



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN LAS
REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

JUAN EDGAR LÓPEZ ROMERO

ASESOR: ING. JAIME FUENTES SANCHEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

2005.

m. 344824



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

UNIVERSIDAD NACIONAL
 AUTÓNOMA DE
 MÉXICO

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Las Corrientes Armónicas en las Redes de Distribución Eléctrica.

que presenta el pasante: Juan Edgar López Romero
 con número de cuenta: 09202971-6 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de abril de 2005.

PRESIDENTE Ing. José Luz Hernández Castillo

VOCAL Ing. Julio César Vázquez Fuentes

SECRETARIO Ing. Jaime Fuentes Sánchez

PRIMER SUPLENTE Ing. Leonardo Sergio Lara Flores

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Albino Arteaga Escamilla

✂ En memoria de mi Padre y Abuelo, que eternamente estarán presentes en mi mente y en mi corazón.

♥ Muy en especial a mi Madre, Abuela y Hermanos, que sin su apoyo, comprensión y cariño no lo hubiera logrado, los amo.

📖 A los profesores y sobre todo a mi asesor de tesis, ya que me han proporcionado los elementos esenciales para desarrollarme en el ámbito profesional.

☐ A todos mis compañeros que he conocido durante mis años de estudiante, por haber compartido experiencias juntos, pero sobretodo por su amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

OBJETIVOS E INTRODUCCIÓN	1
I. FUNDAMENTOS	5
I.1. Ondas Senoidales	6
I.1.1. Sistema de Tres Fases (Trifásico)	10
I.1.1.1. Distribución en Tres Fases	10
I.1.1.2. Arreglos Comunes de un Sistema Trifásico	11
I.1.1.2.a. Conexión Estrella	12
I.1.1.2.b. Conexión Delta	12
I.2. Valor Medio y Valor Eficaz (r.m.s.)	13
I.2.1. Valor Medio	13
I.2.2. Valor Eficaz (r.m.s.)	17
I.3. Potencias y Factor de Potencia	21
I.3.1. Potencia en una Carga Lineal Alimentada con una Señal Senoidal	21
I.3.2. Potencia Activa y Reactiva Instantáneas	23
I.3.3. El Factor de Potencia	25
I.3.3.1. Factor de Potencia en relación a la carga alimentada	25
I.3.3.2. Medición del Factor de Potencia	26
I.3.3.2.a. Medición en un Circuito de una sola fase (Monofásico)	26
I.3.3.2.b. Medición en un Circuito Trifásico Balanceado	27
I.3.3.2.c. Medición en Tres Fases en un circuito Desbalanceado	30
I.3.3.3. Consumo de Corriente en relación con el Factor de Potencia	30

I.4.	Armónicas	33
I.4.1.	Definición	33
I.4.2.	Aplicación de la serie de Fourier al análisis de circuitos eléctricos	34
I.4.3.	Tipos de Armónicas	37
II.	EFFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS	38
II.1.	Fuentes Emisoras de Corrientes Armónicas	39
II.2.	Propagación de las Corrientes Armónicas en las Redes de Distribución Eléctrica	41
II.3.	Problemas Generados por las Corrientes Armónicas	44
II.3.1.	Múltiples Cruces por Cero en las Ondas de Tensión ó de Corriente	45
II.3.2.	Sobrecalentamiento de los Equipos Eléctricos	46
II.3.2.1.	Sobrecalentamiento y Pérdidas de Energía en los Transformadores	46
II.3.2.2.	Sobrecalentamiento y Pérdidas de Energía en los conductores Eléctricos	48
II.3.3.	Fallas en Capacitores	49
II.3.3.1.	Resonancia en Serie	55
II.3.3.2.	Problemas con un Factor de Potencia Bajo	59
II.3.3.2.1.	Pérdidas en los Cables	60
II.3.3.2.2.	Pérdidas en un Transformador	64
II.3.3.2.2.a.	Pérdidas en el Embobinado (Cobre ó Aluminio)	65
II.3.3.2.2.b.	Pérdidas en el Núcleo	67
II.3.3.2.3.	Potencia Aparente Disponible en un Transformador	69

III.	MEDIDAS DE CORRECCIÓN	71
III.1.	Medición y Análisis de Corrientes Armónicas	72
III.1.1.	Parámetros de Medida	72
III.1.1.1.	Espectros Discretos de Amplitud y de Fase	72
III.1.1.2.	Factores de Distorsión	72
III.1.1.2.a.	Factor de Distorsión Armónica Total de Voltaje	73
III.1.1.2.b.	Factor de Distorsión Armónica Individual de Voltaje	74
III.1.1.2.c.	Factor de Distorsión Armónica Total de Corriente	74
III.1.1.2.d.	Factor de Distorsión Armónica Individual de Corriente	75
III.1.2.	Medición de Armónicas	76
III.1.2.1.	Analizadores de Armónicas	79
III.2.	Posibles Soluciones	80
III.2.1.	La Elección del Equipo más Adecuado	80
III.2.2.	Medidas que tienden a Bloquear el Paso de las Corrientes Armónicas	83
III.2.2.1.	Protección a Bancos de Capacitores	83
III.2.2.1.1.	Dispositivos de Bloqueo	84
III.2.2.2.	Reactores de Choque	87
III.2.2.3.	Transformador Estrella / Delta	88
III.2.2.4.	Transformador Zig – Zag	90
III.2.2.5.	Transformador de Aislamiento	91
III.2.2.6.	Bloqueo de 5ª y 7ª Armónica	91
III.2.3.	Medidas que Tienden a Bloquear y/o Absorber las Corrientes Armónicas	94
III.2.3.1.	Filtros de Absorción	94
III.2.3.1.1.	Filtros Antirresonantes	99

III.2.3.1.1.1.	Filtros Antirresonantes Fijos	100
III.2.3.1.1.2.	Filtros Antirresonantes Automáticos	101
III.2.3.1.2.	Filtros Sintonizados	102
III.2.3.2.	Filtros de Rechazo	102
III.2.3.3.	Compensadores Estáticos	103
III.2.4.	Medidas Tendientes a Sobredimensionar	105
III.2.4.1.	Sobredimensionamiento del Neutro	105
III.2.4.2.	Transformador Tipo K	106
III.2.4.2.1.	Factor K	106
IV.	CASO PRÁCTICO	108
IV.1.	Antecedentes	109
IV.1.1.	Descripción de la Empresa	109
IV.2.	Desarrollo del Proyecto	109
IV.2.1.	Mediciones en Transformador Principal en el lado de Baja Tensión	110
IV.2.1.1.	Gráficas de los Parámetros Principales	110
IV.2.1.2.	Cuadro de Mediciones	114
IV.2.2.	Anomalías Detectadas	114
IV.2.3.	Objetivos a Alcanzar	115
IV.2.4.	Selección del Equipo más adecuado	115
IV.2.4.1.	Dimensionamiento del Equipo (Filtro de Armónicas)	115
IV.3.	Estimación de Ahorros	117
CONCLUSIONES		124

APÉNDICE	127
BIBLIOGRAFÍA	137

OBJETIVOS

E

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

- ✓ Conocer las causas, propagación y consecuencias de las Corrientes Armónicas en las Redes de Distribución Eléctrica.
- ✓ Presentar las diferentes medidas de control ó eliminación de las Corrientes Armónicas.
- ✓ Mostrar un caso práctico de un sistema con alto nivel de Corrientes Armónicas, así como la solución a este problema y los beneficios económicos obtenidos.

INTRODUCCIÓN

Cuando se aplica una onda senoidal de voltaje a una carga lineal, la totalidad de la onda de corriente ocurre a la misma frecuencia base que la del voltaje aplicado. Así, al aplicar una onda de voltaje de 60 Hz, a través de una carga lineal, únicamente se producirá una onda de corriente a 60 Hz.

Los equipos eléctricos de potencia: transformadores, interruptores, fusibles, motores, capacitores, etc., así como los de medición y control en general, son diseñados, normalizados y probados para corrientes sinusoidales prácticamente perfectas. Los códigos de instalación de estos equipos y sistemas se han elaborado, desde muchos años atrás, con el mismo criterio.

