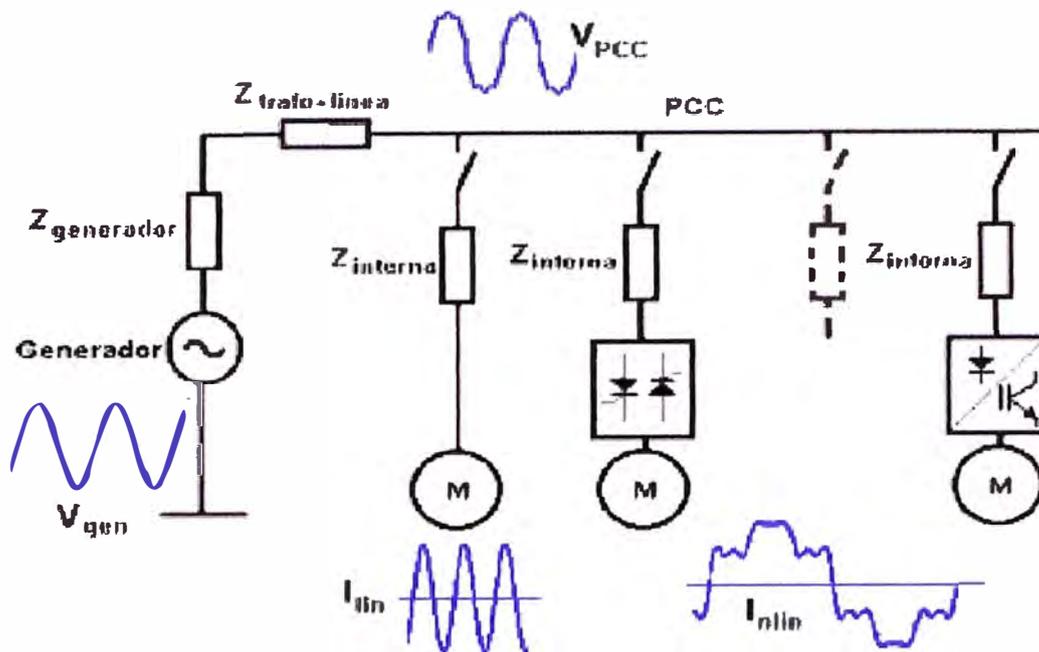


Fig. 2.1. Armónicos de corriente y armónicos de tensión en el PCC. [5]

La presencia de armónicos en la red tiene varias consecuencias. Las más importantes son las siguientes:

- Deterioro de la calidad de la onda de tensión, afectando a algunos receptores sensibles.
- Empeoramiento de factor de potencia. La capacidad de la red para suministrar potencia se ve limitada por ello.
- Sobrecarga de cables y sobre todo de transformadores (aumento muy significativo de las pérdidas en el hierro)

## 2.1 Cargas Lineales

Las cargas que tienen una característica tensión-corriente lineal son llamadas cargas lineales. Cuando son conectadas a un suministro senoidal provocan corrientes senoidales. La corriente puede tener una diferencia de fase con respecto a la tensión. Ejemplos de cargas lineales son resistencias de calefacción, capacitores, máquinas de inducción, lámparas de filamento, etc.

## 2.2 Cargas No Lineales

Las cargas que tienen una característica tensión-corriente no lineal son llamadas cargas no lineales. Cuando son conectadas a un suministro senoidal provocan corrientes no senoidales.

Los aparatos no lineales que producen armónicas se pueden clasificar bajo las siguientes tres grandes categorías:

### 2.2.1 Electrónica de Potencia

Esta categoría de generadores de armónicas es una de las principales razones para creciente preocupación por la distorsión armónica en sistemas de energía. Las aplicaciones de electrónica de potencia como: rectificadores, variadores de velocidad, sistemas UPS e inversores están creciendo continuamente. Además de ser la más importante fuente de armónicos en el sistema, este equipamiento también puede ser muy sensible a la distorsión armónica de la forma de onda de tensión.

Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran el consumo típico de una red con rectificadores monofásicos y otra con rectificadores trifásicos. Este tipo de consumos son los más abundantes en las redes y en ellos, tanto la corriente como la tensión están formadas por una componente de 50 ó 60Hz (frecuencia fundamental de la red) y una serie de componentes de frecuencias múltiplos en distintos porcentajes. Estos porcentajes pueden medirse mediante un analizador de armónicos, así como la tasa de distorsión total, THD, que da la relación entre el valor eficaz del rizado y el eficaz de la componente fundamental.

En los registros puede observarse que la tensión tiende a ser senoidal, con THD bajos, mientras que la corriente tiene formas más distintas de la senoidal y por tanto tiene THD más altos.

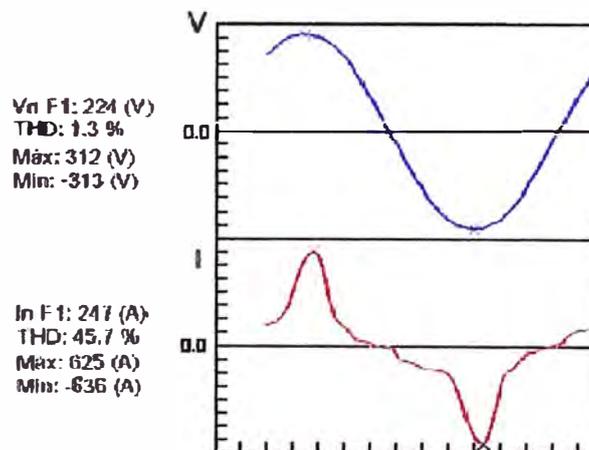


Fig. 2.2 Formas de onda típicas en red monofásica.

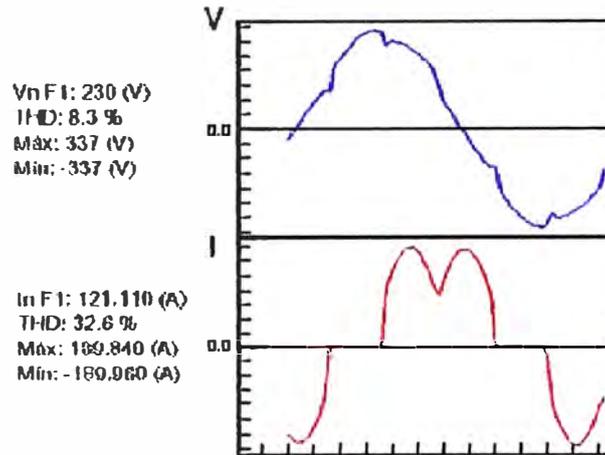


Fig. 2.3. Formas de ondas típicas en red trifásica.

### 2.2.2 Aparatos ferromagnéticos

Los transformadores son los elementos más importantes en esta categoría. Los transformadores generan armónicas como resultado de características magnetizantes no lineales. El nivel de armónicas aumenta sustancialmente cuando la tensión aplicada aumenta por sobre los valores nominales del transformador.

### 2.2.3 Aparatos de arco

Los aparatos de arco generan armónicas debido a las características no lineales del arco en si mismo. Sin embargo, la iluminación fluorescente tiene básicamente las mismas características y es mucho más predominante en la carga del sistema de energía.

Los hornos de arco utilizados en siderurgia pueden ser de corriente alterna o de corriente continua.

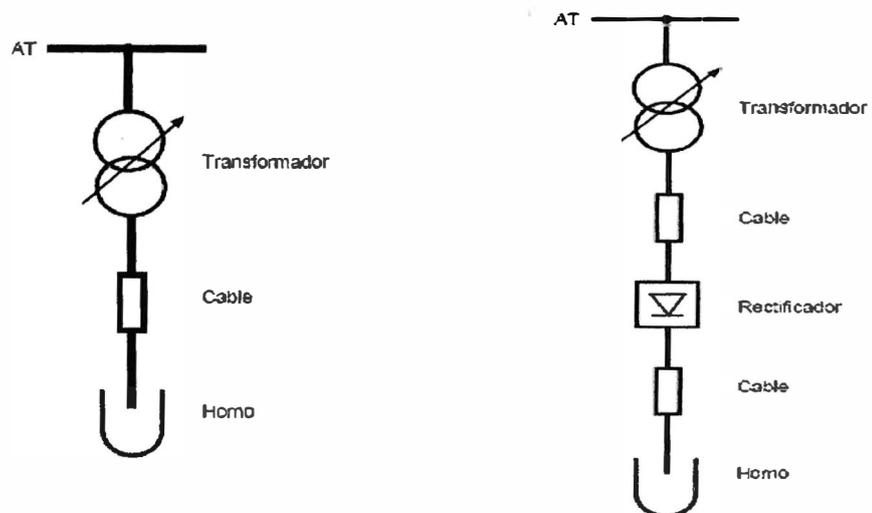


Fig. 2.4 Hornos de arco alimentado con CA y CD respectivamente. [7]

El arco no es lineal, asimétrico, e inestable. Induce espectros que contienen bandas Impares, pares y una componente continua (ruidos de fondo a frecuencias cualesquiera). El nivel espectral es función del tipo de horno, de su potencia, del período de funcionamiento.

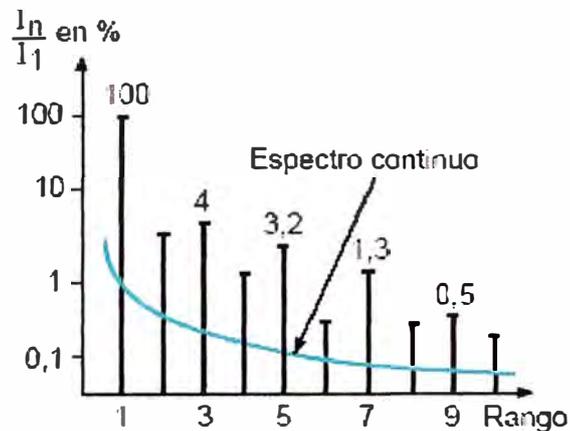


Fig. 2.5 Espectro de corriente que alimenta un horno en corriente alterna. [7]

La tensión en el arco prácticamente constante no es sinusoidal, sino rectangular e incluye además de la componente fundamental armónicos en el circuito secundario de orden 3°, 5°, 7° y 9°, siendo de poca importancia los de orden superior.

Sin embargo, al no existir línea de neutro en el circuito secundario quedan eliminadas del primario del transformador (alta tensión de 10 a 40 KV) los armónicos de orden 3.° y 9.°, pasando únicamente los de orden 5.° y 7.° Todo ello si las fases están perfectamente equilibradas.

La alimentación eléctrica de un horno de arco de alta potencia sufre unas variaciones en la potencia demandada que pueden ser brutales, sobre todo en la primera parte de la fusión.

Asimismo, la intensidad en el circuito secundario tampoco es exactamente sinusoidal aunque la desviación es pequeña. se pueden producir en el circuito de alta tensión puntas de tensión en determinadas circunstancias que aconsejan la instalación de limitadores de tensión adecuados.

La instalación de una reactancia en serie para aumentar la estabilidad del arco a tensiones de 1000 -1100 V (arcos largos), reduce la importancia de los armónicos. En caso necesario, es sencilla y no muy costosa la instalación de equipos de filtrado compuestos de reactancias y condensadores formando un circuito resonante a la frecuencia requerida por el efecto de filtrado necesario.

### 2.3 Normas para los límites de armónicos

Para garantizar un suministro con unos límites de calidad de onda y con unas pérdidas aceptables, la distorsión de tensión debe limitarse a ciertos valores dados por normas internacionales (IEC-EN en Europa y IEEE en Estados Unidos).

Concretamente para el entorno industrial la norma europea que regula la calidad de onda de tensión en lo que a armónicos se refiere es la norma IEC-61000-2-4 (Niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia). La Tabla 2.1 indica los límites de calidad de onda o límites de compatibilidad establecidos por dicha norma para el entorno industrial en BT. Las distintas clases mencionadas en dicha tabla corresponden a:

- **Clase 1:** Entorno industrial previsto para alimentación de equipos electrónicos sensibles.
- **Clase 2:** Entorno industrial normal. Límites habituales para redes públicas
- **Clase 3:** Entorno industrial degradado (generalmente por la presencia de convertidores). No apto para alimentación de equipos sensibles.

Tabla 2.1 Límites de compatibilidad de armónicos de tensión (Un%) en redes industriales de BT

Orden del armónico	Clase 1	Clase 2	Clase 3
h	Un [%]	Un [%]	Un [%]
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
>10 múlt. de 2	0,2	0,2	1
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
15	0,3	0,3	2
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
21	0,2	0,2	1,75
>21 múlt. de 3	0,2	0,2	1
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25 no múlt de 2 ni 3	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	5 x (11/h) <sup>1/2</sup>
THD(V)	5%	8%	10%

### 2.3.1 Límites de armónicos para los receptores industriales

El problema de armónicos tiene dos vertientes. Por un lado la compañía distribuidora debe garantizar una cierta calidad de la onda de tensión, pero por otra parte son los propios consumos de los usuarios los que deterioran dicha calidad de onda. No obstante, no hay que olvidar que el deterioro de la onda de tensión depende de dos factores: De los armónicos de corriente consumidos por el usuario (responsabilidad del usuario) y de la impedancia de la red en el punto de distribución (responsabilidad de la compañía suministradora). Es lógico ya que las normas IEC-61000-3-4 (Europa) y IEEE-519 (USA), que limitan la máxima cantidad de armónicos de corriente que un receptor o una instalación pueden absorber de la red, lo hagan en función de la impedancia de la red o si se prefiere de la potencia de cortocircuito, que es un índice de dicha impedancia.

La medida de la potencia de cortocircuito y de los armónicos de corriente debe hacerse en el punto de conexión a la red de distribución, denominado, PCC (Point of common coupling). Así pues el usuario debe interesarse por limitar las posibles distorsiones adicionales dentro de su instalación, procurando que la impedancia de su red de distribución sea lo más baja posible. Hay que recalcar que dicha impedancia suele depender básicamente de la inductancia por metro de las líneas de distribución, parámetro que puede estar muy degradado en caso de que los cables de las fases estén muy separados entre sí.

Las tablas 2.2, 2.3 y 2.4 dan un resumen de los límites establecidos por la norma IEC-61000-3-4 (Europa), relativos a corrientes armónicas que pueden consumir las instalaciones industriales. Para comprender dichas tablas damos a continuación algunas definiciones.

**Potencia de cortocircuito  $S_{cc}$ :** Es un indicador de la impedancia propia de la red, se define como:

$$S_{cc} = U_{nom}^2 / Z_{cc} \dots \dots \dots (2.1)$$

**Potencia nominal del equipo  $S_{equ}$ :** Se calcula de distinta forma según el tipo de carga:

- $S_{equ} = U_{fase-N} \cdot I_{equ}$  - para equipos entre fase y neutro
- $S_{equ} = U_{fase-fase} \cdot I_{equ}$  - para equipos entre fase y fase
- $S_{equ} = \sqrt{3} \cdot U_{fase-fase} \cdot I_{equ}$  - para equipos trifásicos equilibrados

**Relación de cortocircuito  $R_{scc}$ :** Es un índice de la carga que supone un equipo en la red.

Se define como:

- $R_{scc} = S_{sc} / (3 S_{equ})$  - para equipos entre fase y neutro
- $R_{scc} = S_{sc} / (2 S_{equ})$  - para equipos entre fase y fase
- $R_{scc} = S_{sc} / S_{equ}$  - para equipos trifásicos equilibrados

**Distorsión armónica total THD%.** Se define como:

- $THD\% = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=2..40} (I_h / I_1)^2}$  ..... (2.2)

**Distorsión parcial ponderada PWHD:** Para la norma citada (IEC-61000-3-4) se usa la distorsión ponderada de los armónicos 14 al 40:

- $PWHD\% = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=14..40} (I_h / I_1)^2}$  ..... (2.3)

*Tabla 2.2 Valores límites de emisión para equipos de  $I > 16A$  cuando  $S_{equ} \leq S_{sc}/33$*

Armónico h	Corriente admisible $I_h/I_1$ [%]
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	$\leq 0,6$
23	0,9
25	0,8
27	$\leq 0,6$
29	0,7
31	0,7
$\geq 33$	$\leq 0,6$
Pares	$\leq 8/n$ ó 0,6

*Tabla 2.3. Límites de emisión para equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados con  $R_{sc} > 33$*

$R_{sc}$ (2)	Tasa total admisible		Tasas individuales admisibles					
	THD%	PWHD%	$I_3/I_1\%$	$I_5/I_1\%$	$I_7/I_1\%$	$I_9/I_1\%$	$I_{11}/I_1\%$	$I_{13}/I_1\%$
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

## NOTAS:

1. El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar  $16/h$  %
2. Para valores de  $R_{sc}$  intermedios interpolar;
3. En caso de redes desequilibradas los valores de la tabla se aplican a cada una de las fases individualmente.