Pero esta situación cambia drásticamente cuando la carga es no lineal. Debido a su característica no lineal, al aplicar una onda de voltaje de 60 Hz, a través de ella, se producen corrientes a más de una frecuencia. Las frecuencias que se producen son múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental (60Hz, en nuestro caso). Por ejemplo, en un sistema eléctrico con una carga no lineal conectada se pueden producir corrientes simultáneas y reales en 60 Hz. Estas corrientes se llaman **CORRIENTES ARMÓNICAS**.

El incremento acelerado del uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos, debido principalmente al auge de la electrónica de potencia en estos últimos años, ha permitido un uso más eficiente de la energía eléctrica y aumentos considerables en la productividad de los procesos industriales pero, por otra parte, ha provocado, una situación problemática, a veces grave, donde las corrientes armónicas generadas por los propios equipos eléctricos distorsionan la onda de corriente sinusoidal original y perturban la operación de estos mismos equipos, provocan además, calentamientos excesivos y pérdidas de energía en máquinas eléctricas, conductores y demás, equipos del sistema eléctrico.

El problema no solo puede sufrirlo el propio usuario propietario de los equipos generadores de corrientes armónicas, sino que a través de las líneas de distribución y de transmisión puede propagarlo a otros usuarios de la red eléctrica, creando así una responsabilidad para sí mismo y para la compañía suministradora.

Una vez más, el progreso tecnológico ha traído consigo una contaminación grave del medio (eléctrico, en este caso) que es preciso aprender a controlar a base de una tecnología adecuada.

La Industria pierde millones de dólares cada año debido a las armónicas, ya que poco se sabe sobre cuales son sus causas y la mejor manera de reducirlas. Hay dos tipos de distorsión armónica, corriente y tensión. Cuando hablamos de la distorsión de la corriente, generalmente hablamos de la entrada, y cuando discutimos la distorsión armónica de tensión nos referimos a la salida. Cuando la corriente armónica de distorsión pasa a través de una impedancia produce distorsión de tensión la cual se transmite a todas partes donde llega.

En la actualidad, fluctuaciones lentas o rápidas del voltaje, fluctuaciones lentas o rápidas de la frecuencia, desbalance en los sistemas trifásicos, oscilaciones del neutro, el ruido eléctrico, así como la presencia de la distorsión de voltajes o corrientes en el suministro de la energía constituyen temas de interés dentro del marco de la calidad de la potencia eléctrica.

La baja calidad en el suministro de la energía eléctrica puede ser determinante en el mal funcionamiento de equipos y dispositivos de control o medición, el exceso de calentamiento en las máquinas, fallas del equipo eléctrico o disminución drástica de la eficiencia. Estos son factores que pueden influir grandemente, no sólo en la eficiencia de los procesos de producción, sino también en la competitividad de una empresa.

CAPÍTULO I

“FUNDAMENTOS”

I. Fundamentos

I.1. Ondas Senoidales

Una onda senoidal pura, sería la proporcionada por un generador ideal o las ondas de tensión y de corriente que detectaríamos en los sistemas eléctricos, si, además de estar alimentados por fuentes ideales de tensión o de corriente, contarán con cargas idealmente lineales.

Para efectuar análisis y cálculos en los sistemas eléctricos por los que fluyen las ondas corriente impulsadas por fuentes sinusoidales, o sea, fuentes de corriente o de tensión de forma senoidal pura, resulta práctico representar estas ondas por medio de números complejos sometidos a una rotación alrededor del origen de los ejes real e imaginario (Figura 1.1). A la amplitud de estos números complejos afectada por el ángulo de rotación, se le denomina fasor, siendo este un número complejo que al rotar define cada onda senoidal particular representada en el fenómeno y al mismo tiempo, independientemente del momento en que se observe el flujo de las ondas de corriente, define las relaciones de amplitud y fase existentes entre todas las ondas involucradas.

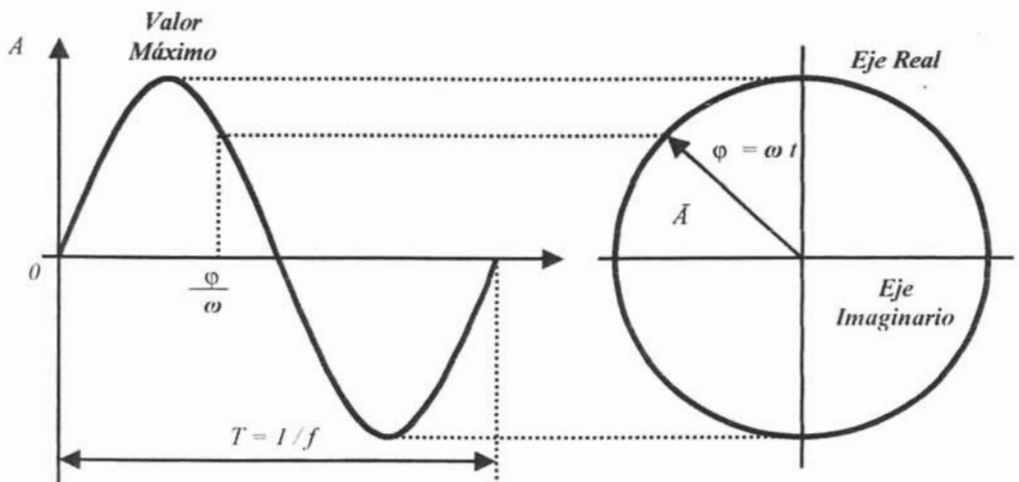


Figura 1.1

Representación Fasorial de una Función

De donde:

A = Valor máximo de la función senoidal

$\varphi = \omega t$ = Ángulo de la función senoidal

t = Tiempo en segundos (s)

\hat{A} = Notación Fasorial (Magnitud Absoluta)

T = Periodo de la Señal Senoidal. Determinado en segundos (s)

f = Frecuencia (Hz)

Las fuentes senoidal de tensión o de corriente son aquellas que pueden representarse con funciones trigonométricas de seno o coseno, o bien por medio de fasores. Las fuentes senoidales de tensión pueden construirse fácilmente en la práctica para generar grandes cantidades de energía eléctrica.

Por otra parte es importante notar bajo el punto de vista analítico que las funciones senoidales son las únicas funciones periódicas reales cuyas derivadas y función integral tienen la misma forma de onda que la función original. Esto ocasiona que la respuesta estacionaria de cualquier circuito lineal sometido a excitación por fuentes senoidales sea también una función senoidal, independientemente del número de elementos interconectados con el circuito.

Una onda de corriente alterna de forma senoidal puede ser representada en forma general, partiendo de la base de que su valor varía con respecto al tiempo, de la siguiente manera:

$$\text{Señal Alterna de Forma Senoidal} = F(t) = A \text{ seno } \varphi \quad (1.1)$$

De donde:

A = Valor Máximo de la Señal Senoidal (el cual podrá ser positivo o negativo)

seno φ = Seno del Ángulo (φ)

Aplicando este concepto a, el voltaje y al amperaje tenemos:

$$\text{Voltaje de Corriente Alterna (c.a.)} = V(t) = V \text{ seno } \varphi \quad (1.2)$$

$$\text{Amperaje de Corriente Alterna (c.a.)} = i(t) = I \text{ seno } \varphi \quad (1.3)$$

De donde:

V = Valor máximo de voltaje

I = Valor máximo de amperaje.

La energía eléctrica es suministrada a los usuarios en un voltaje de Corriente Alterna (C.A.), cuya forma de onda se muestra en la Figura 1.2.

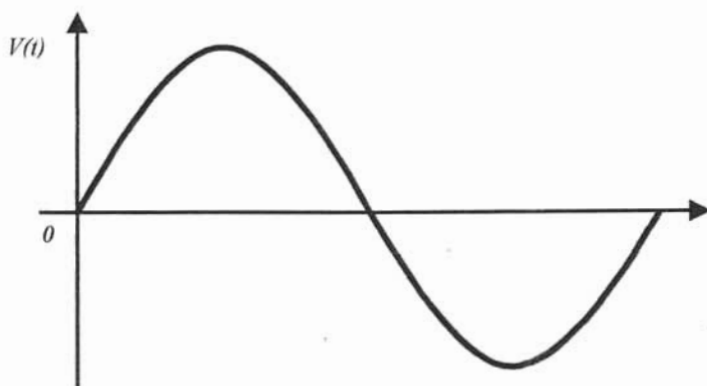


Figura 1.2
Señal Senoidal de Voltaje

De donde:

$V(t)$ = Voltaje de Corriente Alterna.

T = Tiempo expresado en segundos (s).

Este voltaje alterno varía continuamente entre un máximo positivo y un máximo negativo. Un ciclo completo incluye una alternancia positiva y una negativa. El número de ciclos por segundo es la frecuencia la cual es designada con el símbolo "f" y se expresa en unidades de Hertz (Hz). Tal como se ilustra en la Figura 1.3.

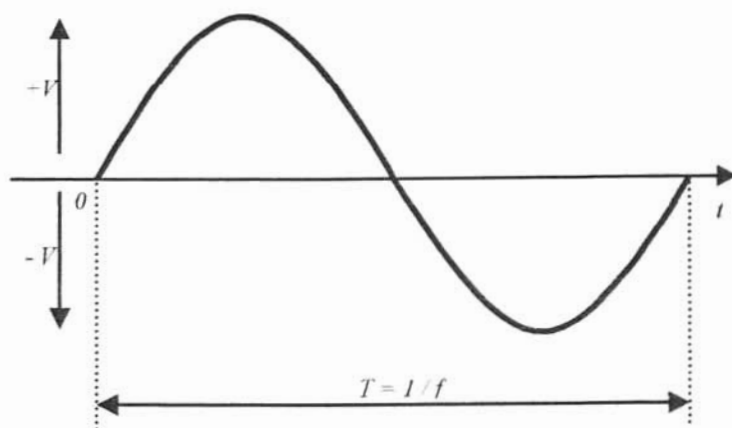


Figura 1.3

Ciclo Completo de una señal senoidal de voltaje

De donde:

+V = Voltaje Máximo Positivo.

-V = Voltaje Máximo Negativo.

T = Periodo de la señal alterna, el cual se obtiene de dividir la frecuencia (f) de la señal, entre la unidad, dando como resultado u valor expresado en segundos (s).

La estandarización de la frecuencia fue iniciada antes de la 1ª Guerra Mundial, pero no se pudo terminar dadas las condiciones de la guerra; 50 y 60 Hz son las dos frecuencias usadas a través de todo el mundo hoy en día.

En el continente americano se utiliza 60 Hz, excepto en Argentina, Bolivia, Chile, Uruguay, Paraguay y en diversas colonias e islas Francesas e Inglesas que ocupan 50 Hz.

Por el contrario en el resto del mundo es utilizada territorialmente en mayor cantidad la frecuencia de 50 Hz y solo en algunos lugares como, Liberia, Corea, Las Filipinas, Taiwán y en algunas regiones de Arabia Saudita y Japón se emplea 60 Hz.

Los voltajes están en el rango de 190 a 660 Volts, pero predominantemente entre 380 y 415 Volts.

En México los voltajes de alimentación en baja tensión son suministrados en 127, 220 y 440 Volts a frecuencia de 60 Hz.

1.1.1 Sistema de Tres Fases (Trifásico)

1.1.1.1. Distribución en Tres Fases

Un sistema se describe como un sistema trifásico balanceado, cuando se compone de un grupo de 3 voltajes, con el mismo período y el mismo valor efectivo o eficaz (r.m.s.) desfasados entre ellos por un $1/3$ del período (120° eléctricos). La Figura 1.4, ejemplifica las ondas sinusoidales de un sistema trifásico.

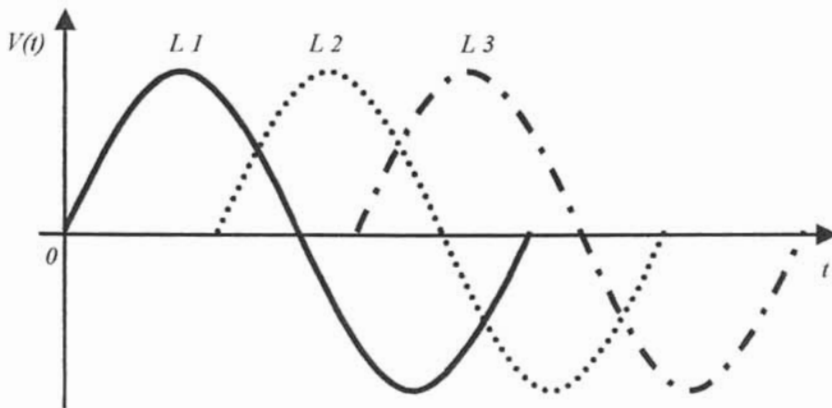


Figura 1.4
Sistema Trifásico

De donde:

$L1, L2$ y $L3$ = Señales Senoidales desfasadas entre sí 120° eléctricos, las cuales forman un Sistema Trifásico.

A fin de que el sistema pueda ser posible, es obvio que la suma algebraica de las corrientes debe ser nula durante cualquier intervalo de tiempo.

Cuando se aplica una onda senoidal de voltaje a una carga lineal, la totalidad de la onda de corriente ocurre a la misma frecuencia base que la del voltaje aplicado. Así, al aplicar una onda de voltaje de 60 Hz, a través de una carga lineal, únicamente se producirá una onda de corriente a 60 Hz.

1.1.1.2. Arreglos Comunes de un Sistema Trifásico

La carga puede ser conectado ya sea con un punto común (en estrella) ó en serie (en delta).

En la Figura 1.5, se representa en forma grafica los devanados de un motor trifásicos, esto con la finalidad de ejemplificar las conexiones más usuales en un sistema de distribución eléctrica.

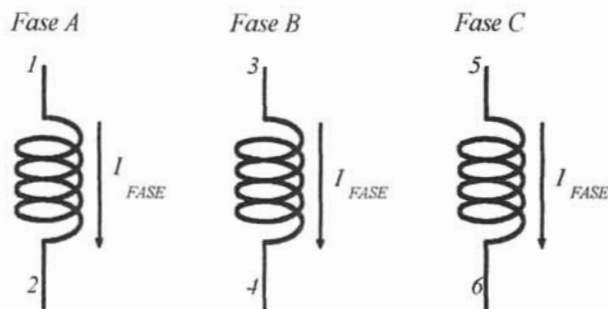


Figura 1.5

Representación Grafica de los Devanados de un Motor Trifásico (Carga)

1.1.1.2.a. Conexión Estrella

En una conexión estrella (Figura 1.6), el voltaje entre líneas (fases) es igual a $\sqrt{3}$ veces el voltaje por fase y la corriente principal es igual a la corriente de fase.

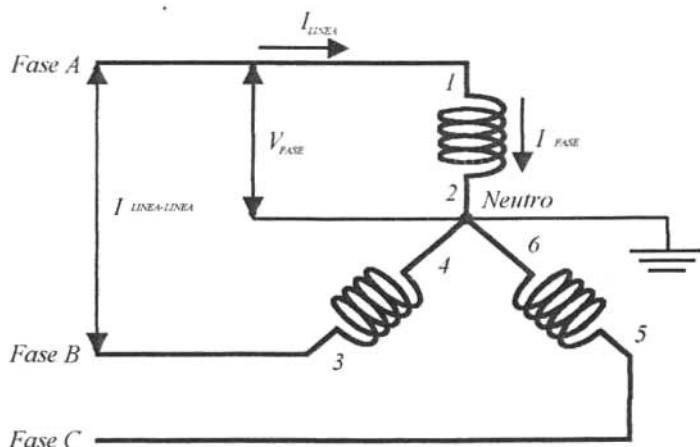


Figura 1.6
Conexión Tipo Estrella

De donde:

$$V_{LINEA-LINEA} = \sqrt{3}V_{FASE} \quad (1.4)$$

$$I_{LINEA} = I_{FASE} \quad (1.5)$$

1.1.1.2.b. Conexión Delta

En una conexión delta (Figura 1.7), los voltajes de fases son iguales, la corriente principal es igual a $\sqrt{3}$ veces la corriente de fase.