Tabla 2.4. Límites de emisión para equipos trifásicos equilibrados con  $R_{sc} > 33$ 

$R_{sc}$ (2)	Tasa total admisible		Tasas individuales admisibles			
	THD%	PWHD%	$I_5/I_1$ %	$I_7/I_1$ %	$I_{11}/I_1$ %	$I_{13}/I_1$ %
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

## NOTAS:

1. El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar  $16/h$  %
2. Para valores de  $R_{sc}$  intermedios interpolar

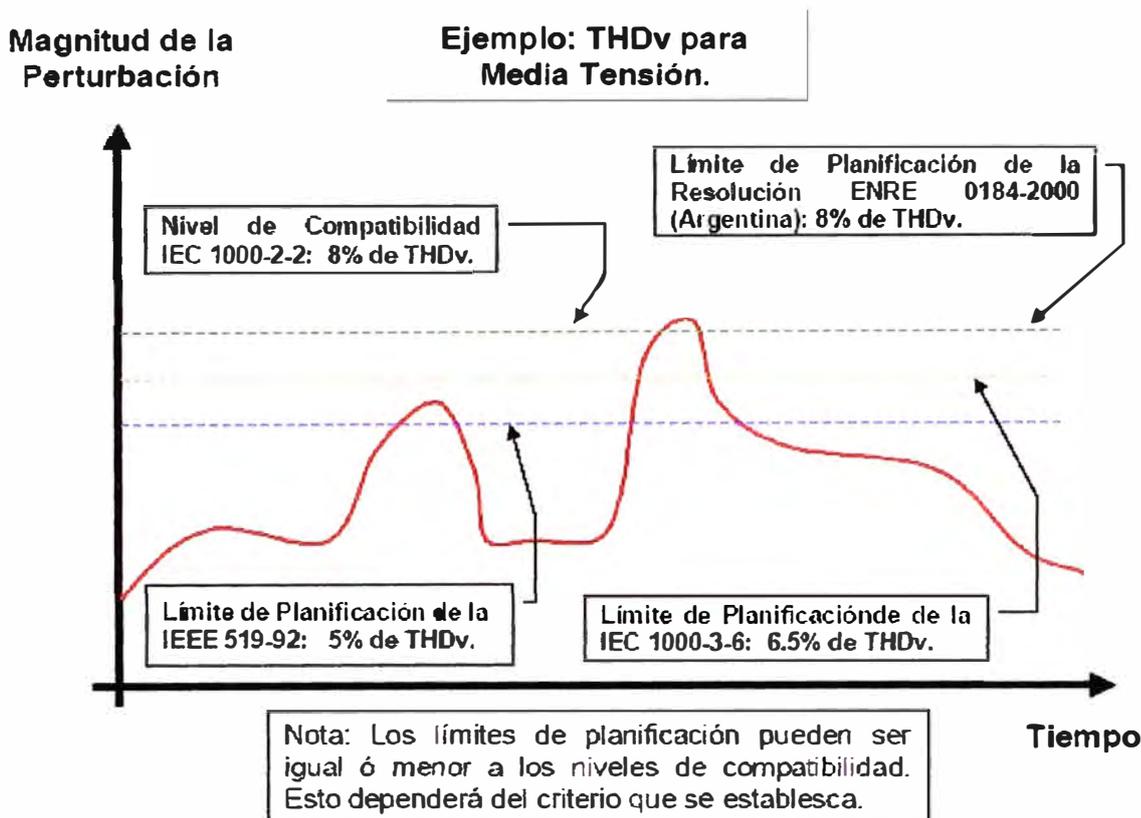


Fig. 2.3 Compatibilidad electromagnética

### Normas y recomendaciones IEEE 519-1992 y IEC Serie 1000.

#### Caso: IEEE 519-1992.

Se basa en establecer límites en puntos comunes de acoplamiento. Se establece como límite de planificación  $\text{THDv} \leq 5\%$  para baja y media tensión. Con respecto a límites de compatibilidad no se hace ninguna mención. Hasta el año 2001 la IEEE estuvo desarrollando la recomendación IEEE P1495 "Harmonics Limits for Single – Fase Equipment".

Tabla 2.5 Límites de distorsión de voltaje IEEE-519. [5]

Nivel de Tensión	Valor Máximo Individual de Cada Armónico (%)	Máximo THD (%)
Hasta 69 KV	3.0	5.0
115 kV a 161 KV	1.5	2.5
Desde 161 KV	1.0	1.5

Tabla 2.6 Límites de corriente armónica IEEE-519,

<b>V ≤ 69 kV</b>						
<i>I<sub>sc</sub>/L</i>	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	<b>THD</b>
<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%
<b>69 kV ≤ V<sub>n</sub> ≤ 161 kV</b>						
<20	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%	2.5%
20–50	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%	4.0%
50–100	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%	6.0%
100–1000	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%	7.5%
>1000	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%	10.0%
<b>V<sub>n</sub> &gt; 161 kV</b>						
<50	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%	2.5%
≥ 50	3.5%	1.75%	1.25	0.5%	0.25%	40%

### Experiencia de límites en otros países

Tabla 2.7 Caso: Europa (Antes de la IEC Serie 1000).

<b>Pais, Norma y Año</b>	<b>Nivel Recomendado de Distorsión Armónica de Tensión</b>
Alemania Federal. DIN 57160 Parte 2, 1975	THD <sub>v</sub> ≤ 10%
Finlandia. "Restricciones de Armónicos en las redes: Electricistas", 1978	THD <sub>v</sub> ≤ 5% (BT) THD <sub>v</sub> ≤ 5% (MT) THD <sub>v</sub> ≤ 1.5% (AT)
Francia. "Regulación Relativa a la Instalación de Convertidores Teniendo en Cuenta la Característica de la Red de Alimentación"	THD <sub>v</sub> ≤ 5%
Polonia. Recomendación del Instituto de Ingenieros Eléctricos en Katowice.	THD <sub>v</sub> ≤ 5% (BT) THD <sub>v</sub> ≤ 4% (MT)
Suecia. Recomendación de la "Electricity Supply Authority"	THD <sub>v</sub> ≤ 4% (BT y MT) THD <sub>v</sub> ≤ 3% (MT) THD <sub>v</sub> ≤ 1% (AT)
Reino Unido" EM 5406 ( Equipos Domésticos:). G5/2 Y G5/3 (Ámbito Industrial).	THD <sub>v</sub> ≤ 5% (BT) THD <sub>v</sub> ≤ 4% (MT)
URSS (Ahora Rusia) G08T 13109-67 (Normativa del Gobierno)	THD <sub>v</sub> ≤ 5% (En la Terminal de cualquier equipo eléctrico)

Tabla 2.8 Caso: IEC Serie 1000

	<b>Título</b>	<b>Documentos</b>
IEC 61000-1-x	Aspectos Generales	IEC 61000-1-1 IEC 61000-1-2
IEC 61000-2-x	Entorno Electromagnético.	IEC 61000-2-1 IEC 61000-2-2 IEC 61000-2-4 IEC 61000-2-6 IEC 61000-2-10
IEC 61000-3-x	Limites de Perturbaciones,	IEC 61000-3-2 IEC 61000-3-4 IEC 61000-3-6
IEC 61000-4-x	Pruebas y Técnicas de Medición,	IEC 61000-4-7 IEC 61000-4-13
IEC 61000-5-x	Guía de Instalaciones y Mitigación,	IEC 61000-5-6
IEC 61000-6-x	Normas Genéricas,	IEC 61000-6-1 IEC 61000-6-2 IEC 61000-6-3 IEC 61000-6-4

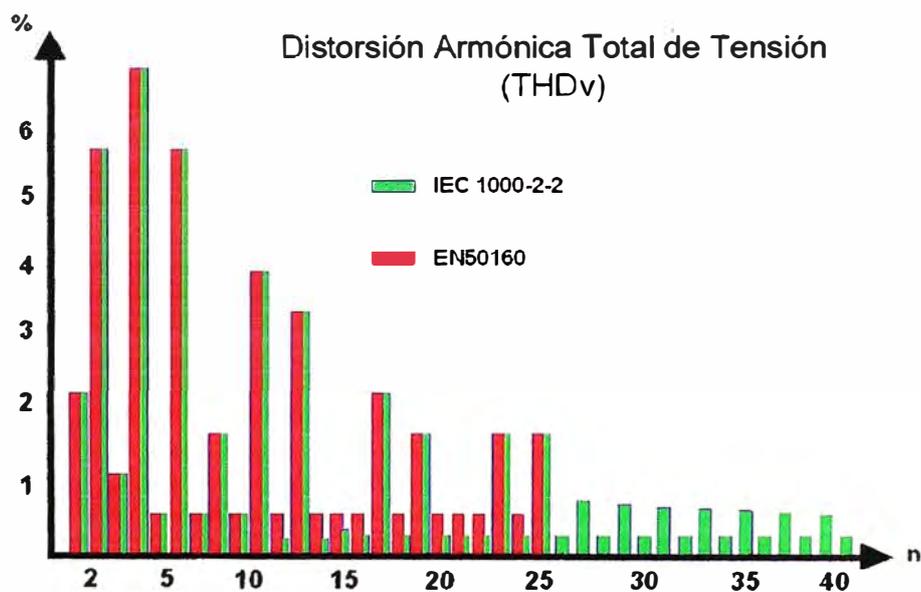


Fig. 2.4 Caso: Europa (IEC 1000-2-2 y EN 50160).

Tabla 2.9 Caso: Europa (IEC Serie 1000 y EN 50160)

País	Nivel de Distorsión Armónica de Tensión Normativa
Italia	THDvs 8% (8T), EN 50160
Netherlands	THDvs 8% (8T), EN 50160
Noruega	No esta regulado.
Portugal	THDv s 8% (8T)   EN 50160
España	No especifica valor.
Reino Unido	THDv s 5% (8T)   G 5/4

### Comparación de filosofías: IEEE y IEC.

La diferencia de filosofía con respecto al control de Armónico son:

La IEEE ha dado límites que todavía la IEC no ha asumido.

La IEEE sugiere los límites mediante recomendaciones avaladas igualmente por la ANSI, enfocados a las empresas de distribución de energía.

La IEC define los requisitos de los productos que serán instalados en las redes, a cualquier nivel de tensión, pero fundamentalmente por parte del usuario final, sea residencial, comercial ó industrial en términos de emisión y de inmunidad.

La IEC maneja la situación desde la causa.

La IEEE plantea los límites de un sistema es decir, se maneja desde el lado opuesto.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

#### 3.1 Instrumentos de medida

La calidad de suministro de energía eléctrica es un tema de gran actualidad y que es motivo de preocupación, tanto por parte de los suministradores como por parte de los usuarios. Es evidente que un sistema que pretenda medir y registrar la calidad de red no puede registrar las formas de onda de todos y cada uno de los ciclos, pues esto supondría ocupar tal cantidad de memoria que resulta impracticable.

Evidentemente, si se pretende poder registrar la calidad durante períodos largos, digamos de un día o de una semana, como suele ser habitual, hay que buscar alguna forma de comprimir estos datos y al mismo tiempo poder recuperar detalles o comportamientos singulares, fuera de tolerancias.

Para hacer un diagnóstico de las causas de la “no calidad” es muy conveniente almacenar los parámetros básicos a medir se organizan en bloques de datos. : Parámetros básicos, Estadística de tensión y frecuencia, Armónicos, Flicker, Incidencias y Registros ON-OFF y valores demandados por las Normas.

Tabla 3.1. Registro de parámetros armónicos de los analizadores de redes.

VARIABLES	SIGNIFICADO
DATE	AAAA-MM-DD
TIME	HH-MM-SS
FREQ	Frecuencia fundamental
Vf_THD	THD de tensión en fase “f” en %
Vf_RMS	Tensión eficaz total en la fase “f”
Vf_FHT[0]	Tensión fundamental en la fase “f”
Vf_FHT[i]	$(V_{fn}/V_{f1})\%$ , i=1 a 14 ; n=(i+1)
If_THD	THD de Corriente en fase “f” en %
If_RMS	Corriente eficaz total en la fase “f”
If_FHT[0]	Corriente fundamental en la fase “f”
If_FHT[i]	$(I_{fn}/I_{f1})\%$ , i=1 a 14 ; n=(i+1)
V1n (n=1 a 40)	Armónico de V orden n , fase 1 , módulo
V2n (n=1 a 40)	Armónico de V orden n , fase 2 , módulo
V3n (n=1 a 40)	Armónico de V orden n , fase 3 , módulo
I1n	(n=1 a 40) Armónico de I orden n , fase 1 , módulo
I2n	(n=1 a 40) Armónico de I orden n , fase 2 , módulo
I3n	(n=1 a 40) Armónico de I orden n , fase 3 , módulo

Por ello se concentra la información en distintas categorías de perturbaciones y representar valores promedio, máximos, mínimos, estadísticos y buscar parámetros que aporten la máxima información sobre las perturbaciones, sin ocupar excesiva memoria para luego realizar los análisis para los diferentes escenarios.

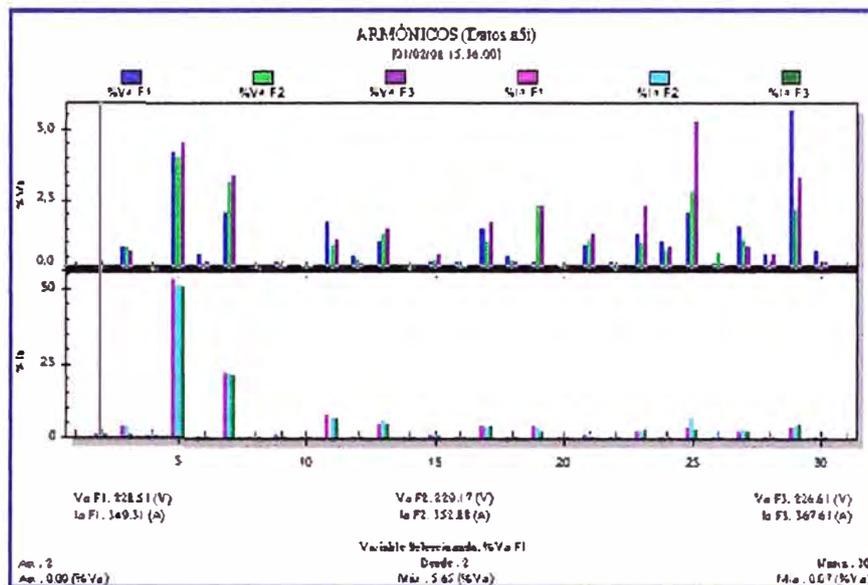


Fig. 3.1 Gráfico de armónicos capturado con un analizador de redes AR.5

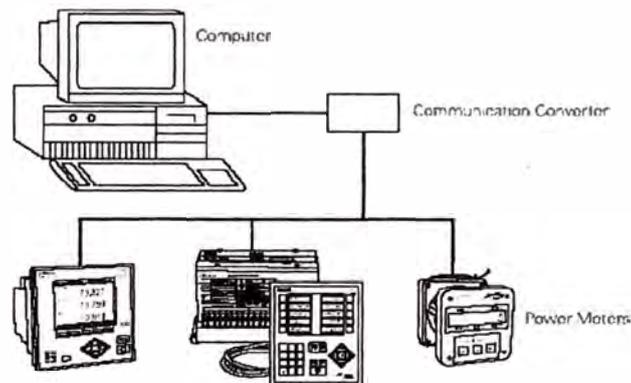


Fig. 3.2 Sistema de supervisión de equipos de monitoreo

### 3.2 Distorsión de armónicos

La distorsión armónica de la forma de onda de corriente y tensión se pueden analizar por medio del análisis de la serie de Fourier.

Fourier descubrió que cualquier función periódica se puede descomponer en un número de oscilaciones senoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y fases.

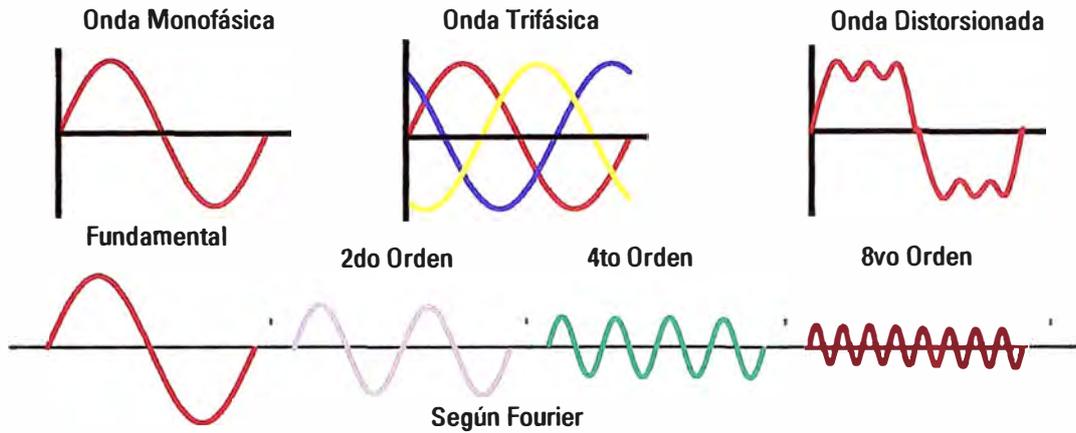


Fig. 3.3 Distorsión de la onda - Armónicas

Tabla 3.2 indicaciones del espectro armónico inyectado por diferentes cargas generadores de armónicos. . [7]

Tipo de carga	Armónicos Generados	Comentarios
Transformador	orden par e impar	componente en CC
Motor asíncrono	orden impar	inter y subarmónicos
Lámpara descarga	3 <sup>o</sup> + impares	puede llegar al 30% de I1
Soldadura arco	3 <sup>o</sup>	
Hornos arco CA	espectro variable inestable	no lineal-asimétrico
Rectificadores con Filtro inductivo	$h = K \times P \pm 1$ $I_h = I_1/h$	SAI-variadores V
Rectificadores con Filtro capacitivo	$h = K \times P \pm 1$ $I_h = I_1/h$	alimentación equipos electrónicos
Ciclo convertidores	variables	variadores V
Reguladores PWM	variables	SAI-convertidor CC-CA

En la tabla 3.2 se citan, distintos receptores con unas indicaciones sobre el espectro armónico en intensidad inyectado.

La distorsión causada por el uso de convertidores depende de la configuración del convertidor.

La siguiente ecuación se aplica a la generación de armónicas

$$v = n_p \cdot k \pm 1 \dots\dots\dots(3.1)$$

El número de orden  $v$  indica el múltiplo de la frecuencia fundamental al cual la armónica ocurre.

Como convertidores de 6 pulsos son ampliamente usados en aplicaciones industriales, las siguientes armónicas ocurren en adición a la forma de onda de frecuencia fundamental de 60Hz.

Así para un convertidor de 6 pulsos, comúnmente usado en la industria, se generarán armónicas 5th, 7th, 11th, 13th, 17th, 19th ..

La raíz cuadrática media de la suma de la corriente de 60Hz. y el total de las armónicas dará el total de la corriente  $I_L$ . Para una forma de onda distorsionada e idealizada de convertidor esta suma RMS de la fundamental y las corrientes armónicas resulta en una forma de onda cuadrada.

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_v^2} \dots\dots\dots(3.2)$$

La siguiente figura ilustra como las armónicas causan la distorsión de la forma de onda senoidal. El efecto de la distorsión de la 5th armónica se muestra en la figura.