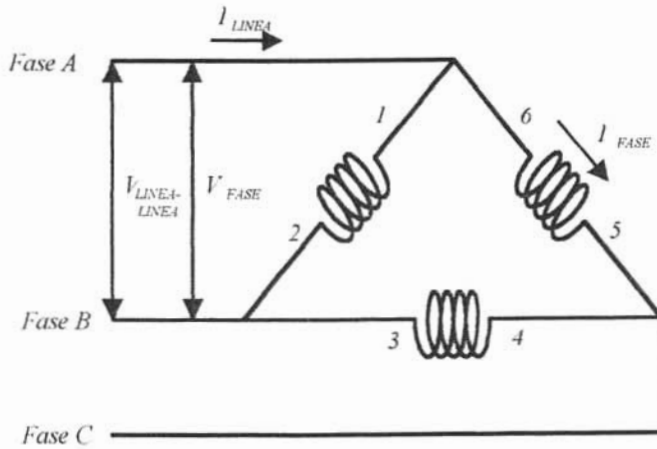


Figura 1.7
Conexión Tipo Delta

De donde:

$$V_{LINEA-LINEA} = V_{FASE} \quad (1.6)$$

$$I_{LINEA} = \sqrt{3} I_{FASE} \quad (1.7)$$

1.2. Valor Medio y Valor Eficaz (r.m.s.)

1.2.1. Valor Medio

El valor medio de un voltaje o de una corriente, en un intervalo de tiempo dado, se define como el área bajo la curva (Figura 1.8) dividida entre el intervalo de tiempo (Ecuación 1.8). Este intervalo de tiempo, normalmente es el periodo T de la función periódica.

Cuando el área de la forma de onda no se puede calcular con facilidad, por ejemplo calculando el área de un rectángulo, el valor medio se define como la integral (de 0 a T) de la función periódica (voltaje o corriente) con respecto al tiempo, dividida entre el periodo T (Ecuación 1.9). El valor medio de una forma de onda que es simétrica con respecto al eje horizontal es igual a cero (Ecuación 1.14).

Es decir, aquellas formas de onda cuyo valor medio es distinto de cero están descentradas con respecto al eje horizontal. El valor medio (promedio) siempre es igual a un valor constante, cuando se trata del valor medio de un voltaje o de una corriente se le considera como su COMPONENTE DE CORRIENTE CONTINUA (C. C.) (Ecuación 1.19)

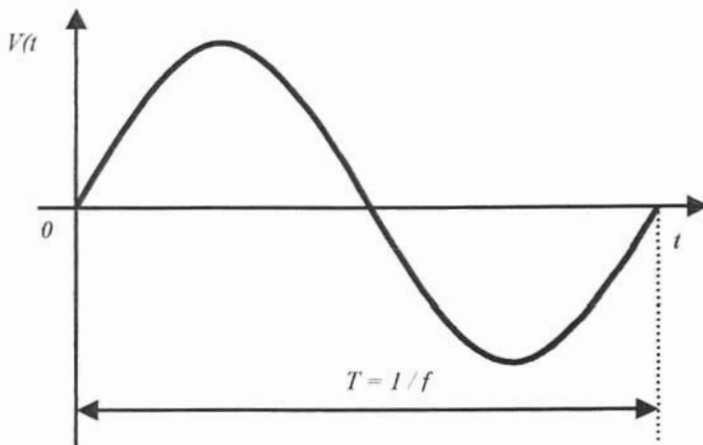


Figura 1.8
Señal de Voltaje de Corriente Alterna

De donde:

$V(t)$ = Voltaje de Corriente Alterna.

t = Tiempo expresado en segundos.

T = Periodo de la Señal Senoidal, determinado en segundos (s).

El valor medio o también conocido de corriente continua de una señal alterna esta determinado por la siguiente Formula 1.8:

$$Valor_{MEDI0} = \frac{\text{Área bajo la Curva}}{\text{Intervalo de tiempo}} \quad (1.8)$$

Sabemos que el área bajo una curva es establecida por la integral de la misma; así mismo el intervalo de tiempo es el comprendido por el periodo (T), de lo cual resulta que:

$$V_{MEDI0} = V_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{MAX} * \text{seno} \varphi) dt \quad (1.9)$$

Sabiendo que:

$$T = 2\pi \quad (1.10)$$

$$\varphi = \omega t \quad (1.11)$$

Sustituyendo la igualdad 1.10 y 1.11, en la Ecuación 1.9, tenemos:

$$V_{MEDI0} = V_{CC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_{MAX} * \text{seno} \omega t) dt = \frac{V_{MAX}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{seno} \omega t dt \quad (1.12)$$

Aplicando la integral referida a la Ecuación 1.12, nos queda:

$$V_{MEDI0} = V_{CC} = -\frac{V_{MAX}}{2\pi} \cos \omega t \Big|_0^{2\pi} = -\frac{V_{MAX}}{2\pi} [\cos 2\pi - \cos 0] \quad (1.13)$$

$$V_{MEDI0} = V_{CC} = -\frac{V_{MAX}}{2\pi} [1 - 1] = -\frac{V_{MAX}}{2\pi} [0] = 0 \quad (1.14)$$

Como se puede observar el valor medio la señal senoidal representada en la Figura 1.8, es cero (Ecuación 1.14), para lo cual se considera que la señal solamente fluctúa de manera positiva (Figura 1.9), esto se obtiene haciendo pasar la señal de la Figura 1.8 por un circuito de rectificación, con esta aseveración se tiene que:

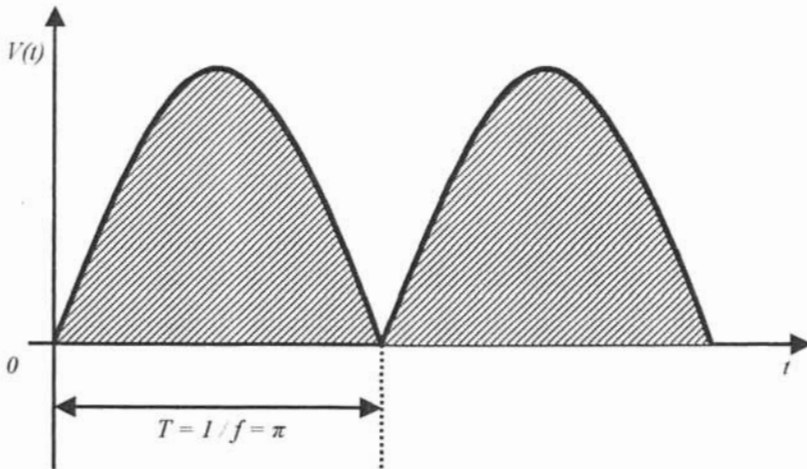


Figura 1.9

Señal de Voltaje de Corriente Alterna Rectificada

De donde:

$V(t)$ = Voltaje de Corriente Alterna

t = Tiempo expresado en segundos (s)

T = Periodo de la Señal Senoidal, determinado en segundos (s)

Partiendo de la Ecuación 1.4, donde se indica que el valor medio es el resultado de dividir el área bajo la curva de una señal entre el tiempo transcurrido, y de igual manera haciendo referencia en la Ecuación 1.9, tenemos:

Sabiendo que:

$$T = \pi \quad (1.15)$$

Sustituyendo la Igualdad 1.11 y 1.15, en la Ecuación 1.9, tenemos:

$$V_{MEDIO} = V_{CC} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{MAX} * \text{seno } \omega t) dt = \frac{V_{MAX}}{\pi} \int_0^{\pi} \text{seno } \omega t dt \quad (1.16)$$

Aplicando la integral referida a la Ecuación 1.16, nos queda:

$$V_{MEDIO} = V_{CC} = -\frac{V_{MAX}}{\pi} \cos \omega t_0^{\pi} = -\frac{V_{MAX}}{\pi} [\cos \pi - \cos 0] \quad (1.17)$$

$$V_{MEDIO} = V_{CC} = -\frac{V_{MAX}}{\pi} [-1 - 1] = -\frac{V_{MAX}}{\pi} [-2] = \frac{2V_{MAX}}{\pi} \quad (1.18)$$

Así para una señal senoidal como la mostrada en la Figura 1.9 el voltaje medio o de corriente continua esta dado por la Ecuación 1.19:

$$V_{MEDIO} = V_{CC} = \frac{2V_{MAX}}{\pi} \quad (1.19)$$

1.2.2. Valor Eficaz (r.m.s.)

El valor eficaz de una forma de onda se refiere a su capacidad de entregar potencia. El valor eficaz de una cantidad que varía con respecto al tiempo es equivalente al valor de una corriente continua que entregaría la misma potencia a una resistencia si reemplazara a la forma de onda variante con el tiempo.