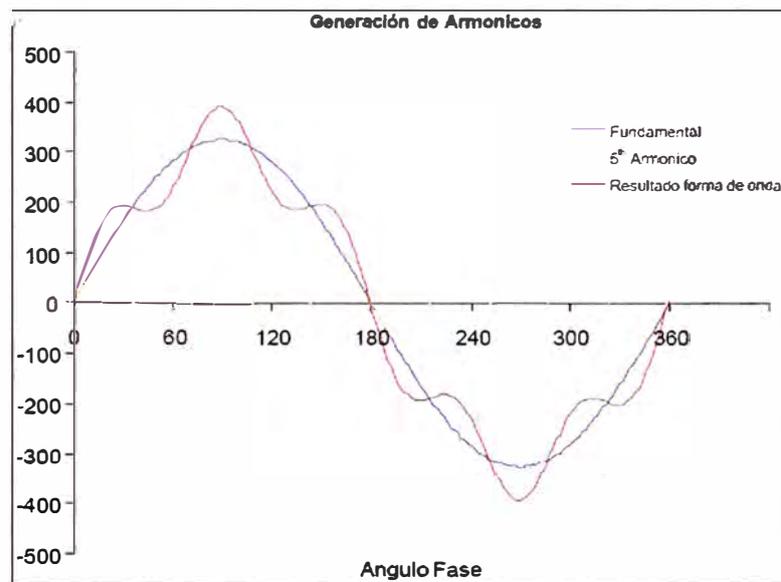


Fig. 3.4 Distorsión de armónicos. [1]

La amplitud de las corrientes armónicas para la corriente de un rectificador idealmente suavizada (forma de onda cuadrada) se puede calcular por medio de la siguiente ecuación

$$I_v = \frac{1}{v} \cdot I_1 \dots\dots\dots(3.3)$$

Como en la práctica corriente de forma de onda cuadrada no ocurre en la operación del rectificador pero si en cambio corrientes de forma de onda extremadamente distorsionadas, los siguientes valores se pueden emplear con adecuada exactitud para la amplitud de las corrientes armónicas

I5	=	0.25 x I1
I7	=	0.13 x I1
I11	=	0.09 x I1
I13	=	0.07 x I1

Las amplitudes de frecuencias más altas son generalmente de pequeña importancia. La determinación precisa de las armónicas sólo puede ser hecho con un detallado análisis de la red.

### 3.3 Compatibilidad Electromagnética:

Es la capacidad o aptitud de un equipo para no degradarse ó afectarse, ni afectar a otros equipos por una perturbación electromagnética bien sea radiada ó conducida.

- Nivel de compatibilidad electromagnética.

El nivel de compatibilidad electromagnética puede definirse como el máximo grado de perturbación, que no debe afectar al correcto funcionamiento de cualquier aparato o equipo. El sistema emisor produce perturbaciones electromagnéticas, y el sistema receptor es afectado, en su funcionamiento, por el emisor.

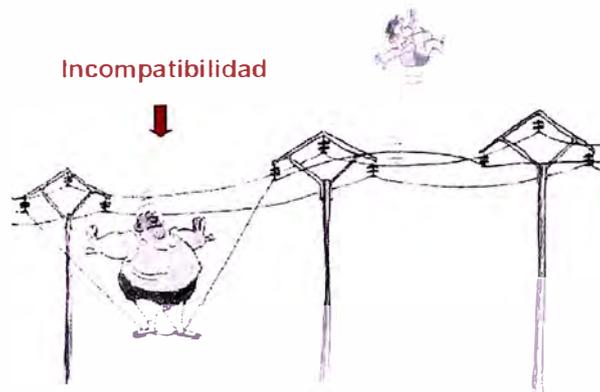


Fig. 3.5 Compatibilidad electromagnética.

## **CAPÍTULO IV**

### **EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS**

En la mayor parte de países del mundo, no existe actualmente ningún concepto en la tarifa para penalizar el consumo de armónicos de corriente. No obstante, dada la magnitud del problema, son muchos los países que están en vías de estudio o ya tienen de algún tipo de recargo en caso de que se sobrepasen los límites de la norma.

En realidad a las compañías de distribución, la existencia de armónicos de corriente les supone un costo significativo en pérdidas y en pérdida de aprovechamiento de sus instalaciones.

En la valoración del problema deben considerarse básicamente cuatro factores: Aumento de sección de cables, aumento de pérdidas en el cobre, aumento de potencia de los transformadores de distribución y aumento de pérdidas en el hierro.

La distorsión armónica se puede dividir en dos aspectos: la distorsión de tensión y la de corriente.

Los sistemas electrónicos de control, los capacitores y los motores pueden ser perjudicialmente afectados por niveles de distorsión de tensión significantes. Los controles eléctricos son potencialmente las partes más sensibles, ya que muchos controles se basan en una forma de onda senoidal limpia para sincronización o propósitos de control. Los bancos de capacitores son afectados por los picos de la forma de onda. El aislamiento puede ser degradado si la distorsión armónica es excesiva.

Los motores y transformadores sufren mayor calentamiento en presencia de armónicos. En general la distorsión armónica de tensión debería ser limitada al 5%.

Las corrientes armónicas son una preocupación en la interferencia de comunicaciones.

También causan aumento de pérdidas en líneas y transformadores y pueden causar respuestas incorrectas de relays.

Los efectos de interferencia de los armónicos en los sistemas de energía y en las cargas conectadas, son generalmente apreciados por los usuarios solo después de la ocurrencia de una salida de servicio y un costoso trabajo de reparación.

En general se observan los siguientes efectos debido a la presencia de armónicas en los sistemas de energía.

#### 4.1 Disparo de interruptores y fusibles

Debido a efectos de resonancia, los niveles de corriente pueden incrementarse muchas veces provocando los disparos intempestivos de las protecciones, interruptores y quemando fusibles. Esta situación causa serios problemas en industrias que dependen de la calidad de energía para la operación de sus procesos sensibles.

#### 4.2 Sobrecarga de Transformadores

En los transformadores, reactancias, etc., las pérdidas en el hierro en caso de existir armónicos crecen muy significativamente, esto hace que deban sobredimensionarse los KVA nominales de forma notable. Conduciendo a un Aumento de tamaño y de pérdidas en los transformadores.

El factor que se suele emplear para ello es el llamado factor K de los transformadores que se define como:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{ef}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

Donde  $e$  es un factor que representa la relación entre pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro del transformador. Este factor puede obtenerse de los datos de ensayo del transformador, o en su defecto puede tomarse como valor aproximado  $e=0,3$  y el exponente  $q$  suele tomarse de 1,7 a 1,8.

En cuanto a las pérdidas en el hierro, también son muy significativas ya que aumentan con la frecuencia a una potencia  $q$  entre 1 y 2.

$$P_{Fe} = k_{Fe} \cdot \sum h^q \cdot I_n^2 \dots\dots\dots(4.2)$$

En el mismo ejemplo anterior, con 100A de fundamental y 20A de 5º armónico por ejemplo, las pérdidas en el hierro debidas al armónico 5º, serían

- *Pérdidas de I fundamental =  $k \cdot 100^2 = k \cdot 10.000$*
- *Pérdidas de I fundamental =  $k \cdot 5^{1,5} \cdot 20^2 = k \cdot 4472$  (44,72% adicional de pérdidas)*

Los transformadores son diseñados para entregar energía a la frecuencia de red (50/60Hz). Las pérdidas en el hierro están compuestas por las pérdidas de la corriente circulante (que aumenta con el cuadrado de la frecuencia) y las pérdidas de histéresis

(que aumentan linealmente con la frecuencia). Con frecuencias mayores las pérdidas aumentan, causando un calentamiento adicional al transformador.

### 4.3 Sobrecarga de condensadores

La presencia de una batería de condensadores en una instalación no genera armónicos, sin embargo puede amplificar los armónicos existentes agravando el problema.

La corriente a través de los condensadores se calcula de la siguiente forma.

$$I = \frac{U}{X_c} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$I = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot C \cdot f \dots\dots\dots(4.4)$$

La reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia. Hasta las más pequeñas amplitudes de tensiones armónicas causan altas corrientes que perjudican a los condensadores.

Los condensadores presentan una baja impedancia a frecuencias elevadas y absorbe las intensidades armónicas más fácilmente que otras cargas reduciendo considerablemente la vida de los condensadores.

### 4.4 Pérdidas en equipos de distribución

El aumento de sección de los cables y pérdidas Joule es una consecuencia de tener que transportar los armónicos. Dicho aumento ha de ser proporcional al valor eficaz total de la corriente.

$$I_{ef\_total} = \sqrt{\sum_1^h n_h^2} \dots\dots\dots(4.5)$$

El costo por este concepto es relativamente bajo.

Basta ver por ejemplo que una corriente de 100A con un armónico de 20A superpuesto (20%) supondría solamente un 2% de aumento de la sección de cables necesaria.

$$I_{ef\_total} = \sqrt{\sum 100^2 + 20^2} \cong 102$$

En cuanto a las pérdidas Joule, éstas dependen del cuadrado de la corriente eficaz, con lo cual, en el mismo ejemplo anterior, tendríamos.

- *Pérdidas de I fundamental* =  $R \cdot 100^2 = R \cdot 10.000$
- *Pérdidas de I fundamental* =  $R \cdot 20^2 = R \cdot 400$  (4% adicional de pérdidas)

Los armónicos agregados a la fundamental causan pérdidas adicionales en los cables, fusibles y barras de distribución.

El efecto pelicular (efecto "Skin") reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia.

Aumento en las pérdidas  $I^2R$  por efecto piel,  $R_{ac} > R_{dc}$  por el aumento de la corriente en la periferia del conductor produciendo sobrecalentamiento de los conductores.

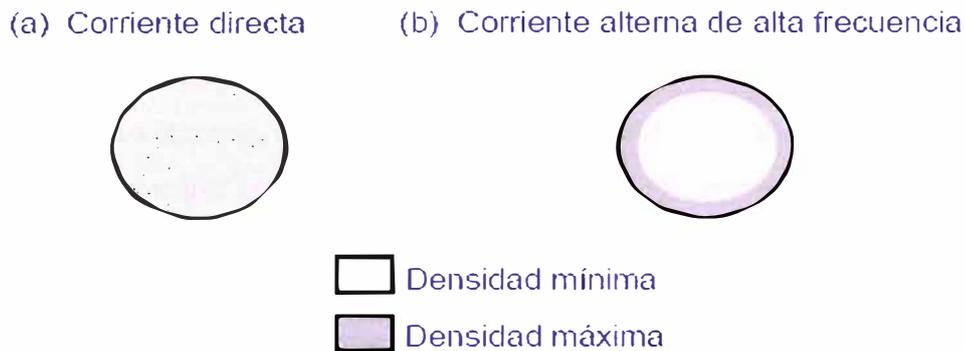


Fig. 4.1 Efecto de las armónicas en cables y conductores

Tabla 4.1. Ejemplo de la variación del efecto piel (skin) en conductores

Tamaño del conductor	Resistencia AC / Resistencia DC	
	60 Hz	300 Hz
300 MCM	1.01	1.21
450 MCM	1.02	1.35
600 MCM	1.03	1.5
750 MCM	1.04	1.6

#### 4.5 Excesiva corriente de neutro

En condiciones de carga balanceada sin armónicas, las corrientes de fase se cancelan en el neutro, resultando en una corriente de neutro nula. Sin embargo en un sistema de 4 hilos con cargas monofásicas no lineales, los múltiplos impares de la 3ª armónica (3°, 9°, 15°) no se cancelan, sino que se suman en el conductor de neutro. Cuando existe una carga trifásica + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3.

Cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provocar excesivos calentamientos y sobreintensidades del conductor neutro ya que no hay interruptores en el neutro así como lo hay en las fases.

En sistemas con cantidades importantes de cargas no lineales monofásicas, las corrientes de neutro pueden alcanzar niveles altamente peligrosos.

#### **4.6 Mal funcionamiento de controles electrónicos y computadoras**

Los controles electrónicos y computadoras requieren una calidad de energía para su operación confiable. Las armónicas causan distorsión en las formas de onda, corrientes en el neutro y sobretensiones que afectan la performance de estos equipos.

#### **4.7 Errores en sistemas de medición.**

La exactitud de los sistemas de medición se ve afectada por la presencia de armónicas. Los medidores de energía activa registran exactamente la dirección del flujo de energía a las frecuencias armónicas, pero tienen errores de magnitud que aumentan con la frecuencia.

La exactitud de los medidores de demanda y de los medidores de energía reactiva es aun menor en presencia de armónicas.

## CAPÍTULO V

### RESONANCIA

El fenómeno de la resonancia es el origen de las distorsiones armónicas más importantes en las redes de distribución, y la causa de la mayor parte de las sobrecargas en los condensadores causando sobrecorrientes y sobretensiones. Hay dos posibilidades de condiciones de resonancia como se explica a continuación.

#### 5.1 Resonancia Serie

La combinación de reactancias inductiva y capacitiva en serie forma un circuito resonante serie. El comportamiento de la impedancia de este circuito se ilustra en la figura 5.2. Se observa que a una frecuencia llamada frecuencia de resonancia, la impedancia se reduce a un valor mínimo el cual es muy bajo y de naturaleza resistiva. El circuito ofrece una impedancia muy baja a esta frecuencia lo cual causa un aumento en muchas veces de la corriente.

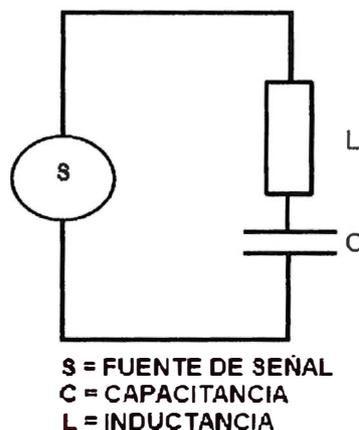


Fig. 5.1 Circuito de resonancia serie. [1]

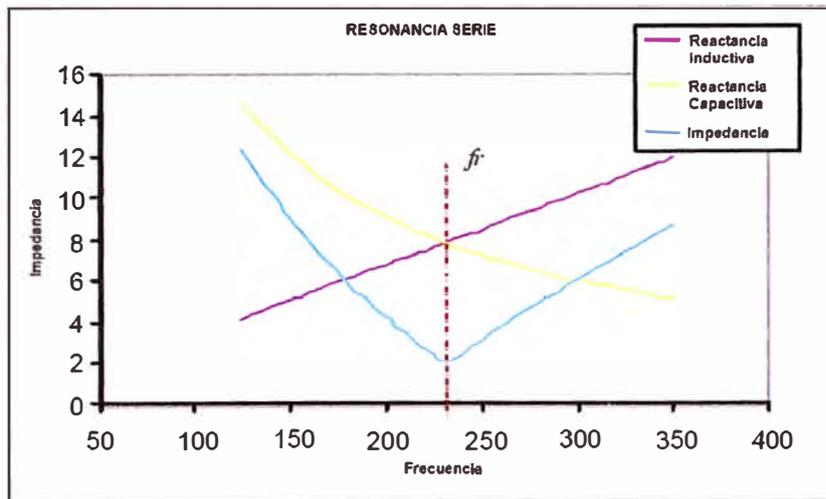


Fig. 5.2 Característica de la impedancia en circuito de resonancia serie. [1]

### 5.1.1 Como ocurre la resonancia serie en sistemas de potencia.

En muchos casos, los armónicos están presentes en lado primario del transformador. El transformador junto con los capacitores en el lado secundario de baja tensión actúan como un circuito resonante serie para el lado de alta tensión. Si la frecuencia de resonancia de la combinación L y C coincide con una frecuencia armónica existente puede sobrecargarse el equipo. Este circuito resonante serie provee un paso de baja impedancia a las armónicas en este caso. La cantidad de absorción dependerá de la posición relativa de la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia del armónico. Esta corriente armónica impone una carga adicional al transformador y especialmente a los capacitores. La tensión del lado de baja tensión del sistema se distorsiona como resultado de la resonancia.

El punto de resonancia serie se calcula con la siguiente fórmula

$$v_R = \sqrt{S_N \cdot \frac{100}{Q_{C1} \cdot e_K}} \dots \dots \dots (5.1)$$

Se debe tener en cuenta el aumento de tensión sobre el lado secundario.

### 5.2 Resonancia Paralelo

Una combinación en paralelo de reactancia inductiva y una capacitiva forma un circuito resonante paralelo. El comportamiento de la impedancia de este circuito se muestra en la siguiente figura 5.4. A la frecuencia de resonancia la reactancia inductiva iguala a la capacitiva. La impedancia resultante del circuito aumenta a valores muy altos a la frecuencia de resonancia. La excitación de un circuito resonante paralelo causa una tensión muy alta sobre las impedancias y corrientes circulantes muy altas dentro del lazo.

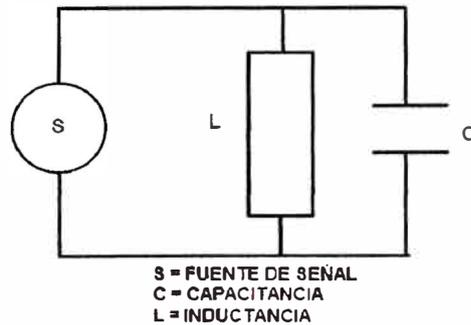


Fig. 5.3 Circuito de resonancia paralelo. [1]

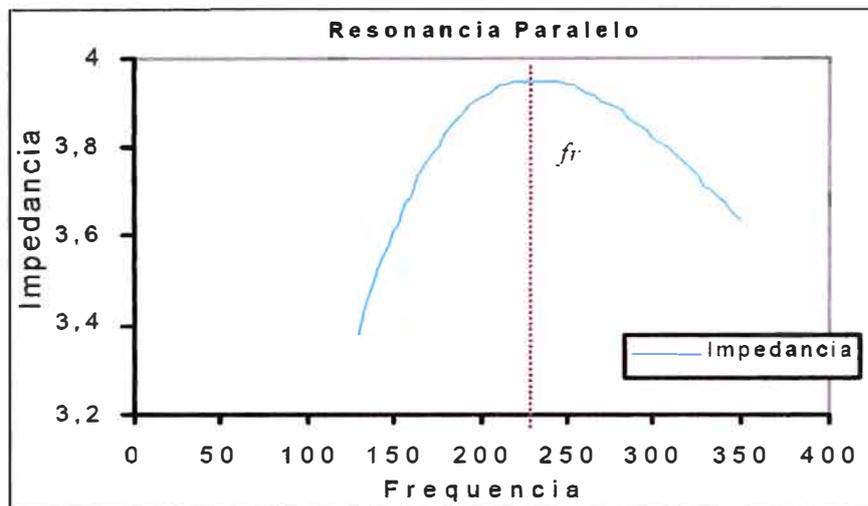


Fig. 5.4 Característica de la impedancia en circuito de resonancia paralelo. [1]

Toda la instalación situada aguas arriba del embarrado (cables, transformador, PCC de red.) queda simplificado como una impedancia inductiva por lo que tal y como se ve en la fig. 5.7, aparece una impedancia inductiva en paralelo con la batería de condensadores.

Esta asociación (inductancia y condensador en paralelo) provoca el fenómeno de la resonancia paralelo del sistema, por la cual, a una frecuencia determinada, el valor de la impedancia inductiva del sistema se hace muy elevado.

La representación de la impedancia en función de la frecuencia, para un sistema que presenta resonancia paralelo, se ha realizado en la fig. 5.8, donde también se representa la impedancia del sistema sin batería de condensadores.

**a. Impedancias características**

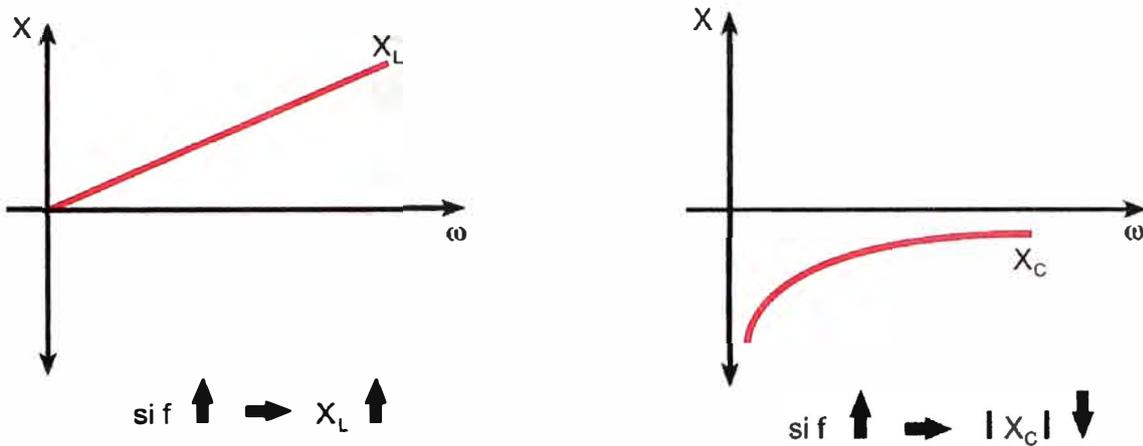


Fig. 5.5 Variación de la impedancia inductiva e impedancia capacitiva en función de la frecuencia respectivamente. [7]

La fórmula ya mencionada:  $X_L = L \omega = L \cdot 2\pi \cdot f$

La fórmula equivalente para este caso:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \dots\dots\dots(5.2)$$

**b. Esquema equivalente de una instalación tipo**

Para proceder al análisis armónico de una instalación, se realiza una modelación de la red considerando las cargas no lineales como fuentes de intensidad armónicas.

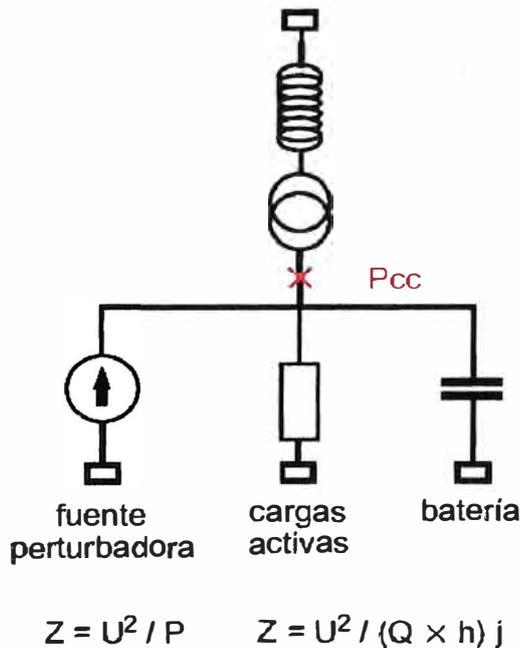


Fig. 5.6 Modelación de una instalación tipo. [7]

En la fig. 5.6 se ha representado una instalación tipo en la que se han agrupado todas las cargas de la instalación en tres tipos:

- Cargas generadoras de armónicos.
- Cargas no generadoras (lineales).
- Condensadores para compensación de la Energía Reactiva.

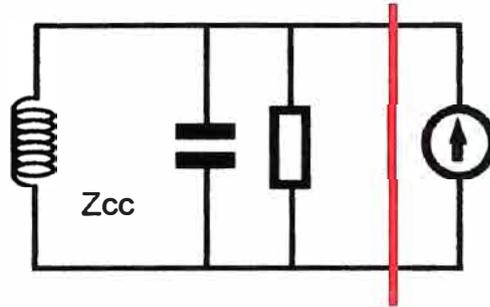


Fig. 5.7 Esquema equivalente de la instalación. [7]

La fig. 5.7 muestra el esquema equivalente de la instalación modelada anteriormente visto desde el embarrado general de BT. Destacar que todo lo situado aguas arriba del embarrado de BT (el transformador y la impedancia de red) son vistos como una impedancia inductiva.

### c. Determinación del riesgo de amplificación de corrientes armónicas

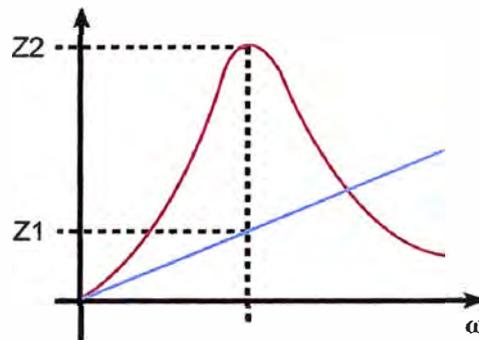


Fig. 5.8 Resonancia Paralelo y Factor De Amplificación. [7]

La representación de la impedancia en función de la frecuencia, para un sistema que presenta resonancia paralelo, se ha realizado en la fig. 5.8 donde también se representa la impedancia del sistema sin batería de condensadores.

#### El factor de amplificación

En la fig. 5.8 se observa la diferencia de impedancias:

- $Z_1$ : impedancia de la instalación sin batería de condensadores.
- $Z_2$ : impedancia de la instalación con batería de condensadores.

La diferencia entre estos dos valores de impedancia es el factor de amplificación.

Para comprobar de una forma rápida si en una red puede existir un riesgo importante de que se presente el fenómeno de la amplificación, se debe analizar lo siguiente:

1. Que existan armónicos que puedan ser amplificados; es decir, que la frecuencia de resonancia paralelo del sistema coincida con un rango próximo al de los armónicos presentes en la instalación.

La frecuencia de resonancia se puede calcular estimativamente con la siguiente fórmula:

$$h_{rp} = \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q}} \dots\dots\dots(5.3)$$

Donde:

$h_{rp}$  = rango de la frecuencia de resonancia paralelo.

$P_{cc}$  = potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la batería.

$Q$  = potencia de la batería de condensadores.

2. Que el factor de amplificación tenga un valor importante:

$$FA = \sqrt{\frac{Q \cdot P_{cc}}{P}} \dots\dots\dots(5.4)$$

$FA$  = factor de amplificación.

$P_{cc}$  = potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la batería.

$Q$  = potencia de la batería de condensadores (KVAR).

$P$  = potencia activa de la instalación (KW).

#### **d. Precauciones: etapa de proyecto**

Ya en la etapa de proyecto de una instalación se puede, como se ha visto antes, evaluar la posible problemática y anticiparnos a la misma:

- Disminución de la amplitud de los armónicos Incorporando convertidores con elevados índices de pulsación ( $K = 12$ ) la amplitud de los armónicos generados se disminuye.
- La separación de cargas generadoras y no generadoras permite atacar el problema de una forma más sencilla al realizar una concentración de las cargas no lineales.
- Reducción del factor de amplificación distribuyendo en barras independientes, es decir, evitando la conexión en paralelo de distintos Transformadores de potencia se reduce la  $P_{cc}$  en el punto de conexión de la batería, con lo que baja el  $FA$ .
- En general, para determinar el equipo concreto que se debe utilizar se aconseja la medición de armónicos y la realización de un posterior estudio.

### e. Proceso de definición de los equipos: medición

Tanto en instalaciones nuevas como en instalaciones en las que ya se haya detectado un nivel alarmante de armónicos, se deben efectuar las mediciones oportunas del espectro armónico tanto en el embarrado de baja tensión como en las cargas generadoras de armónicos.

Además, será necesario analizar el problema concreto de cada instalación: la sensibilidad de los distintos receptores, las necesidades de compensación de reactiva, exportación o importación de armónicos.

En el anexo se incluye una ficha con los datos solicitados en una instalación para realizar un estudio sobre la incidencia de la instalación de una batería de condensadores, cuando exista una presencia de armónicos en la instalación, y las posibilidades de filtrado que puedan existir.

#### 5.2.1 Como ocurre la resonancia paralelo en sistemas de potencia.

Muchos de los sistemas de energía están equipados con capacitores para corrección del factor de potencia. La capacitancia forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la carga y del transformador. En consecuencia el generador de armónicas encuentra una aumentada reactancia de red. Consecuentemente la corriente armónica causa una tensión armónica aumentada comparada con la red no compensada (XL) la cual puede ser acompañada por distorsión de la fundamental.

Entre la red y el capacitor fluyen corrientes iguales que pueden llegar a sumar un múltiplo de la corriente armónica. Los transformadores y capacitores son cargados adicionalmente lo cual puede causar la sobrecarga de los mismos.

Este circuito resonante se caracteriza por una frecuencia de resonancia dada por:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_N \cdot C}} \dots\dots\dots(5.5)$$

Sin embargo, es difícil calcular el valor de  $L_N$  ya que depende de la carga conectada a la red. La frecuencia de resonancia se puede aproximar por la siguiente fórmula

$$v_R = \sqrt{\frac{S'_K}{Q_{C1}}} \dots\dots\dots(5.6)$$

$$Q_C = \frac{S''_K}{v_R^2} \dots\dots\dots(5.7)$$

En la mayoría de los casos  $S'_K$  no se conoce y por lo tanto la siguiente fórmula se puede usar para cálculos iniciales.

$$Q_C < \frac{S_T \cdot 100}{v_R^2 \cdot u_s} \dots\dots\dots(5.8)$$

Para evitar la condición de resonancia la potencia de salida de los capacitores debería ser menor que la potencia crítica calculada por la fórmula de anterior. La correspondiente frecuencia de resonancia se puede calcular por

$$f_R = f \cdot \sqrt{\frac{S_T \cdot 100}{Q_C \cdot u_K}} \dots\dots\dots(5.9)$$

Ejemplo:

Transformador  $S_T = 630 \text{ KVA}$ ,  $u_K = 5\%$

Capacitor  $Q_C = 250 \text{ kVAR}$

$$f_R = 60 \cdot \sqrt{\frac{630 \cdot 100}{250 \cdot 5}} = 426 \text{ Hz}$$

La frecuencia de resonancia es crítica para la 7 armónica y el banco de capacitores debe ser menor a 250 KVAR.

El punto de resonancia paralelo depende de la inductancia de la red y de la potencia capacitiva. Por lo tanto es posible ubicar el punto de resonancia de manera de asegurar la menor perturbación. En realidad la impedancia de la red no permanece constante todo el tiempo porque está determinada por la potencia de cortocircuito de la red y de las cargas conectadas a ellas. La potencia de cortocircuito de la red varía con el estado de conexión y el punto de resonancia paralelo se mueve con la configuración de la red. Por lo tanto el fenómeno puede ser más complicado cuando el equipo de corrección del factor de potencia varía por pasos.

En general, es evidente que la ocurrencia de resonancia serie o paralelo puede causar sobretensiones y sobrecorrientes de niveles peligrosamente altos. Las armónicas que crean una posibilidad de resonancia no sólo sobrecargan los componentes del sistema sino también deterioran la calidad de energía en términos de distorsión y caídas de tensión.

## CAPÍTULO VI

### SOLUCIONES

Las armónicas son elementos no deseados debido a sus efectos no deseados sobre el sistema eléctrico.

Las siguientes soluciones se pueden tomar para reducir el efecto de los armónicos y proteger a los equipos.

- a. Limitar la potencia de las fuentes generadoras de armónicos.
- b. Limitar el número de fuentes generadoras de armónicas que operan simultáneamente.
- c. Conectar en forma equilibrada cargas monofásicas en sistemas trifásicos.
- d. Agregar conductores de neutro extras.
- e. Tener la tierra aislada separada de la puesta a tierra.
- f. Circuitos de filtros sintonizados.
- g. Circuitos de filtros desintonizados.
- h. Usar equipos con rectificadores con mayor número de pulsos.
- i. Filtros Activos de armónicos.

Sin embargo, en el alcance de esta nota de aplicación limitaremos la discusión a filtros sintonizados y desintonizados.

#### **6.1 Circuitos de filtro**

El capacitor junto con un reactor forma un circuito resonante serie. Este filtro puede ser sintonizado a una de las frecuencias armónicas que estén en la red.

Si la frecuencia de resonancia del circuito está desviada de la frecuencia de la armónica entonces se lo llama circuito de filtro desintonizado.

Por el contrario si la frecuencia de sintonía se ajusta próximo a la frecuencia de la armónica entonces se lo llama circuito de filtro sintonizado.

Es importante estudiar el comportamiento de la impedancia de un circuito resonante serie entender la construcción del filtro.

Reactancia de un reactor  $X_L = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot f$

(La reactancia inductiva aumenta con el incremento de la frecuencia)

Reactancia de un capacitor  $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot f}$

(La reactancia capacitiva disminuye con el incremento de la frecuencia)

Impedancia de la red

$$Z = X_L - X_C \dots\dots\dots(6.1)$$

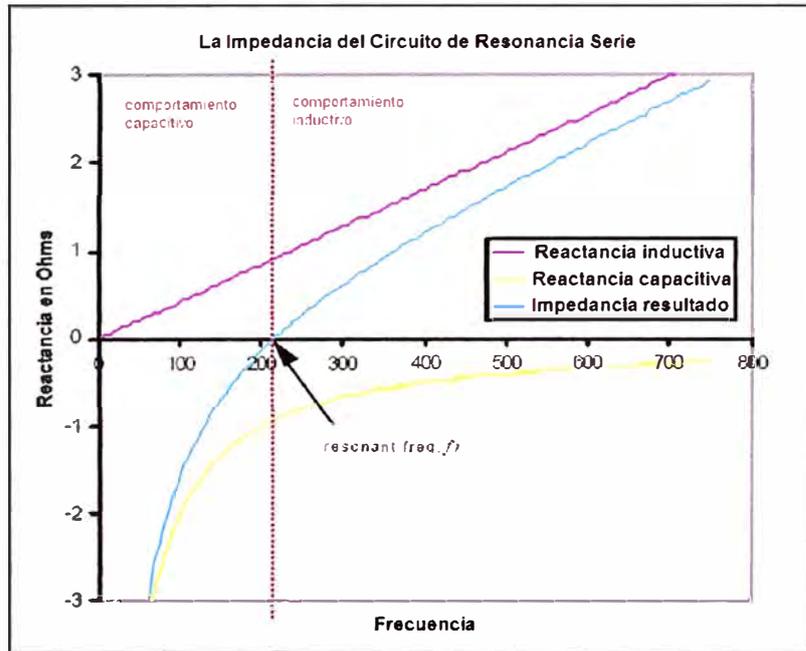


Fig. 6.1 Impedancia Circuito Resonancia Serie. [1]

El diagrama previo muestra el comportamiento de las reactancia inductiva y capacitiva, y de la impedancia resultante del circuito resonante serie.

- $f < f_{RES}$   $(Z = X_L - X_C) < 0 \dots\dots\dots(6.2)$

La reactancia del circuito resonante serie es de naturaleza capacitiva en este rango de frecuencias. El circuito filtro es capaz de proveer la potencia reactiva capacitiva para la compensación de la energía reactiva a 50 Hz. También siendo de naturaleza capacitiva; el filtro forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la red y de la carga. La frecuencia de resonancia de este circuito resonante paralelo es menor que la frecuencia de resonancia propia del circuito de filtro. No se observan efectos de resonancia si no existen armónicas en este rango de frecuencias.

- $f = f_{RES}$   $(Z = X_L - X_C) = 0 \dots\dots\dots(6.3)$

La reactancia capacitiva e inductiva son iguales. La impedancia del circuito es de naturaleza ohmica y muy pequeña en magnitud. Aún hasta pequeñas tensiones armónicas causarían muy grandes corrientes de inserción a esta frecuencia.

- $f > f_{RES} \quad (Z = X_L - X_C) > 0 \dots\dots\dots(6.4)$

La reactancia del circuito resonante serie es de naturaleza inductiva para frecuencias por encima de  $f_{RES}$ . El filtro siendo de naturaleza inductiva no forma ningún circuito resonante con las impedancias de la red ni de la carga. De esta manera la posibilidad de resonancia más allá de la frecuencia de resonancia está inhibida.

## 6.2 Filtros desintonizados

Los Objetivos de los filtros son de Corregir el Factor de Potencia, evitar resonancia paralelo y filtrar corrientes armónicas

Cuando la frecuencia de resonancia de un circuito de filtro resonante serie está ubicada a una frecuencia a las armónicas existentes en el sistema, el circuito de filtro se denomina filtro desintonizado. La filosofía de los filtros desintonizados se explica en el siguiente ejemplo.

Consideremos un filtro resonante serie conectado en una red con convertidores de 6 pulsos. Los armónicos que aparecerán en sistemas estás dadas por:

$$v = 6.k \pm 1 \dots\dots\dots(3.1)$$

Las armónicas que se generaría son 5°, 7°, 11°, 13° y así sucesivamente. La frecuencia armónica más baja que aparecería es la 5° (250 Hz). Si el circuito resonante serie está sintonizado a una frecuencia de 213 Hz, entonces a todas las frecuencias armónicas presentes el filtro actúa como un componente inductivo y se elimina la posibilidad de resonancia a la 5° armónica.

La impedancia ofrecida a la 5° armónica es menor que la del capacitor solo. Esto significa que el filtro resonante serie absorberá cierta parte de la 5° armónica.

La factor de desintonía  $p(\%)$  refleja la relación entre la reactancia del reactor y la reactancia del capacitor a la frecuencia fundamental.

La frecuencia de resonancia de un circuito filtro resonante serie se indica indirectamente por  $p$ .