Para determinar el valor eficaz de una función $f(t)$, primero ésta se eleva al cuadrado, de manera que todos los valores de la función resultante son positivos (Ecuación 1.20). Posteriormente se encuentra el valor medio de las magnitudes al cuadrado (Ecuación 1.21) y finalmente se extrae la raíz cuadrada (Ecuación 1.36). El valor eficaz, que también se conoce con el nombre de valor efectivo, es la raíz cuadrada del valor medio cuadrático (valor medio cuadrático o valor r.m.s.).

La definición de corriente eficaz de una corriente senoidal, es conocida como la de corriente directa que proporcionaría la misma pérdida calorífica (efecto Joule) aplicada a una resistencia pura que dicha corriente senoidal aplicada a la misma resistencia. Esta definición es la misma para cualquier tipo de onda de corriente alterna.

De acuerdo a lo ya descrito y basándonos en la Figura 1.9 y elevando al cuadrado la Ecuación 1.16, tenemos:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V(t)^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{MAX} * \text{seno } \omega t)^2 dt \quad (1.20)$$

Elevando al cuadrado y factorizando, nos da como resultado:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{MAX}^2 * \text{seno}^2 \omega t) dt \quad (1.21)$$

Sabiendo que:

$$\cos^2 \omega t + \text{sen}^2 \omega t = 1 \quad (1.22)$$

de donde obtenemos;

$$\text{sen}^2 \omega t = 1 - \cos^2 \omega t \quad (1.23)$$

así mismo tenemos que:

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \quad (1.24)$$

sustituyendo la Igualdad 1.23 en la Ecuación 1.21, nos queda:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[V_{MAX}^2 * (1 - \cos^2 \omega t) \right] dt \quad (1.25)$$

sustituyendo la igualdad 1.24 en la ecuación 1.25, nos queda:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[V_{MAX}^2 * \left(1 - \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right\} \right) \right] dt \quad (1.26)$$

Factorizando Ecuación 1.26:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t d\omega t \right] \quad (1.27)$$

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} d\omega t - \frac{1}{2} \int_0^{\pi} d\omega t - \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \cos 2\omega t d\omega t \right] \quad (1.28)$$

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} d\omega t - \frac{1}{2} \int_0^{\pi} d\omega t - \frac{1}{4} \int_0^{\pi} \cos 2\omega t d2\omega t \right] \quad (1.29)$$

Desarrollando las integrales de la Ecuación 1.29, nos queda:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\omega t_0^\pi - \frac{\omega t^\alpha}{2} - \frac{1}{4} \text{sen} 2\omega t_0^\pi \right] \quad (1.30)$$

Aplicando los intervalos a la Ecuación 1.30:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{4} (\overset{0}{\text{sen} 2\pi} - \overset{0}{\text{sen} 0}) \right] \quad (1.31)$$

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{4} (0) \right] \quad (1.32)$$

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left[\pi - \frac{\pi}{2} \right] \quad (1.33)$$

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \left[\frac{V_{MAX}^2}{\pi} \right] \left[\frac{\pi}{2} \right] \quad (1.34)$$

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS}^2 = \frac{V_{MAX}^2}{2} \quad (1.35)$$

Así para una señal senoidal el voltaje eficaz ó r.m.s. esta dado por la Ecuación 1.6:

$$V_{EFICAZ} = V_{RMS} = \frac{V_{MAX}}{\sqrt{2}} \quad (1.36)$$

I.3. Potencias y Factor de Potencia

I.3.1. Potencia en una Carga Lineal Alimentada con una Señal Senoidal

Generalmente, las cargas eléctricas se comportan como circuitos RL, excepto los casos en los cuales una carga constituye un elemento de calefacción o de iluminación con lámparas incandescentes en que la carga se comporta como una resistencia R. Pues bien, la potencia total o aparente S (que se mide en volts – amper VA) en el caso general es la que recibe la impedancia de carácter RL y a su vez es igual a la suma geométrica de las dos potencias, a saber: La potencia activa P, cuya unidad de medida es el Watts W y la potencia reactiva Q, que tiene como unidad de medida el volt-amper reactivo, VAr. La potencia activa es la potencia disipada en una resistencia, por lo que podemos decir que la resistencia representa la conversión de la energía de eléctrica a otra forma. Ejemplo, de eléctrica a calor, de eléctrica a luminica, de eléctrica a mecánica, etc. Esto significa que la potencia activa fluye de la fuente a al carga, en la cual se convierte en potencia útil. Por su lado, la potencia reactiva Q es la potencia en una reactancia inductiva o en una reactancia capacitiva, si se calcula la potencia instantánea en cualquiera de estos elementos se llega a la conclusión de que en un cuarto de ciclo la energía fluye de la fuente a la carga y en el siguiente cuarto de ciclo la energía fluye de la carga a la fuente. Para una corriente fundamental de 60 Hz, este fenómeno se repite 120 veces por segundo. Entonces, en una inductancia o en una capacitancia la energía no se consume o se disipa ni se convierte a otra forma de energía, sino que sólo se almacena, ya sea en forma de campo magnético o en forma de campo eléctrico, respectivamente.

Dado que las potencias P y Q se encuentran a 90 grados entre si, forman los catetos opuesto (la Q) y adyacente (la P) de un triángulo rectángulo, y la potencia aparente S constituye la hipotenusa de dicho triángulo. Entonces, entre P y S hay un ángulo, denominado ángulo ϕ , que resulta ser el mismo ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje que queda determinado por la impedancia de la carga. Lo anterior se puede observar en la Figura 1.10.

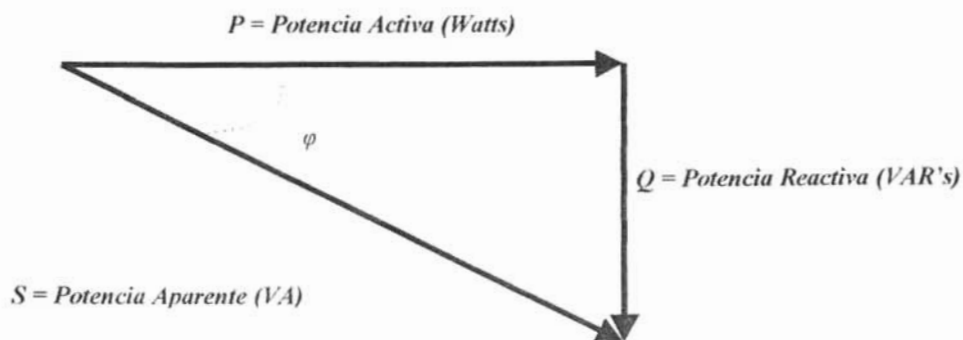


Figura 1.10
Triángulo de Potencias

El ángulo entre las potencias activa y aparente es denotado por símbolo φ , tenemos que:

$$\text{Potencia Activa} = \text{Potencia Aparente} * \text{Cos } \varphi \quad (1.37)$$

$$P = S \cos \varphi \quad (1.38)$$

El valor de $\text{Cos } \varphi$ es llamado *Factor de Potencia*

I.3.2. Potencia Activa y Reactiva Instantáneas

Las Figuras 1.11 y 1.12 muestran la forma de onda de las potencias activas y reactivas instantánea respectivamente entregadas a una red pasiva de dos terminales al aplicar a la misma una tensión senoidal $V_{ab}(t)$.

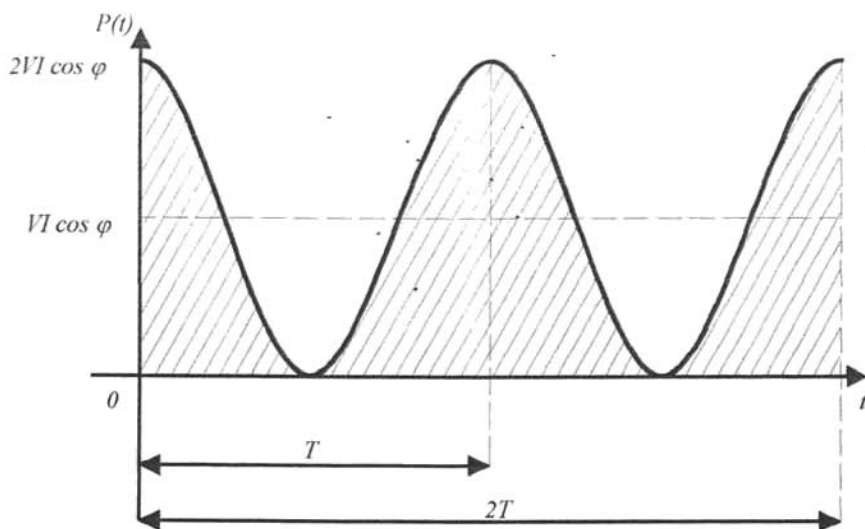


Figura 1.11
Potencia Activa

De donde:

$P(t)$ = Potencia Activa Variante en el tiempo (t).

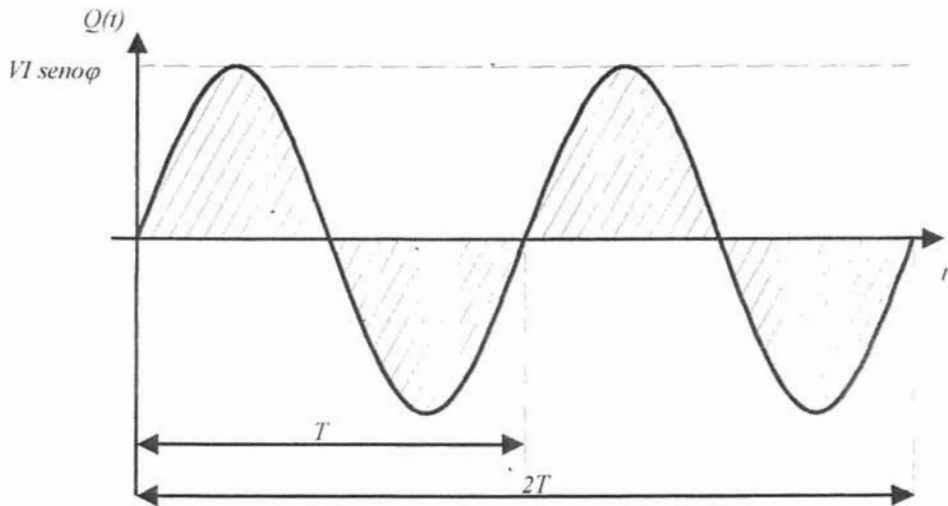


Figura 1.12
Potencia Reactiva

De donde:

$Q(t)$ = Potencia Reactiva Variante en el tiempo (t).

Puede verse como la potencia activa circular solamente en un sentido. Es decir, se trata de una energía que está aportando a la red en todo momento, mientras que la potencia reactiva instantánea cambia de sentido siguiendo una ley senoidal de frecuencia doble que la frecuencia de la onda de tensión aplicada a la red. Es decir, se trata de una energía que aporta a la red cada cuarto de ciclo de la onda fundamental y se regresa a la fuente cada cuarto de ciclo siguiente. Por consiguiente, la energía reactiva va y viene sin consumirse en la red, mientras que la energía activa se consume íntegramente en la misma, aunque en forma también fluctuante.

I.3.3. El Factor de Potencia

El Factor de Potencia se pueda expresar como una función de la potencia activa y reactiva.

De los cual:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.39)$$

$$\cos \varphi = f.p. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.40)$$

La Ecuación 1.40 muestra que el factor de potencia puede ser considerada en un valor relativo, como un valor característico de la potencia reactiva consumida.

Además de $\cos \varphi$, es utilizada la tangente del ángulo φ para determinar la relación entre la potencia activa y reactiva.

Así tenemos:

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (1.41)$$

I.3.3.1. Factor de Potencia en relación a la carga alimentada

Cargas resistivas: En este caso la corriente esta en fase con la tensión y el factor de potencia es 1

Cargas resistivas e inductivas: La corriente se retrasa a la tensión y el factor de potencia es < 1 atrasado. Cuando más alta la carga inductiva, más bajo será factor de potencia. Para corregir este factor de potencia se pueden adicionar capacitores al circuito y aumentara el factor de potencia de vuelta hacia 1

Cargas capacitivas: Aquí la corriente se adelantará a la tensión y si la carga capacitiva es alta, el factor de potencia será mayor que 1 y se adelantará.

I.3.3.2. Medición del Factor de Potencia

I.3.3.2.a. Medición en un circuito de una sola fase (Monofásico).

El método más simple es medir la potencia (usando un Wattmetro), la corriente y el voltaje.

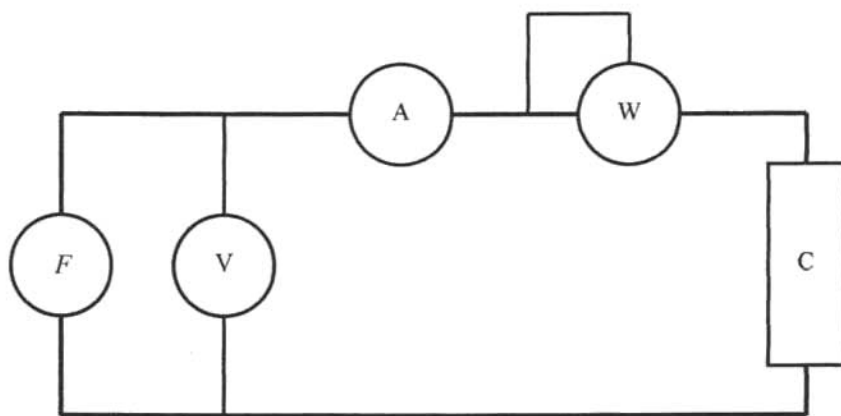


Figura 1.13

Medición en un circuito de una sola fase (Monofásico)

De donde:

F = Fuente de Voltaje de Corriente Alternada de Forma Sinusoidal

V = Equipo de Medición Denominado Volmetro

A = Equipo de Medición Denominado Amperímetro

W = Equipo de Medición Denominado Wattímetro

C = Carga

Entonces tenemos:

$$f.p. = \cos \varphi = \frac{\text{Watts}}{\text{Volts} * \text{Amperes}} = \frac{P}{S} \quad (1.42)$$

I.3.3.2.b. Medición de un Circuito Trifásico Balanceado

Método de los dos Wattmetros: Es un circuito trifásico, se pueden conectar dos wattmetros de acuerdo a la siguiente Figura 1.14.

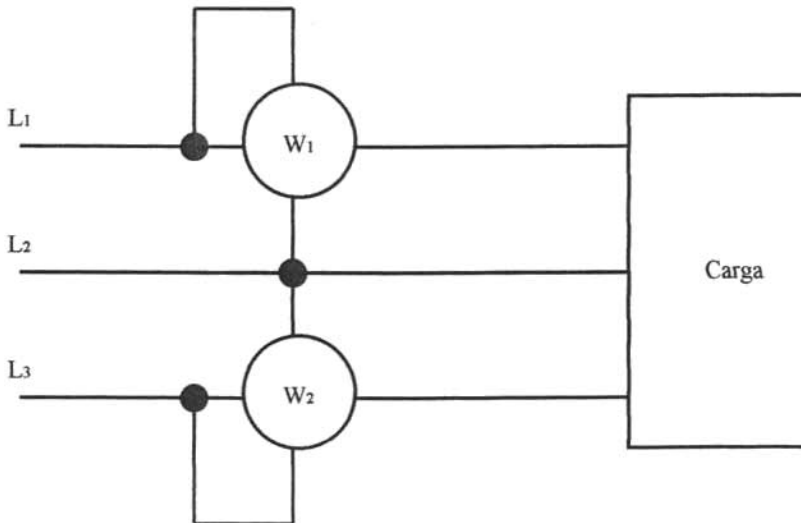


Figura 1.14

Medición de un Circuito Trifásico Balanceado

Es muy importante realizar las conexiones correctas, indicadas en los instrumentos; de tal forma que si un instrumento deflexiona en la dirección equivocada, las conexiones de su bobina de corriente se deben intercambiar y la lectura se debe tomar como un valor negativo. La suma de las lecturas de los dos wattmetros W_1 y W_2 dan la potencia disipada en la carga. La relación de estas dos lecturas resulta del retraso del voltaje con respecto a la corriente o sea el valor del ángulo φ .

Tenemos por lo que:

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \quad (1.43)$$

y

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \quad (1.44)$$

Método Gráfico: Empleando las lecturas obtenidas de los dos wattmetros podemos emplear el método gráfico (Figura 1.15), para encontrar el valor de $\cos \varphi$ como una función de la relación W_1/W_2 .