Ejemplo:	
$p = 7\%$	$f_R = 189 \text{ Hz}$
$p = 5.67\%$	$f_R = 210 \text{ Hz}$

La relación entre  $p$  y  $f_R$  está dada por:

$$f_R = f_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{p}} \dots\dots\dots(6.5)$$

Ejemplo:

$p = 7\%$

$f_1 = 50 \text{ Hz}$

$$f_R = 50 \cdot \frac{1}{\sqrt{0.07}} = 189 \text{ Hz}$$

La siguiente tabla muestra una comparación para varias combinaciones a frecuencia fundamental de 50 Hz.

Tabla 6.1. Valores de frecuencia de resonancia

Frecuencia de resonancia $f_R$	Frecuencia de resonancia relativa	Reactor / Capacitor Factor p
134	2.67	14
189	3.78	7
210	4.2	5.67
250	5	4

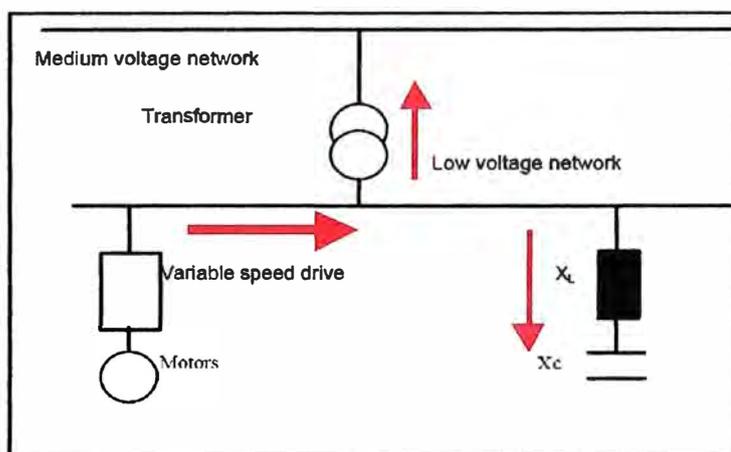


Fig 6.2 Flujo de Armónicos. [1]

Las corrientes armónicas son generadas por las cargas no lineales y circulan por toda la instalación generando a la vez sobretensiones armónicas.

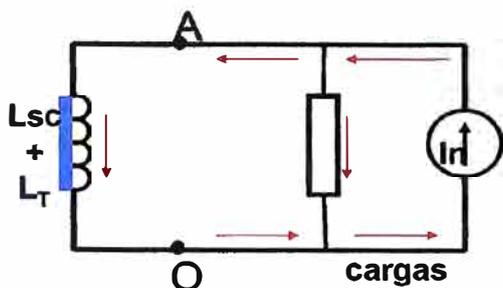


Fig. 6.3 Circuito Sin capacitores.

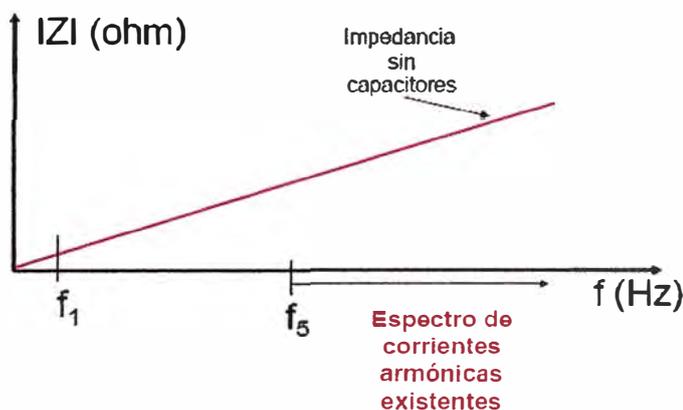


Fig. 6.4 Impedancia versus frecuencia.

Al instalar capacitores para CFP, se forma un circuito resonante paralelo que puede ser excitado por corrientes armónicas existentes, creando alto riesgo para todos los componentes de la instalación.

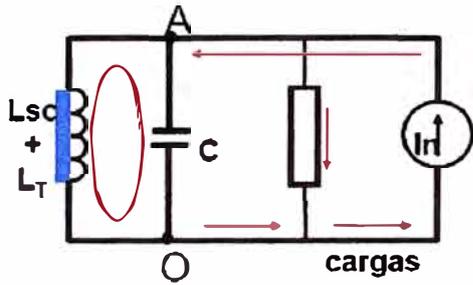


Fig. 6.5 Circuito con capacitores

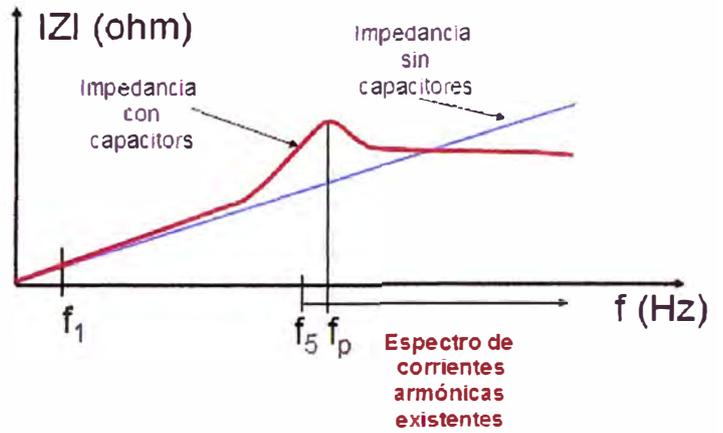


Fig. 6.6 Impedancia versus frecuencia

Si  $f_s$  queda por debajo del espectro del armónico los condensadores están bien protegidos.

Aparece una resonancia serie entre L y C. Por oposición a esta resonancia que da una impedancia mínima, la resonancia paralela es llamada a menudo antirresonancia.

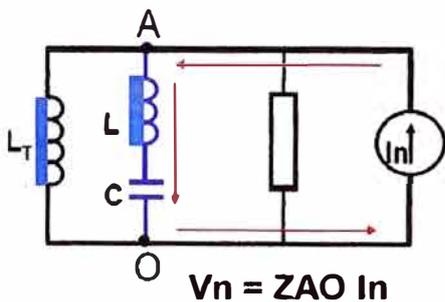


Fig. 6.7 Circuito con filtro Desintonizado

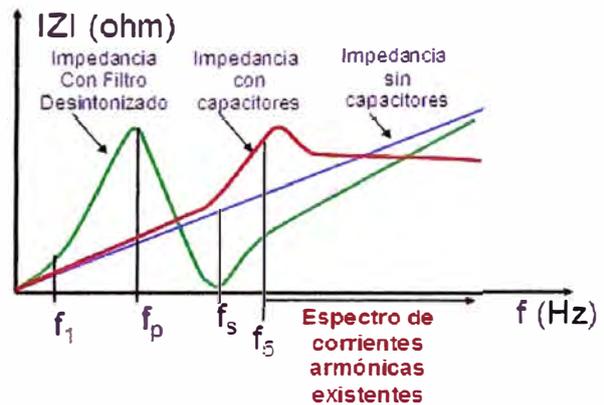


Fig. 6.8 Impedancia versus frecuencia

La fórmula que da la posición de la antirresonancia es:

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{(L_{sc} + L_T) \cdot C}} \dots\dots\dots(6.6)$$

Aproximando

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_T \cdot C}} \dots\dots\dots(6.7)$$

### 6.3 Absorción armónica

Los capacitores desintonizados absorben corrientes armónicas. El grado de absorción de las armónicas está determinado por la frecuencia de resonancia del circuito resonante serie. El grado de absorción de corriente armónica aumenta a medida que la frecuencia se corre hacia la armónica vecina. La figura anterior muestra la distribución de la corriente armónica en función del circuito oscilante serie y del transformador.

Cuanto menor sea la impedancia del circuito oscilante serie, mayor será el grado de absorción de la corriente armónica. La carga del sistema por corrientes armónicas se reduce en la misma proporción.

### 6.4 Cálculo de bancos de capacitores desintonizados

Los siguientes son los puntos importantes en el diseño de bancos de filtros de capacitores desintonizados.

- Cálculo y definición de la potencia capacitiva total y la potencia por paso.
- Selección del grado de desintonía.

Varios aspectos relacionados a los puntos antes mencionados se describen en detalle.

### 6.5 Cálculo del aumento de la tensión por el reactor serie.

Los reactores conectados en serie con los capacitores causan un aumento de la tensión sobre el capacitor, por lo tanto estos deben tener una tensión nominal mayor que la tensión nominal de la red.

El aumento de tensión sobre los capacitores se calcula por

$$U_C = U_N \cdot \frac{100}{100 - P} \dots\dots\dots(6.8)$$

Seleccionar la tensión nominal disponible del capacitor inmediatamente superior al valor calculado.

Ejemplo:

$U_N = 400 \text{ V}$ ,  $p = 7\%$ , resulta  $U_C = 430 \text{ V}$

Se debe seleccionar un capacitor de 440 V de tensión nominal.

Esta es la razón por la cual los capacitores de bancos standard no pueden ser usados para construir filtros desintonizados y tienen que ser reemplazados por otros con mayor tensión nominal de servicio.

#### 6.5.1 Cálculo de la potencia requerida del capacitor.

$$Q_C = \left(1 - \frac{7}{100}\right) \cdot \frac{U_C^2}{U_N^2} \cdot N_C \dots\dots\dots(6.9)$$

$$C = N_c \cdot \frac{\left(1 - \frac{P}{100}\right)}{U_N^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \dots\dots\dots (6.10)$$

### 6.5.2 Cálculo de la inductancia del reactor

$$L = \frac{P}{100 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot C} \dots\dots\dots (6.11)$$

## 6.6 Dimensionamiento del reactor del circuito de filtro.

### 6.6.1 ILIN Límite de la linealidad del núcleo

Los reactores con núcleo de hierro de los circuitos de filtro tienen un riesgo de saturación con el aumento de la magnetización.

ILIN es un parámetro importante para el dimensionamiento del reactor.

Un standard bien probado es:

$$I_{LIN} = 1,2 \cdot (I_1 + I_3 + I_5 + I_7) \dots\dots\dots (6.12)$$

Con  $L = 0,95 \cdot L_N$

La saturación magnética del reactor causa una disminución en la constante de permeabilidad magnética y provoca la disminución de la inductancia del reactor. Con la disminución de la inductancia la frecuencia de desintonía aumentará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$f_R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \dots\dots\dots (6.13)$$

Consideremos un filtro desintonizado con un factor de desintonía del 7%. La reducción de la inductancia debido a la saturación provocaría que la frecuencia de sintonía se aproximara en forma cercana a la 5° armónica. Debido a una menor impedancia ofrecida una gran cantidad de 5° armónica sería tomada de la red. Podría provocar una sobrecarga del equipamiento resultando en el disparo de interruptores o quizás dañando al equipamiento. La alta corriente circulante debido a la 5° armónica mantendrá constantemente al reactor en saturación.

Por lo tanto los reactores deben ser dimensionados de forma tal que con la suma aritmética de todas las corrientes máximas existentes (corriente nominal, armónicas, control remoto por audio frecuencias) las características magnéticas del reactor todavía se mantengan en la zona lineal.

Si  $I > I_{LIN}$ , las características tensión corriente del reactor ya no son lineales y el reactor mismo producirá armónicas.

### 6.6.2 ITérmica

ITérmica es un parámetro importante para el dimensionamiento eléctrico del reactor.

El standard industrial es  $I_{TH} = 1,05 \cdot I_{RMS}$

$$\text{Corriente Eficaz} = I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \dots \dots \dots (6.14)$$

En términos de pérdidas es importante saber que frecuencias y amplitudes se usan. Mayores frecuencias causan mucho mayores pérdidas comparado con la corriente de 50 Hz.

### 6.7 Clase de temperatura, pérdidas, costos de energía.

Los reactores de bajo costo causan mayores pérdidas y por lo tanto disipación a alta temperatura y altos costos de energía. El costo adicional de reactores más caros se amortiza en poco tiempo por la reducción de costos de energía. Pero lo más importante son los aspectos térmicos. La siguiente tabla compara las clases de temperatura T40/H y T40/B

Tabla 6.2 clases de temperatura T40/H y T40/B. [1]

	<b>T40/H</b>	<b>T40/B</b>
Dimensiones	Menores	Mayores
Peso	Menor	Mayor
Precio	Menor	Mayor
Pérdidas eléctricas	Mayores	Menores
Temperatura	Mayor	Menor
Costos de energía	Mayor	Menor
Expectativa de vida	Menor	Mayor

#### 6.7.1 Carga armónica.

El standard industrial especifica la carga armónica de los reactores.

UH3 = 0.5% superpuesto a VN (100% duty cycle)

UH5 = 5% superpuesto a VN (100% duty cycle)

UH7 = 5% superpuesto a VN (100% duty cycle)

Estos valores standard son suficientes para la mayoría de las aplicaciones, sin embargo depende de las aplicaciones individuales y tienen que ser chequeados cuidadosamente.

- Dimensionamiento de los capacitores.
- Sobrecorriente.
- Sobretensión.
- Temperatura / ventilación.

### 6.8 Que es el factor de desintonía.

El factor de desintonía se define de la siguiente forma.

$$p = \left( \frac{f}{f_{RES}} \right)^2 \cdot 100 \dots\dots\dots(6.15)$$

El factor de desintonía p (en %) es la relación entre las reactancia del reactor y del capacitor.

$$p = 100 \cdot \frac{X_L}{X_C} = 100 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C \dots\dots\dots(6.16)$$

Los filtros son generalmente diseñados para un factor de desintonía de 7%. Para 5° armónica 7% corresponde una frecuencia de resonancia serie de 189 Hz. La razón para la popularidad del factor de desintonía 7% es la efectividad de costo obtenida por la optimización de componentes a esta frecuencia de resonancia, y buena protección del equipamiento, así como también un cierta reducción de las armónicas.

### 6.9 Selección del factor de desintonía.

Debido a la continua variación de las condiciones de carga el punto de resonancia paralelo se mueve constantemente. Si la frecuencia de resonancia del circuito de filtro iguala la frecuencia de una armónica presente, provocaría la sobrecarga de los capacitores.

Para evitar tal condición el filtro se sintoniza por debajo de la menor armónica presente en el sistema. El rango de armónicas presentes en sistema determina el grado de desintonía a usar.

Como se explicó, los filtros desintonizados absorben armónicas en los sistemas de energía.

Menor factor de desintonía significa mayor absorción de armónicas.

Tabla 6.3 Selección del factor de desintonia. [1]

PARA FILTRAR	P	50HZ	60Hz
3° Armónica (35%)	14%	134Hz	161Hz
5° Armónica (35%)	7%	189Hz	252Hz
7° Armónica (45%)	5,67%	210Hz	267Hz

Cálculo de un filtro desintonizado

Ejemplo de cálculo Qe = 25 kVAr - 440V - 60Hz - 7 %

El inductor se selecciona por la potencia efectiva en 440V y para p=7%

y por lo tanto será un reactor de 25kVAr-440V-60Hz-7%

Aunque la red es de 440V, por la desintonía la tensión sobre el capacitor será:

$$U_c = U_N \cdot \frac{100}{100-p} = 440 \text{ V} \cdot \frac{100}{100-7} = 473 \text{ V} \rightarrow \text{se debe usar un cap. de 480 V}$$

Cálculo de la potencia nominal del capacitor  $Q_c$ , especificada para  $U_c = 480\text{V}$ , para obtener una potencia efectiva de 25 kVAr en 440V con con reactor con  $p=7\%$

$$Q_c = \left( 1 - \frac{p}{100} \right) \left( \frac{U_c}{U_N} \right)^2 \cdot Q_e = \left( 1 - \frac{7}{100} \right) \left( \frac{480}{440} \right)^2 \cdot 25 \text{ kVAr} = 27 \text{ kVAr} \quad (480\text{V}-60\text{Hz})$$

### 6.10 Protección de bancos de capacitores y otros equipos de la resonancia.

- Microswitch térmico en el núcleo del reactor

Los inductores para la aplicación de filtros son diseñados para una clase de temperatura particular. Esta clase de temperatura determina la máxima temperatura permisible del reactor.

La temperatura del reactor se mantiene dentro de límites seguros con la ayuda del correcto dimensionamiento en la fase de diseño y la correcta ventilación durante la operación. Sin embargo debido a mayores temperaturas ambiente y a la carga de armónicas la temperatura puede subir a mayores niveles.

Para detectar esta temperatura y evitar daños eléctricos y accidentes un microswitch térmico se coloca dentro del bobinado del inductor que se puede conectar en serie con la bobina del contactor para desconectar el circuito de filtro en caso de sobretemperatura.

- Relays de sobrecorriente térmica.
- Fusibles.
- Dispositivos de ventilación.
- Desconectores de seguridad.

### 6.11 Instalación de bancos de capacitores desintonizados

- Verificar igual que bancos de capacitores standard.
- Ajustar los relays de sobrecorriente a 1.3 IN.
- Ajustar el termostato a 35°C para comienzo de la operación de la ventilación, y luego a 55°C para la desconexión completa del banco.

- Medición de la corriente fundamental de los capacitores.
- Medición de las corrientes armónicas de los capacitores:

Las corrientes armónicas deberían ser menores a los niveles de corrientes armónicas especificados para el reactor.

Ejemplo: HvM standard 0.5% para 3°, 5% para 5° y 7° respectivamente. La medición se debe realizar bajo altas condiciones de carga. Esta medición mostrará la carga del banco de capacitores.

Como se explicó, los filtros desintonizados absorben armónicas en los sistemas de energía.

Menor factor de desintonía significa mayor absorción de armónicas.

- Medición de tensión y corriente en los cables de alimentación al tablero general de alimentación incluyendo las armónicas.

Esta medición se debería realizar antes y después de la instalación del banco de capacitores. Esta comparación mostrará la reducción o incremento de los niveles de armónicas.