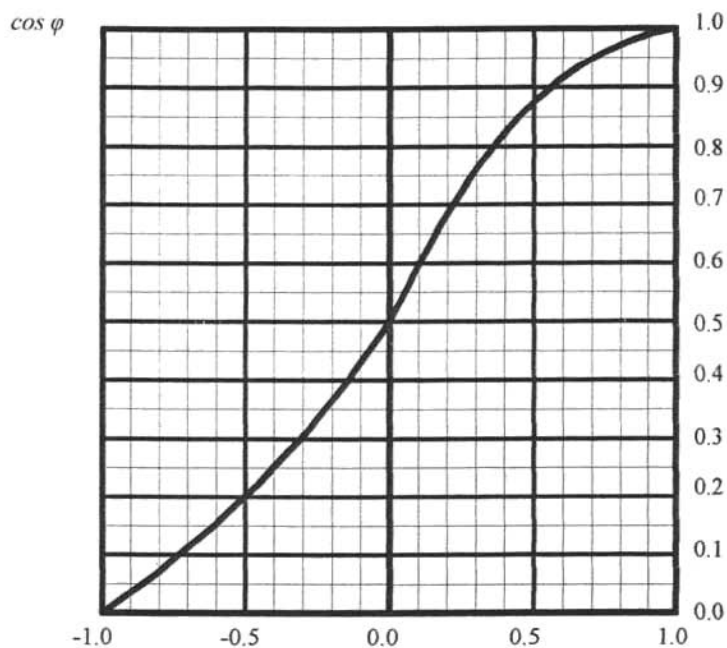


Figura 1.15

Método Gráfico para determinar el Factor de Potencia

Factorímetro de Tres Fases: El principio es idéntico al usado para el medidor de una sola fase. La bobina de corriente es conectada a una fase, las dos bobinas móviles son conectadas entre esta fase y las otras dos. En esta forma, ambos circuitos son resistivos cuando se usa el cambio de fase entre los voltajes en el sistema trifásico. El factorímetro indicará un factor de potencia inductivo o capacitivo ($\cos \varphi$) dependiendo de la secuencia de fase (dirección de rotación)

I.3.3.2.c. Medición en 3 Fases con un Circuito Desbalanceado

En tal circuito, $\cos \phi$ es diferente en cada fase. Para medir el $\cos \phi$, es necesario medir separadamente, en cada fase de la carga, la potencia, corriente y voltaje, en las terminales de fase, como si fuera para una sola fase.

Si el neutro de una carga conectada en estrella (Y) es inaccesible, la medición será imposible. En forma similar, si la carga conectada es delta y las fases no pueden ser desconectadas para la medición, es imposible medir el factor de potencia en las fases.

Sin embargo, para la carga total de la red, es posible medir las potencias activa y reactiva y de estos valores obtener un valor promedio del factor de potencia

I.3.3.3. Consumo de Corriente en relación con el Factor de Potencia

Una carga que consume la mayor potencia reactiva y el factor de potencia más bajo es el peor fenómeno eléctrico que puede suceder en condiciones estables.

Para una potencia consumida constante, el factor de potencia bajo, la potencia aparente será más alta y así también más alta la cantidad de corriente en la red (Figura 1.16).

Con factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente consumida por la carga, será dos veces la corriente útil (Figura 1.16).

Con factor de potencia igual a 0.9, la cantidad de corriente consumida por la carga, será solamente del 10 % más alta que la corriente útil (Figura 1.16).

Para una potencia constante, la cantidad de corriente de la red se incrementará en la medida que el factor de potencia disminuya.

Esto significa que los transformadores y cables de distribución estarán sobrecargados y que las pérdidas en ellos se incrementarán (en proporción al cuadrado de la corriente). Esto, por supuesto, es real en todos los puntos de la red, (del lado de alto y bajo voltaje).

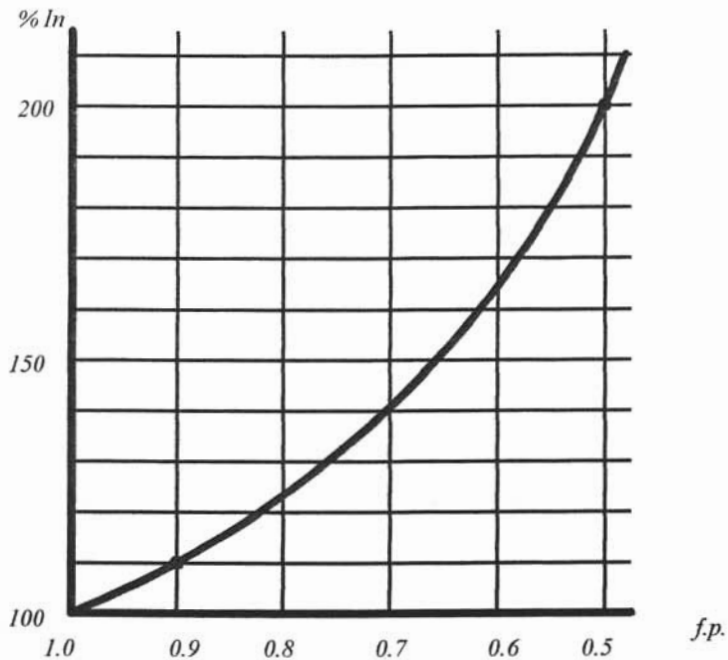


Figura 1.16

Consumo de Corriente en relación con el Factor de Potencia

Hemos visto previamente que el factor de potencia se puede calcular cuando las potencias activas y reactivas son conocidas.

Este método se puede aplicar también para calcular el factor de potencia de la energía consumida durante un cierto periodo de tiempo.

Usando medidores de potencia reactiva y un cronometro, es posible determinar la energía consumida durante un período especificado en tiempo y así calcular el factor de potencia ($\cos \phi$) durante este tiempo. (Se debe tomar en cuenta la relación entre las revoluciones del disco medidor por unidades de energía usada).

Resumiendo

Potencia Activa

Los diferentes dispositivos eléctricos convierten energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, luminica, térmica, química, etc.

Esta energía corresponde a una energía útil o potencia activa o simplemente potencia, similar a la energía consumida por una resistencia, esta potencia puede ser expresada en Watts (W)

Potencia Reactiva

Los motores, transformadores y en general todos los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de un campo electromagnético, requieren potencia activa para efectuar un trabajo útil, mientras que la potencia reactiva es utilizada para la generación del campo magnético. Esta energía reactiva corresponde a la potencia reactiva que está desfasada 90° de la potencia activa. La cual se expresa en Volts-Amper reactivos (VAR).

Potencia Aparente

El producto de la corriente y el voltaje es llamado potencia aparente, es también la resultante de la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y la potencia reactiva.

I.4. Armónicas

I.4.1. Definición

Las armónicas son corrientes no deseadas generadas por dispositivos de conmutación. Se presentan en múltiplos de la frecuencia fundamental.

Cada múltiplo de la onda fundamental se conoce como "orden de la armónica", la corriente fundamental o base (en este caso de 60 Hz) se conoce como de 1^{er} orden, y una corriente armónica de tercer orden tiene una frecuencia de tres veces el valor de la onda fundamental, o sea 180 Hz.

Las corrientes y voltajes armónicos son fenómenos imperceptibles por sí mismos, se requieren aparatos especiales para medirlos, pero sus efectos son reales y muchas veces ocurren fallas relacionadas con voltajes y corrientes armónicas sin previo aviso.

Cuando se dispone de una forma de onda periódica no senoidal, es posible obtener respuestas en el dominio del tiempo auxiliándose con la transformada de Laplace. Sin embargo, cuando se pretende hacer estudios de la misma forma de onda, pero en el dominio de la frecuencia, la Serie de Fourier es adecuada.

En 1812 el matemático francés Joseph Fourier demostró que una función periódica no senoidal puede ser expresada por funciones senoidales, cuyas amplitudes, fases, y frecuencias varían en progresión aritmética. Si el valor promedio no es cero, durante un periodo dado de la función, se debe agregar una constante a la suma de las funciones senoidal. La serie de Fourier establece que una forma de onda periódica no senoidal con periodo T (frecuencia fundamental $f = 1/T$) puede reemplazarse por un número infinito de términos senoidal de frecuencias, múltiplos de la frecuencia fundamental. En general se define con la Ecuación 1.45.

$$i = I_f + I_1 \text{seno}(\omega t - \varphi_1) + I_2 \text{seno}(2\omega t - \varphi_2) + I_3 \text{seno}(3\omega t - \varphi_3) + I_4 \text{seno}(4\omega t - \varphi_4) + \dots \text{etc.} \quad (1.45)$$

I.4.2. Aplicación de la serie de Fourier al análisis de circuitos eléctricos.