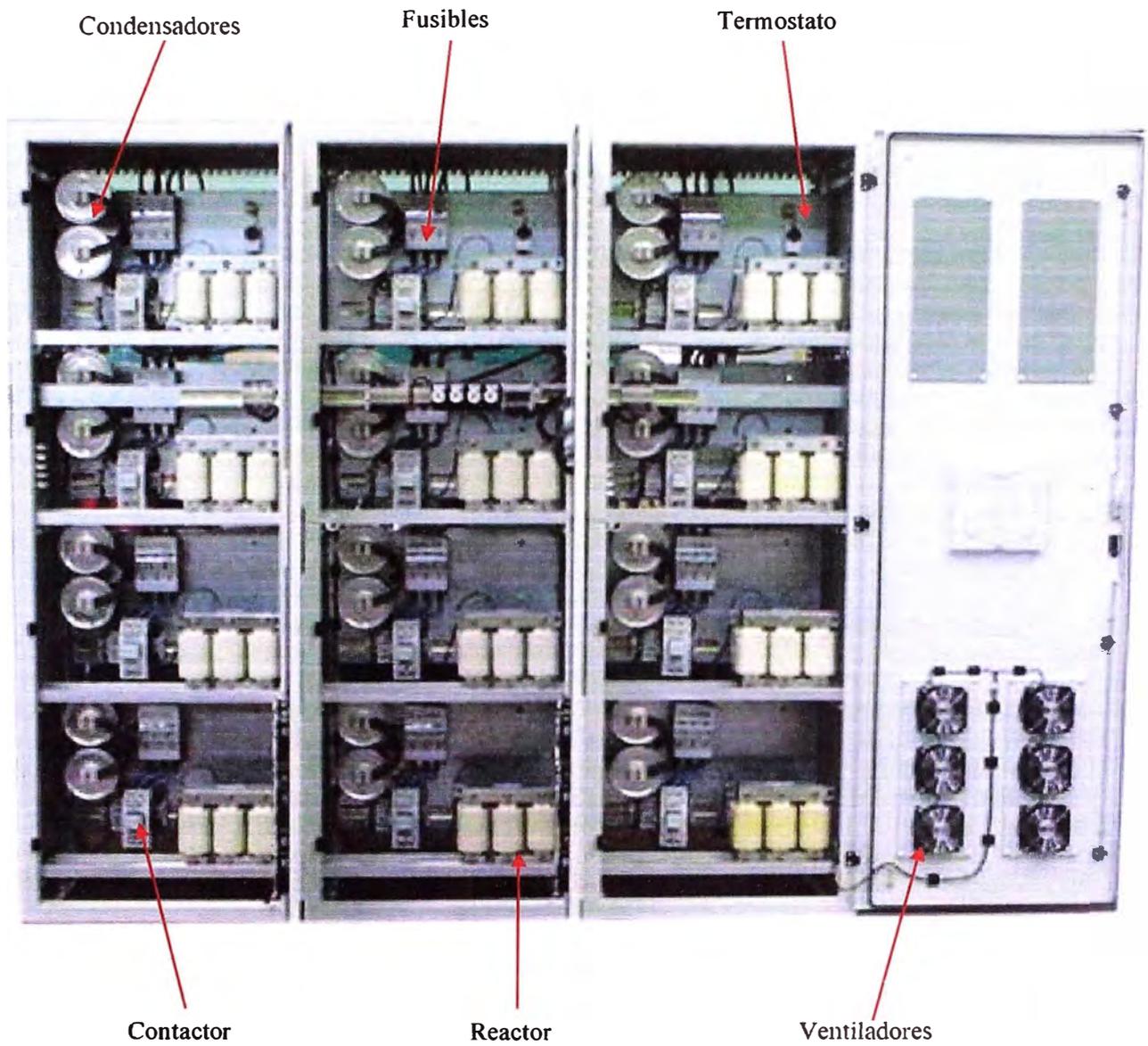


Fig. 6.9. Banco Automático con filtros desintonizados  $p=7\%$  de 600 KVAR

## Cálculos para la selección de los elementos de banco con filtros desintonizados

INPUT:	Supply Voltage/ V +Overvoltage	Frequency/ Hz	Detuning Factor/ %	Rated Capacitor Voltage/ V	Rated Capacitor Output/ kVAr
	380	60	7.00	440	31.17

$f_r = 227 \text{ Hz}$

## OUTPUT:

Increased capacitor voltage/ V	409
Effective filter output/ kVAr	25.00
$L_n$ / mH	1.154
$C_y$ / $\mu\text{F}$	427.29
$I_1$ / A	40.31
$I_3$ / A	1.43
$I_5$ / A	11.79
$I_7$ / A	5.09
$I_{\text{eff}}$ / A	42.33
$I_{\text{th}}$ / A	44.44
$I_{\text{lin}}$ / A	70.35

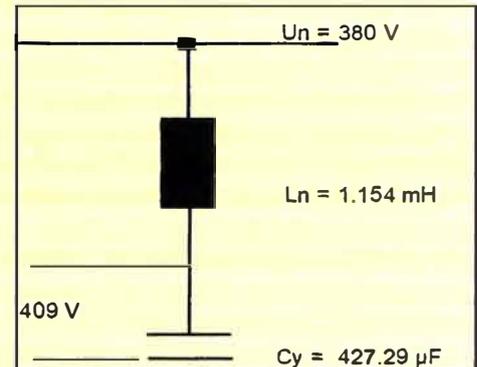


Fig. 6.10. Cálculos en la selección de banco con filtros desintonizados dado características del capacitor

INPUT:	Supply Voltage/ V + Overvoltage	Frequency/ Hz	Detuning Factor/ %	Filter Output/ kVAr
	380	60	7	25

$f_r = 227 \text{ Hz}$

## OUTPUT:

Capacitor voltage/ V:	409
Selected rated capacitor voltage/ V:	440
Capacitor output/ kvar:	31.17
$L_n$ / mH	1.154
$C_y$ / $\mu\text{F}$	427.31
$I_1$ / A	40.31
$I_3$ / A	1.43
$I_5$ / A	11.79
$I_7$ / A	5.09
$I_{\text{eff}}$ / A	42.33
$I_{\text{th}}$ / A	44.45
$I_{\text{lin}}$ / A	70.35

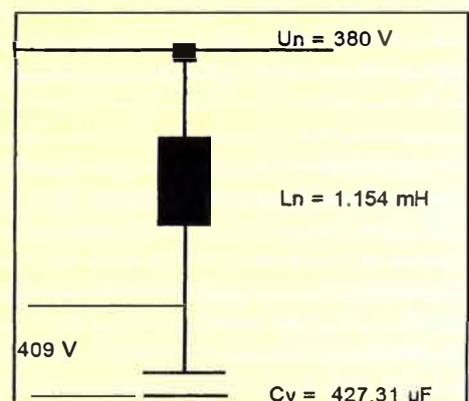


Fig. 6.11. Cálculos en la selección de banco con filtros desintonizados en base a potencia requerida por el filtro.

## CAPÍTULO VII

### PROYECTO DE COMPENSACIÓN ÓPTIMA DE ENERGIA REACTIVA

#### 7.1 Medición y Evaluación

Se realizó mediciones aguas arriba del Tablero General 380/220V-3F-5H-60HZ de la Subestación F, la cual forma parte del sistema eléctrico anillado que suministra y distribuye la energía eléctrica a la planta. Este Tablero es alimentado por dos transformadores en paralelo FT1 y FT2 de 1600KVA, 10/0.38-0.22KV, 3F, 60HZ, Dyn5,  $u_K = 5.2\%$ , cada uno (ver Fig B-1 de Anexo A: DIAGRAMA UNIFILAR).

La medición se realizó desde el martes 08 de Abril hasta el martes 22 de Abril del 2004, en dos etapas

- Transformador FT1, del 08 hasta al 10 de Abril; y
- Transformador FT2, del 10 hasta al 22 de Abril

Se utilizó el analizador de redes marca LEM, modelo Topas 1000, este instrumento fue instalado en la forma mostrada, por tener el secundario del transformador neutro corrido.

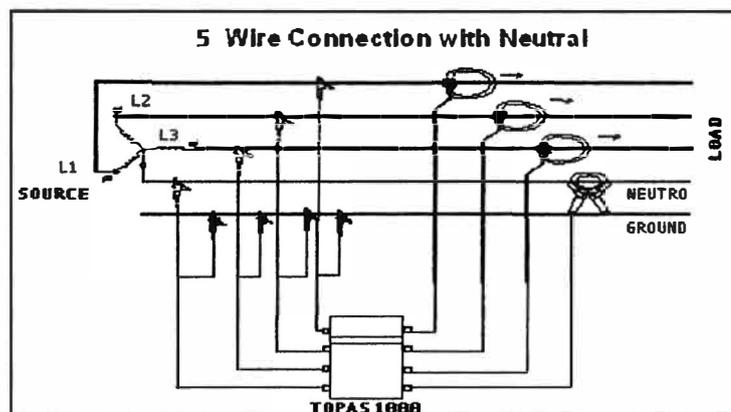


Fig 7.1 Conexión del analizador de redes Topas 1000 para el sistema 3F+N+G

## 7.2 Frecuencia De Resonancia $f_R$

Se puede hacer un cálculo aproximado para saber, donde se encuentra la frecuencia de resonancia:

$$f_R = 60 \sqrt{\frac{S_T \cdot 100}{Q_C \cdot u_K}}$$

$f_R$  = frecuencia de resonancia

$S_T$  = potencia transformador

$u_K$  = tensión de corto circuito

$Q_C$  = Potencia del Condensador

Se ve que la frecuencia de resonancia es una función de la capacidad del banco de condensadores. Esta capacidad puede variar. Las otras variables son constantes. Atención este resultado es solamente una acercamiento a la verdadera frecuencia de resonancia, no es exacto por que hay otros elementos significantes en el red que se tiene que considerar para un calculo exacto.

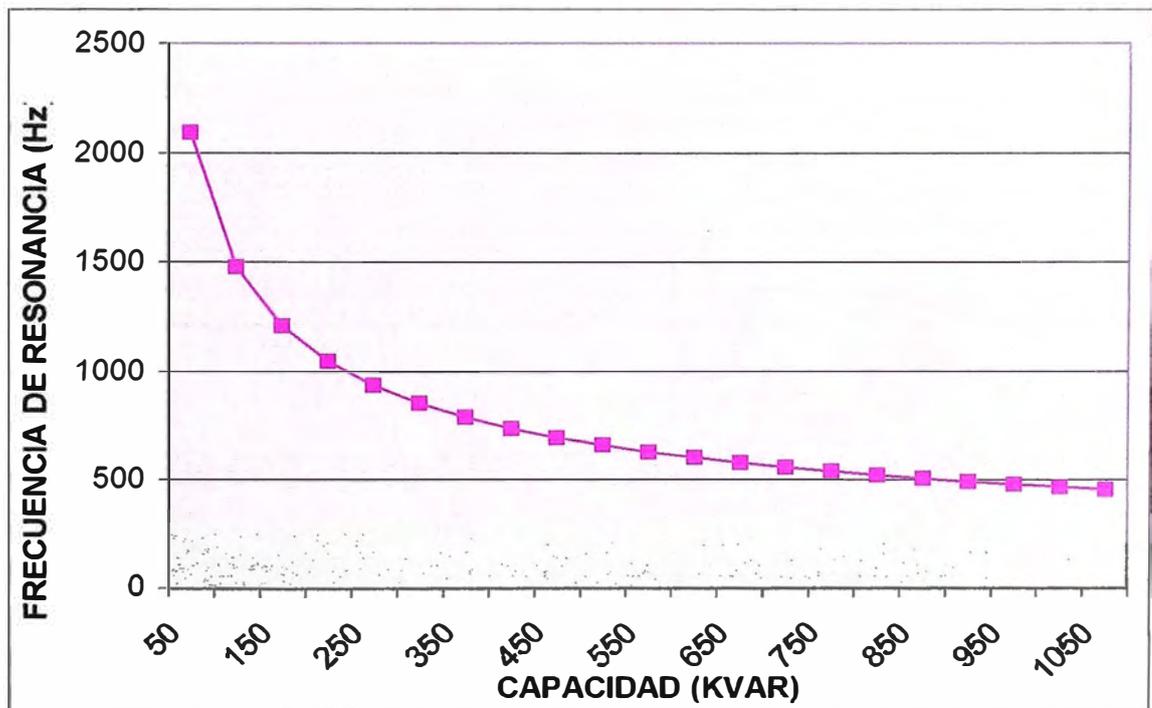


Fig. 7.3 Frecuencia de Resonancia del Sistema en función de Q

La frecuencia de resonancia es crítico para la 7<sup>th</sup> armónica, si se conectará la batería completa de condensadores existente de 1008 KVAR y se utilizará la potencia total de los transformadores que alimentan al tablero.

Luego de las mediciones se obtuvo los valores siguientes mostrados en los gráficos siguientes para los parámetros más importantes.

### Distorsión de la tensión en el tiempo



Fig. 7.5 Menú de THD V de Tensión

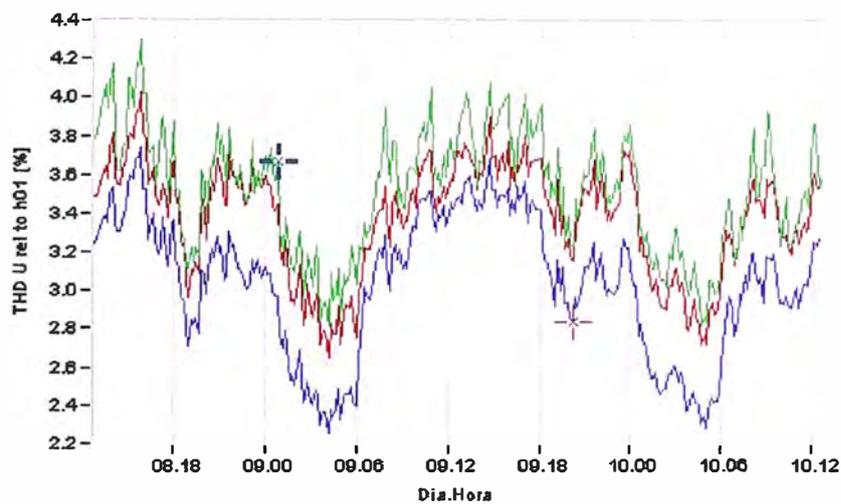


Fig. 7.6 THD V en la barra del Transformador FT1

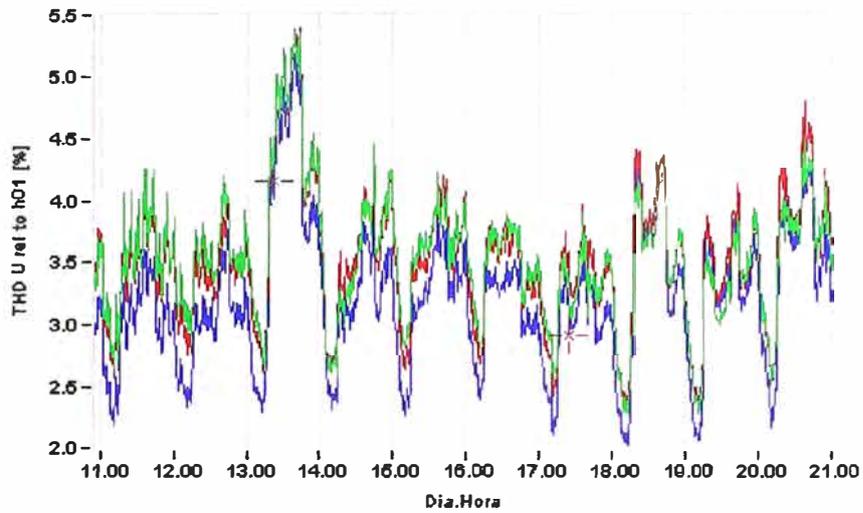


Fig. 7.7 THD V en la barra del Transformador FT2

EL Total Harmonic Distorsión (THD) tiene valores mayores al 3%, recomendado para una Planta industrial.

### Espectro de Distorsión de la Tensión

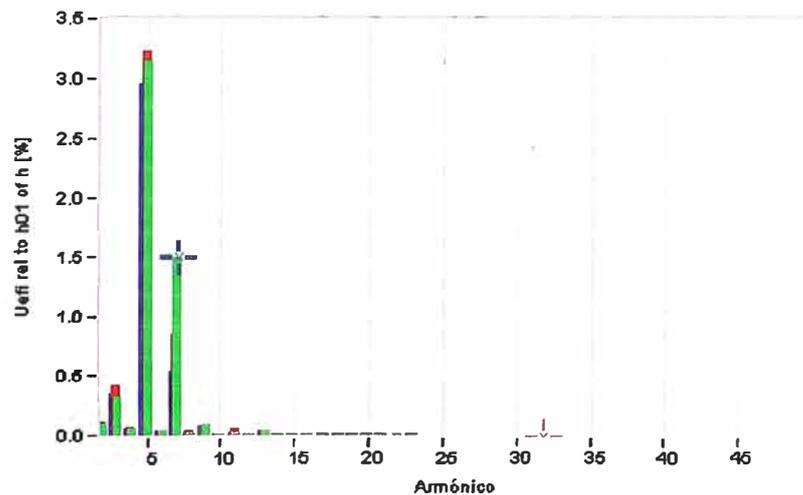


Fig. 7.8 Espectro De Distorsión De La Tensión En La Barra Del Transformador FT1

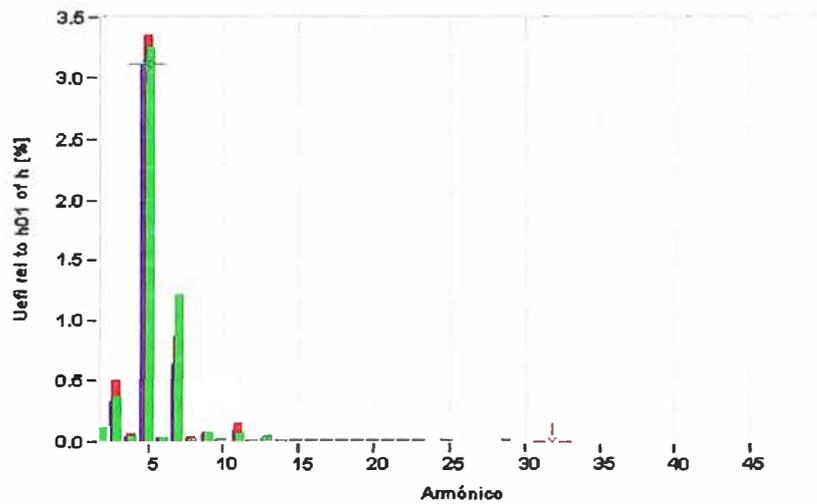


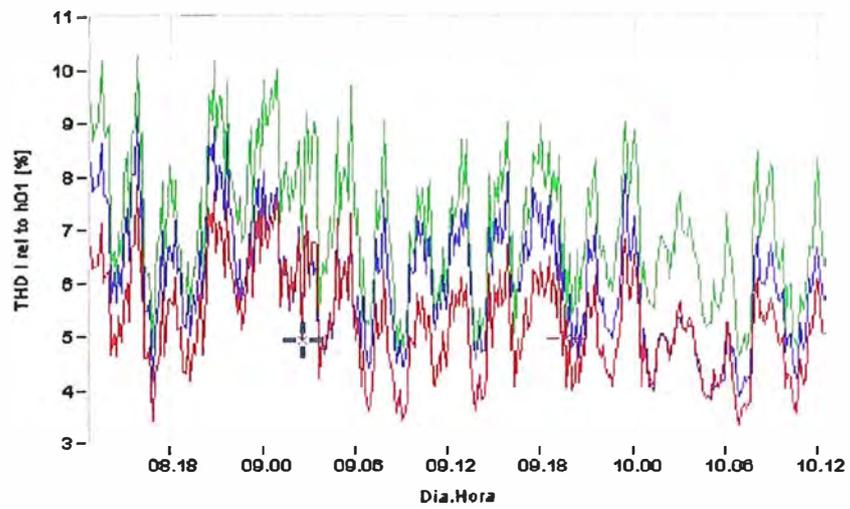
Fig. 7.9 Espectro De Distorsión De La Tensión En La Barra Del Transformador FT2

Es el espectro típico con una quinta armónica grande y las otras armónicas más pequeñas. Como se puede ver las armónicas importantes son:  $n = k * 6 \pm 1$ , generadas muchas veces por variadores de velocidad o por otras cargas no lineales.

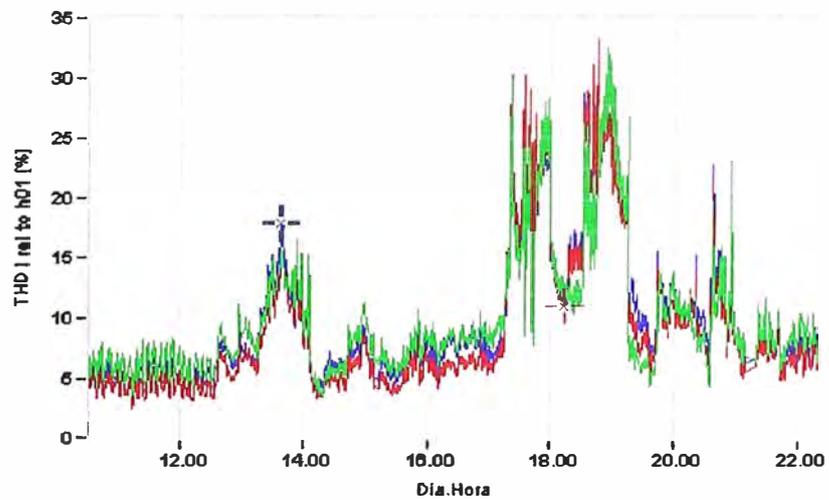
### Distorsión de la Corriente en el tiempo



Fig. 7.10 Menú de THD I de corriente.



*Fig. 7.11 THD I De Corriente En La Barra Del Transformador FT1*



*Fig. 7.12 THD I De Corriente En La Barra Del Transformador FT2*

### Espectro de Distorsión de la Corriente

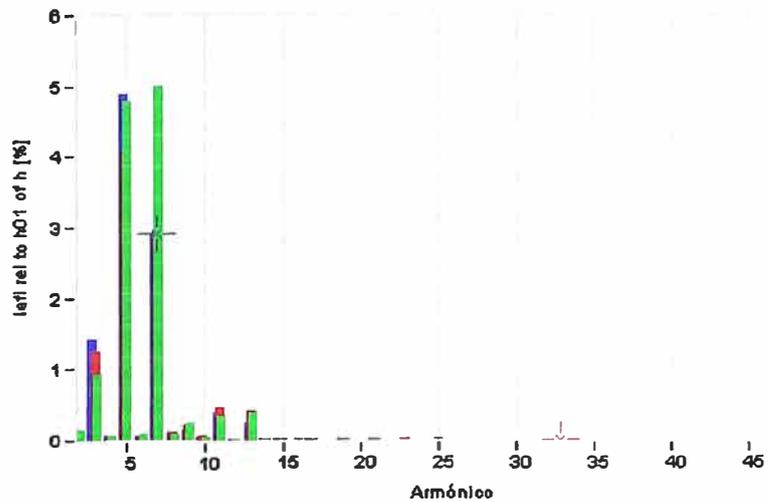


Fig. 7.13 Espectro De Distorsión De Corriente En La Barra Del Transformador FT1

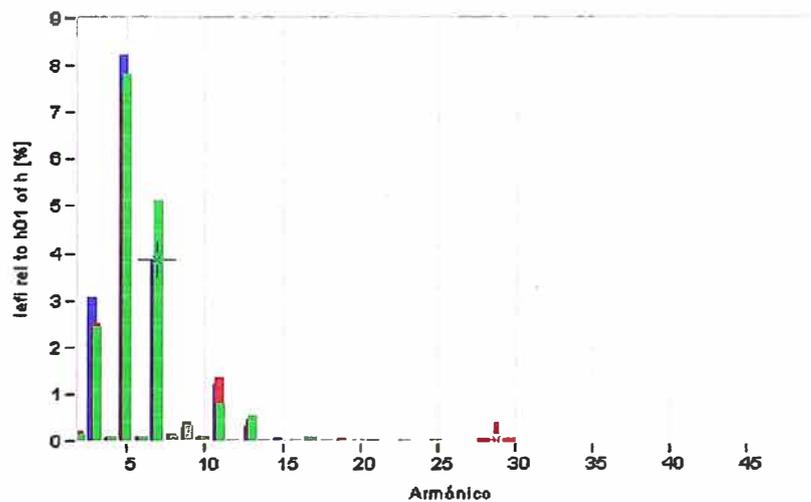


Fig. 7.14 Espectro De Distorsión De Corriente En La Barra Del Transformador FT2

Los valores son normales para una Planta con poca presencia de cargas no lineales. También podemos notar que la quinta armónica son las de mayor amplitud. Los valores obtenidos exigen un banco de condensadores protegido con Filtros de Rechazo con  $p=7$ .

## COS $\phi$ en el tiempo



Fig. 7.15 Menú de Cos phi en el tiempo

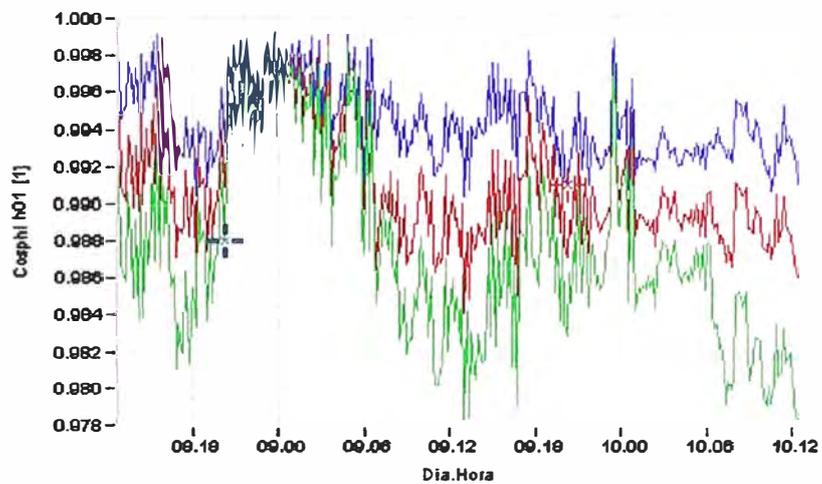


Fig. 7.16 Cos phi En La Barra Del Transformador FT1

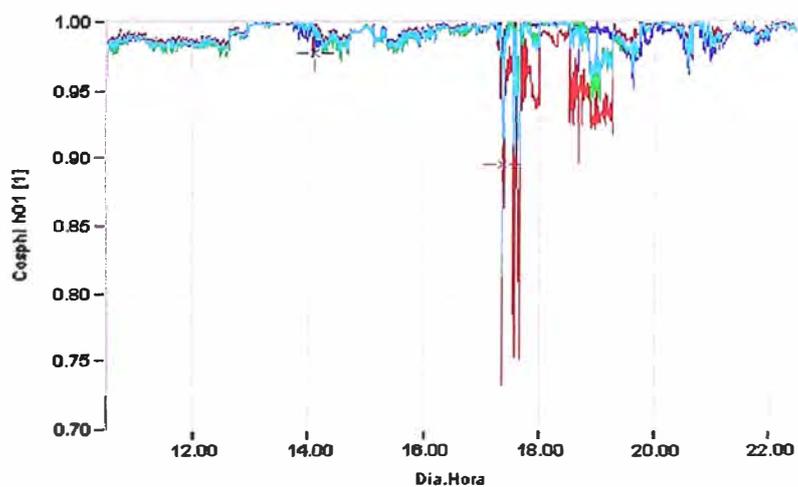


Fig. 7.17 Cos phi en la barra del Transformador FT2

El cos phi es bueno, la compensación esta corrigiendo adecuadamente el factor de potencia. En la próxima imagen se ve como se comporta el cos phi con la carga.

## Factor de potencia y la potencia en el tiempo



Fig. 7.18 Menú de factor de potencia y potencia total

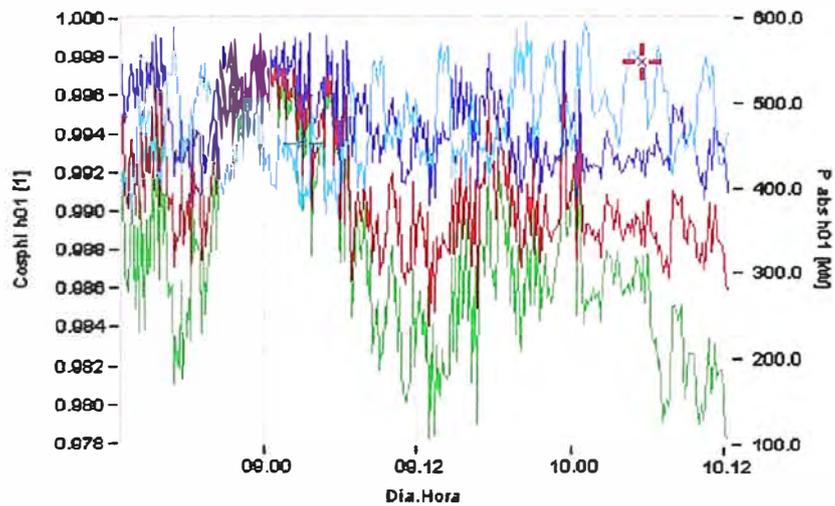


Fig. 7.19 Factor de potencia y potencia total en la barra del Transformador FT1

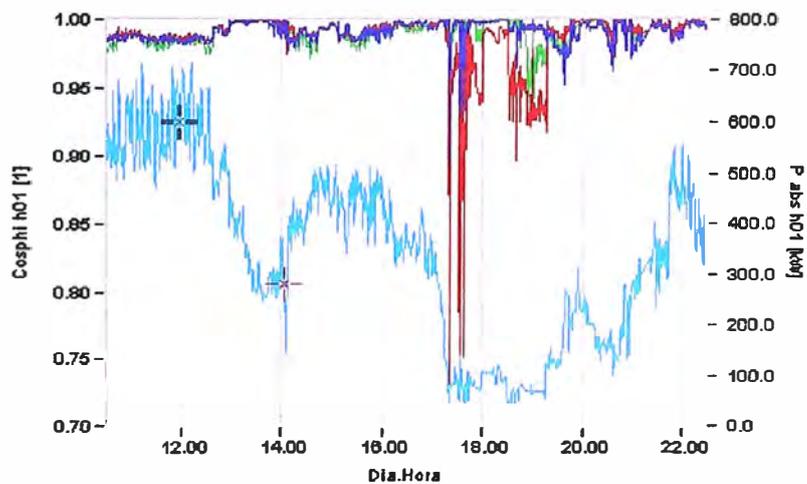
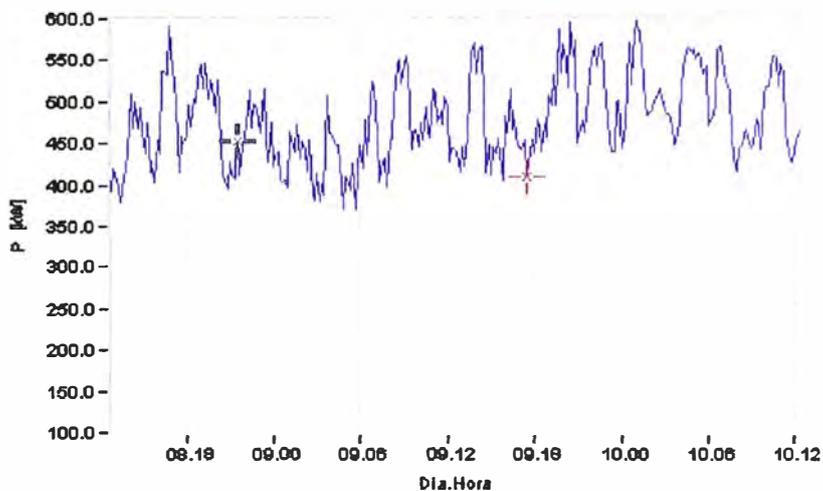
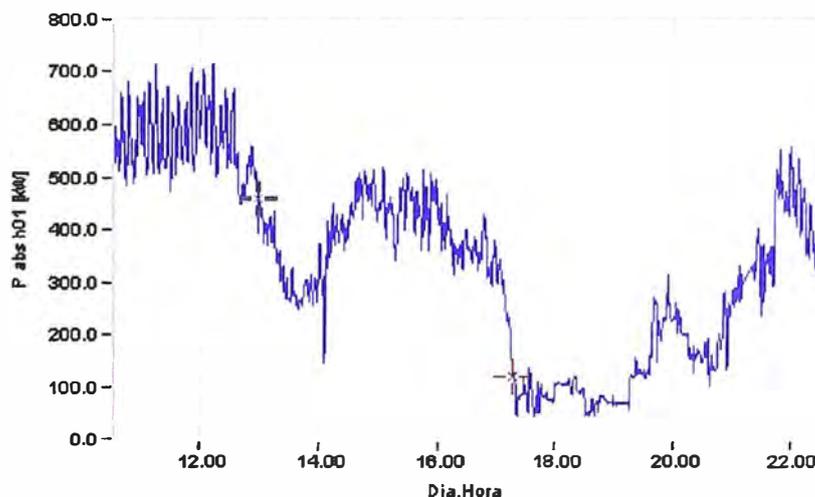


Fig. 7.20 Factor de potencia y potencia total en la barra del Transformador FT2

## Potencia en el tiempo



*Fig. 7.21 Menú De Potencia Activa En El Tiempo*



*Fig. 7.22 Potencia Activa En El Tiempo En Transformador FT2*

Ambos transformadores no se encuentran suministrando el 100% de su capacidad; bajo distintos escenarios podemos tener diferentes frecuencia de resonancia del sistema.

### Evaluación

El nivel de las armónicas observado puede hacer daño a un banco de condensadores, por esta razón se tiene que proteger el banco con Filtros de Rechazo con  $p=7$ . Las ramas de LC de los Bancos Automáticos proyectados tendrán una frecuencia de resonancia por debajo de la 5<sup>th</sup> armónica. El filtro también disminuye la tercera y la quinta armónica en la tensión en el rango de 20% a 30%.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

De lo obtenido podemos saber que pueden haber estado sucediendo resonancias locales para determinados valores de energía activa y reactiva de acuerdo al consumo del área comprometida.

Sin duda se tiene que instalarse filtros para evitar la peligrosa resonancia que pueda ocurrir. La transformación de un banco de condensadores sin protección, a un banco de condensadores con protección no es posible: ¡

Por esta razón se recomienda el reemplazo de los dos Bancos de Condensadores existentes. Las dos unidades nuevas de Bancos Automático de Condensadores con Filtros puede estar compuesto por los siguientes pasos:

2 pasos de 25 y 9pasos de 50 KVAR => potencia total del banco: 500KVAR

En las siguientes páginas se encuentran planos (ver Fig. A-2 Anexos: PLANO DE DISPOSICION MECANICA DE EQUIPOS), que le brindan una idea como serán las dimensiones del armario y como nuestra empresa hace la disposición de los filtros.

## CONCLUSIONES

1. La presencia de armónicos en las redes causa una serie de problemas de deterioro de la calidad de la onda de tensión y corriente.
2. En instalaciones donde existen equipos electrónicos no provistos de filtros especiales, es conveniente realizar un estudio muy detenido antes de proceder a la instalación de condensadores.
3. Aunque existen normas que limitan el consumo de armónicos, en la actualidad existen muchas instalaciones industriales cuyos consumos en corrientes armónicas están muy por encima de los límites aceptados; originando los problemas de distorsión de las ondas de tensión y corriente que originan costos o recargos adicionales a los consumos de energía contratada.
4. Ante la presencia de armónicos es necesario sobredimensionar las instalaciones de transmisión, ocasionando pérdidas adicionales significativas en comparación a las pérdidas propias de las instalaciones ya existentes.
5. Los armónicos tienen un costo significativo para las compañías distribuidoras, hasta el punto de que en muchos países se ha considerado la creación de un recargo sobre la tarifa de consumo; para compensar económicamente a las compañías por la infraestructura adicional de transporte y por las pérdidas.
6. Antes de instalar condensadores es recomendable efectuar un registro con la finalidad de graficar el Diagrama de Carga, verificar el porcentaje y tipo de armónicos presentes en el sistema eléctrico.
7. La Norma de Calidad permite una tasa de distorsión (TDH) con un límite máximo del 5 %, valores mayores ya pueden causar perjuicios a las máquinas eléctricas involucradas en el sistema.
8. Los filtros de armónicos son la alternativa que reducen la ondulación de la corriente a límites tolerables; para que los efectos de los armónicos no sea significativo.
9. Como siempre la solución es un compromiso entre la eliminación de la distorsión de corriente y el costo del filtro.
10. La eliminación total es muy costosa, pero la reducción hasta alcanzar los límites de compatibilidad es perfectamente justificable económicamente.

## **ANEXO A**

## CONSIDERACIONES PARA CFP DE ALTO RENDIMIENTO

Las 10 principales consideraciones para determinar un control de factor de potencia de alto rendimiento

1. Determine la potencia óptima (KVAR) del banco de condensadores de acuerdo al factor de potencia deseado.
2. Diseñe los pasos del condensador de tal manera que la sensibilidad del banco sea alrededor de 15-20% de la potencia disponible total. No es útil tener un banco más sensible que reacciona con un 5 o 10 % de la potencia total porque esto producirá alta cantidad de operaciones conmutaciones desaprovechando el equipo innecesariamente cuando el objetivo real es tener un alto promedio de PF.
3. Trate de diseñar el banco con los valores estándar del KVAR efectivo de pasos de potencia, preferentemente múltiplos de 25 KVAR.
4. Mida la presencia de corrientes armónicas en el cable del alimentador principal del sistema sin condensadores en toda posible condición de carga. Determine frecuencia y la amplitud máxima para cada armónico que podría existir.

Calcule la Distorsión armónica total de corriente

$$THD - I = 100 \cdot \frac{\sqrt{[(I_3)^2 + (I_5)^2 + \dots + (I_R)^2]}}{I_1}$$

Cálculen cada valor si existe

$$THD - I_R = 100 \cdot \frac{I_R}{I_1}$$

5. Mida la presencia de los voltajes armónicos que podrían venir de afuera de su sistema, si es posible médala en el lado de AT.

Calcule la Distorsión Armónica Total de Voltaje

$$THD - V = 100 \cdot \frac{\sqrt{[(U_3)^2 + (U_5)^2 + \dots + (U_N)^2]}}{U_1}$$

6. Si hay armónicos

¿ $THD - I > 10\%$  O  $THD - V > 3\%$  ?

(Medido sin condensadores)

- Si es afirmativo

Use PFC-DF y vaya a la consideración 7

- Negativo

Use PFC estándar y Sáltense consideraciones 7, 8 y 9

## 7. Hay contenido 3er armónico

$$¿ I_3 > 0.2 * I_5 ?$$

- Si es afirmativo

Use PFC-DF con  $p = 14\%$  y salte la consideración 8

- Negativo

Use PFC-DF con  $p = 7\%$  ó  $5.67\%$  y vaya a la consideración 8

## 8. THD-V es:

3-7% Use PFC-DF con  $P = 7\%$  de absorción estándar de armónicos

>7% Use PFC-DF con  $P = 5.67\%$  el para alta absorción de armónicos

>10% Solicite el diseño de filtro especial

## 9. Seleccione los componentes correctos

Los fabricantes proponen las tablas para PFC-DF de voltaje y frecuencia para los equipos estándar con estos determine el factor de desintonía  $p$  de su red

PFC-DF(power factor Control-Detuned filter)

## 10. Use siempre equipos garantizados específicamente diseñados en la aplicación de PFC-DF.

Observe que los reactores están especificados para su potencia efectiva y voltaje de red y frecuencia.

Este poder será el poder realmente efectivo del circuito LC en la frecuencia fundamental. Los condensadores para PFC-DF debe ser seleccionado para Un más alto rango de voltaje que la redes por el sobrevoltaje producido por la conexión serie con el reactor

Los contactores para condensadores son diseñado específico en la aplicación para reducir corrientes de condensadores del inrush y manipular cargas capacitivas en una forma optima.

## **ANEXO B**

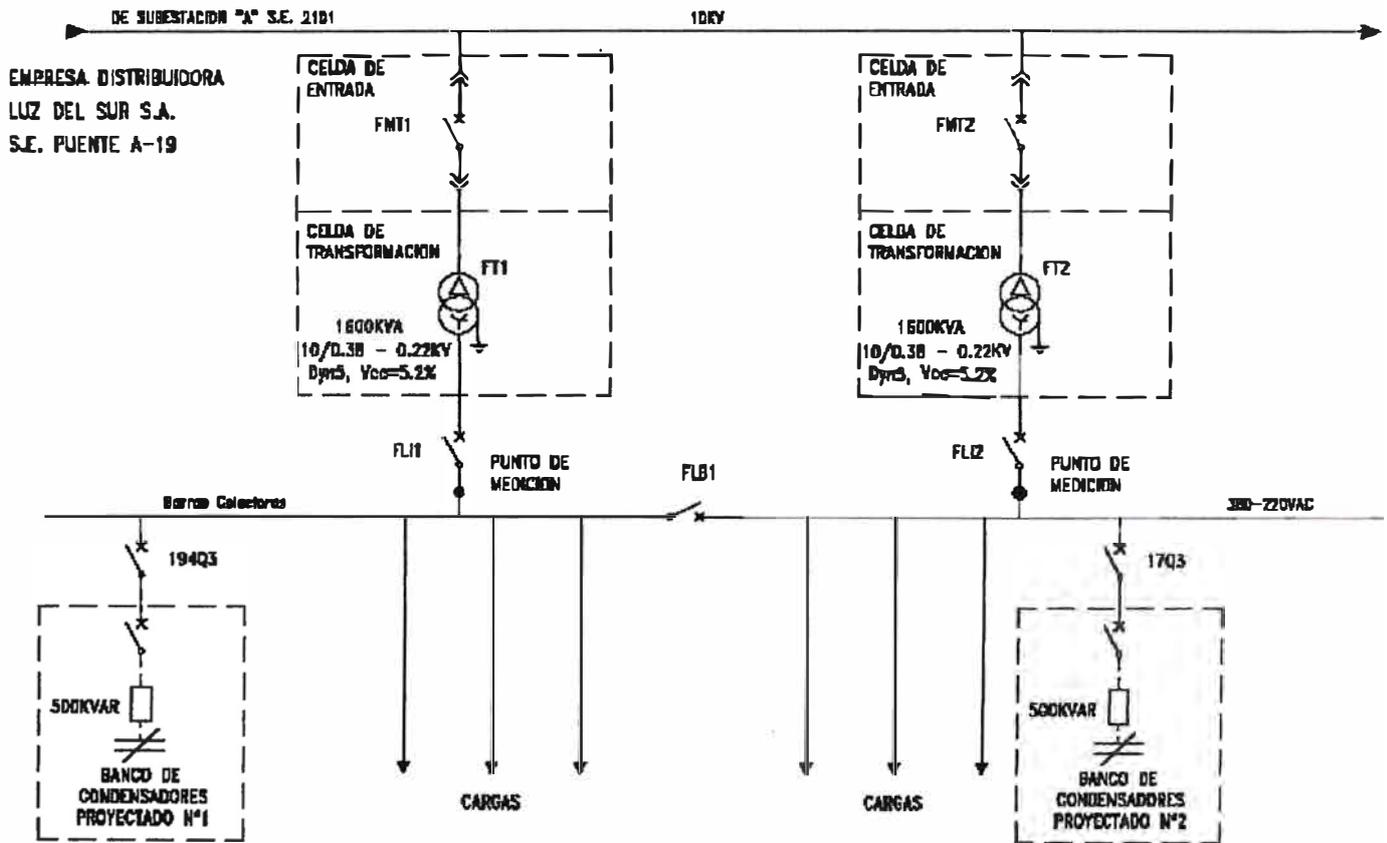


Fig. B-1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico evaluado y punto de medición

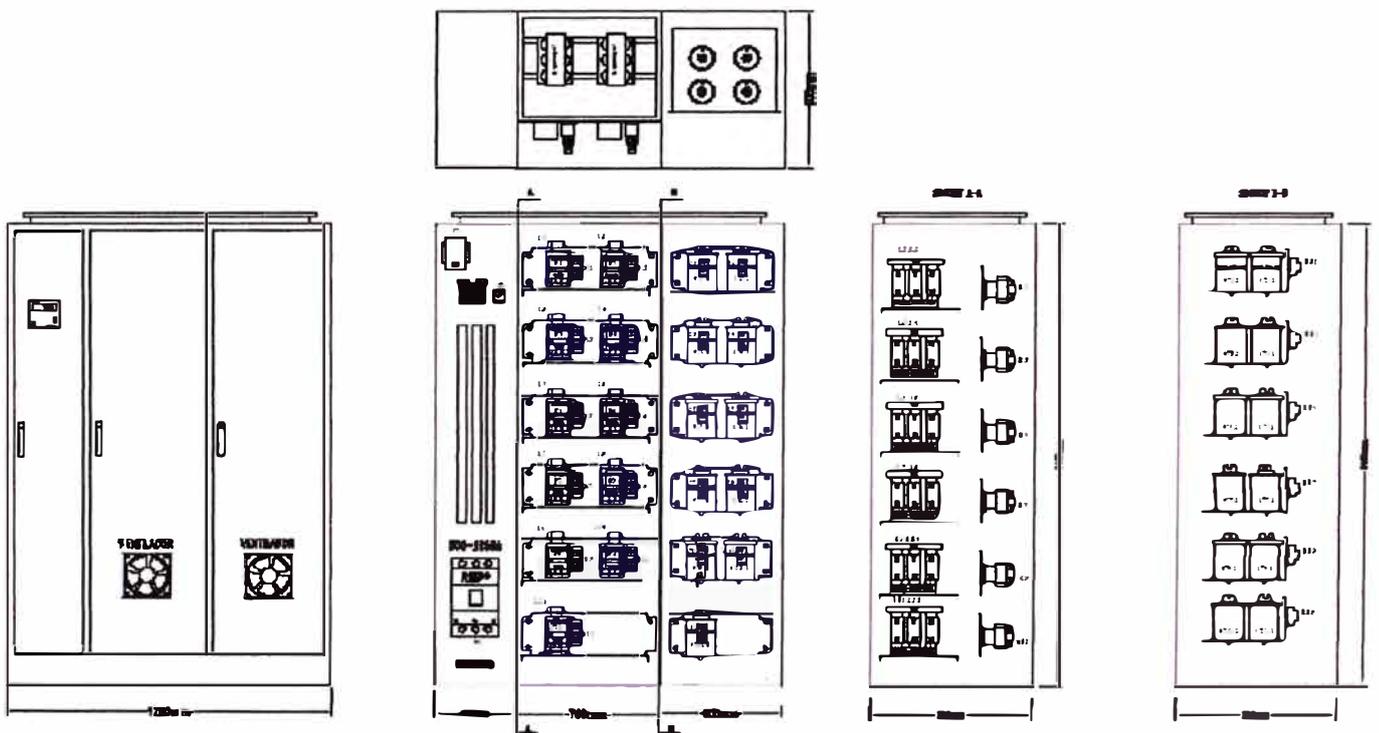
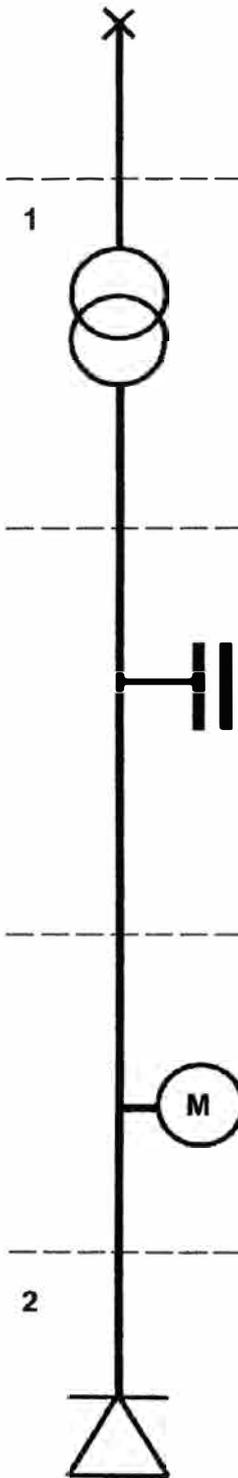


Fig. B-2 Plano mecánico del banco automático de condensadores con filtros desintonizados

## **ANEXO C**

cliente:  
obra:



**datos de la red**

- Scc: ..... MVA
- Un: ..... kV
- Importación de armónicos:  Sí  No

**transformadores**

TRAFO 1		TRAFO 2		TRAFO 3		TRAFO 4	
■ Sn	kVA						
■ U2	V						
■ Ucc	%						

■ Conexión secundario en paralelo:  Sí  No

**compensación de energía reactiva**

- Existente 
  - FIJA  kVAr.....
  - automática  kVAr.....
  - SAH o filtros  kVAr.....
  - Fs (Hz).....
- A calcular       ■ Cos φ deseado:.....

**cargas no generadoras de armónicos**

- Datos nominales carga:      ■ Pn: ..... kW      ■ Cos φ: .....
- Funcionamiento habitual carga:
  - 100 %     75 %     50 %     25 %
  - Pn: ..... kW      ■ Cos φ: .....

**cargas generadoras de armónicos**

- Tipo:      ■ Modelo:      ■ Pn: ..... kW      ■ N.º: .....
- Punto de medición:  1       2

	h1	h3	h5	h7	h11	h13	h	h	h	h	Σ THD
In (A)											
Ih (%)											
Uh (%)											

Fig C-1 Ficha para realización de un pre estudio de armónicos. [7]

## **ANEXO D**

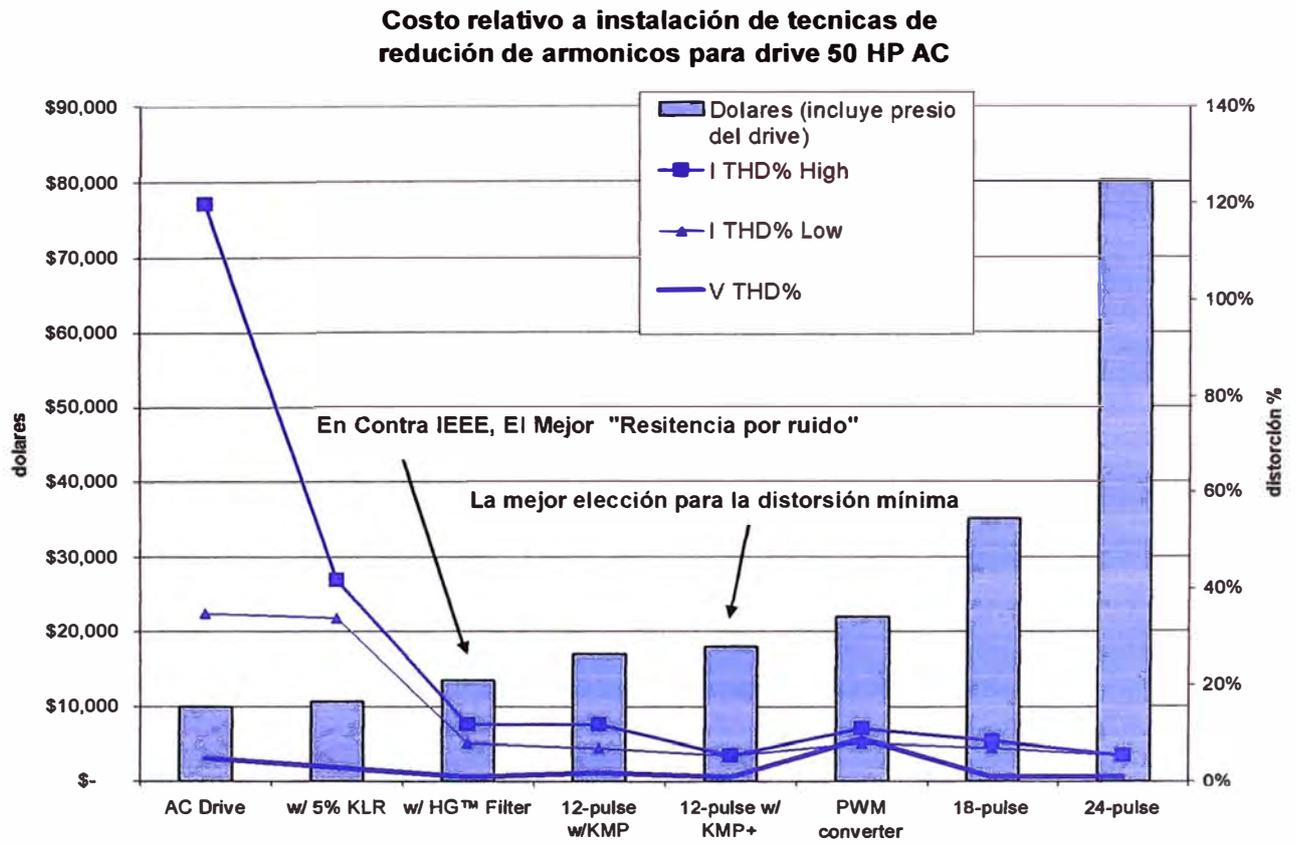


Fig. D-1 Costo relativo a instalación de técnicas de reducción de armónicos para drive 50 HP AC

## ABREVIATURAS

wR	Frecuencia angular de resonancia
C	Capacitancia
ek	Impedancia en % de la tensión nominal
f	Frecuencia
res	Frecuencia de resonancia
I	Corriente
IL	Corriente total de todas las armónicas
ILIN	Límite de la linealidad del núcleo
IRMS	Corriente eficaz
IV	Corriente de la armónica número v
k	Constante natural
L	Inductancia
LN	Valor de fase de la inductancia
NC	Potencia total del banco
nP	Número de pulsos
P	Potencia Activa
p	Factor de desintonía
QC	Potencia del capacitor crítica
QCL	Potencia de compensación fija en el secundario del transformador
S <sup>”</sup> K	Potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la carga armónica
SN	Potencia nominal del transformador
ST	Potencia del transformador
U	Tensión
UC	Aumento de tensión
uS	Tensión de cortocircuito del transformador en %
UN	Tensión nominal del suministro
v	Orden de la armónica
XC	Reactancia capacitiva
XL	Reactancia inductiva
Z	Impedancia de la red

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Publication EPCOS 'Harmonics And Power Factor Correction' 2004.
- [2] Product Profile EPCOS AG 'Power Factor Correction' 2003-2004.
- [3] Publication Siemens. 'Manual De Baja Tensión' 2da edición 2000.
- [4] Publication Siemens Matsushita 'Components Capacitors for Power Factor Correction and Filtering' November 2000.
- [5] Norma IEEE 519-1992 "Recommended practiques and Requirements for Harmonic Control in Electrical power Systems"1992.
- [6] Robert Capella 'Corrección del factor de potencia' Publicación Técnica Schneider: PT-075 Edición: Octubre 2000.
- [7] Publicación Técnica Schneider 'Guía Técnica De La Distribución Eléctrica En Baja Tensión' Cap 5 Detección y filtrado de armónicos Schneider Electric 2001.
- [8] Pedro Avelino Pérez 'Transformadores de Distribución' Ediciones Reverte 2da Edicion 2001.
- [9] Julio Asatigarra 'Hornos De Arco Para Fusión De Acero' Ediciones McGRAW HILL Octubre 1998.