Como la serie de Fourier es igual a la suma de varias funciones seno de diferentes frecuencias, más un valor constante, su aplicación a los circuitos se basa en la aplicación del principio de superposición. Esto significa que podemos encontrar la respuesta del circuito para cada componente de la serie, independientemente de las otras, y al final simplemente se suman. Como las excitaciones son de distinta frecuencia, las respuestas también son de distinta frecuencia. Cada componente de voltaje, por ejemplo, produce una componente de corriente de la misma frecuencia, o viceversa. Recordemos que cuando un circuito es lineal y bilateral y se excita con dos o más fuentes independientes es posible efectuar el análisis empleando el principio de superposición.

Una onda distorsionada con corrientes armónicas puede ser descompuesta en una onda senoidal pura (llamada onda fundamental) del mismo periodo que la onda original y una serie de ondas senoidales de frecuencias que son múltiplos exactos de la frecuencia de la onda fundamental (llamadas componentes armónicas), que sumadas entre sí y con la onda fundamental reproducen la onda distorsionada original.

La aplicación del teorema de Fourier permite efectuar el análisis de la onda distorsionada original determinando las amplitudes y los desfases de cada una de las ondas senoidales que constituyen las armónicas, así como la amplitud de la onda senoidal fundamental y la posible presencia de una componente continua, determinada por una simple constante.

En la Figura 1.17 se muestra una onda distorsionada, tal como es común encontrar cuando se analizan las ondas de corriente o de tensión en los sistemas eléctricos actuales. En estos casos, recordando el conocido teorema de análisis matemático: teorema de Fourier, el cual dice que la onda viene contaminada con componentes armónicas.

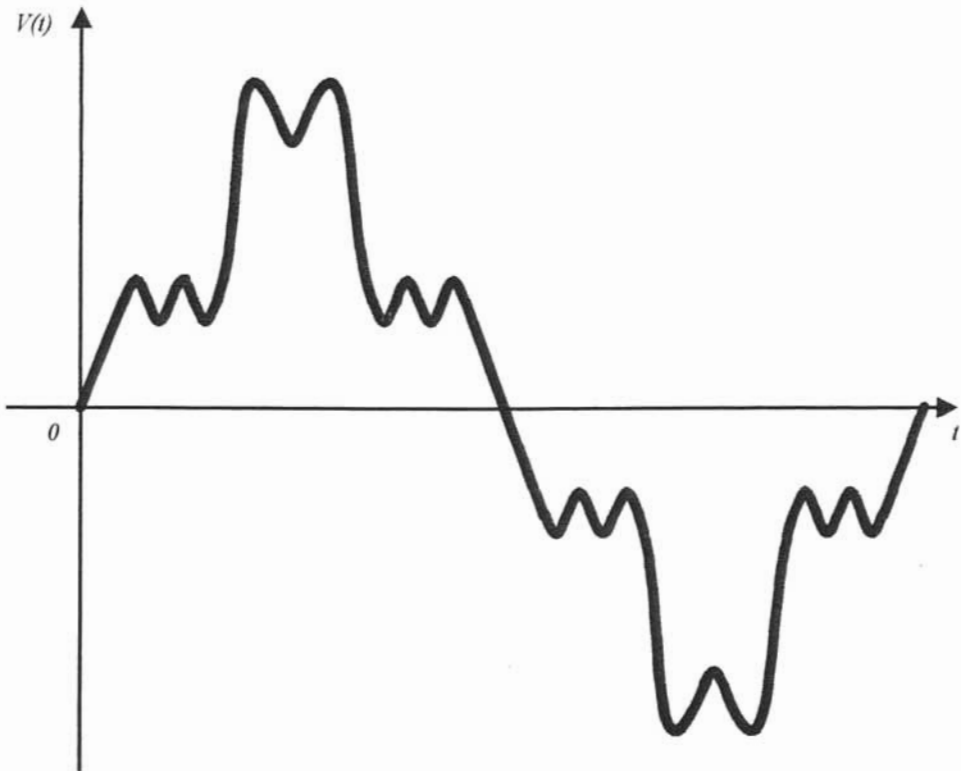


Figura 1.17

Forma de onda distorsionada por las corrientes armónicas

Así, la forma de onda será igual a la suma de: una componente senoidal de frecuencia f (llamada fundamental), una segunda componente senoidal de frecuencia $2f$ (llamada segunda armónica), una tercera componente senoidal de frecuencia $3f$ (llamada tercera armónica),..., hasta una h -ésima componente senoidal de frecuencia hf (llamada h -ésima armónica) Ecuación 1.46. De esta manera cualquier forma de onda periódica no senoidal (que se encuentra distorsionada con respecto a una senoidal) es igual a la suma de la fundamental y las armónicas (Figura 1.18).

Si se trata de una corriente, entonces esta será la suma de la componente fundamental de la corriente más las corrientes armónicas. Por otro lado, hay que tomar en cuenta la simetría de la forma de onda con respecto al eje horizontal; cuando ésta es asimétrica, a los términos senoidales hay que agregar un término constante, denominado valor medio o componente de corriente continua.

$$V(t) = V_1 \text{seno}\omega t + V_2 \text{seno}2\omega t + V_3 \text{seno}3\omega t + V_4 \text{seno}4\omega t + \dots \quad (1.46)$$

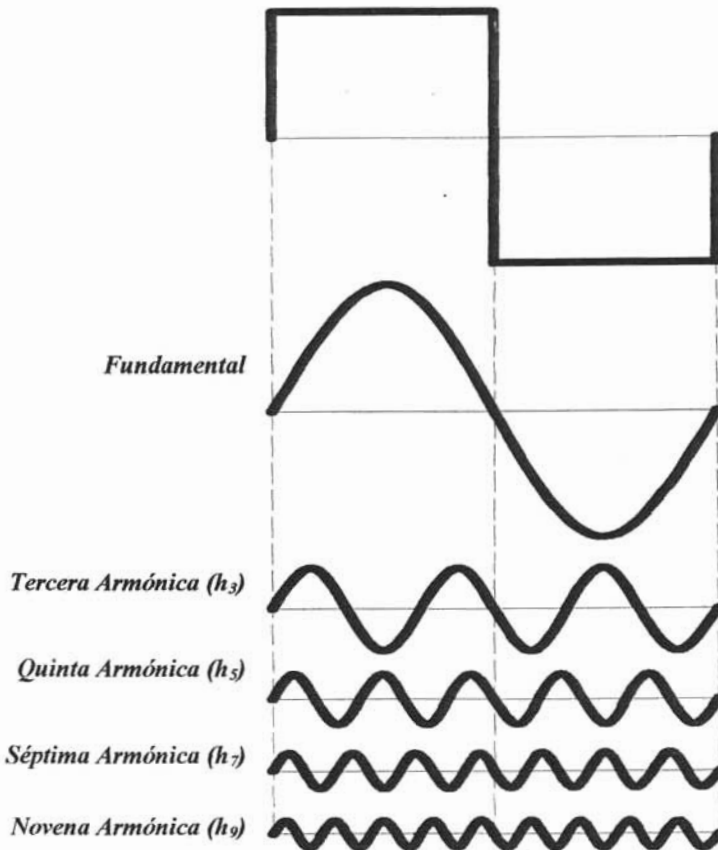


Figura 1.18

Forma de onda Descompuesta en la Señal fundamental
y sus componentes armónicas

I.4.3. Tipos de Armónicas

Atendiendo a la causa que las produce, las armónicas se dividen en dos tipos: armónicas características, estas son el resultado de la presencia de cargas no lineales en el sistema y las armónicas no características obedecen a ciertos fenómenos que ocurren en el sistema. En esta tesis se trata exclusivamente sobre las armónicas características. Las armónicas cuyas frecuencias son múltiplos de dos se denominan armónicas pares, el resto impares. El entero que se multiplica por la frecuencia fundamental para obtener la frecuencia de una armónica se denomina orden armónico, y se denota por la letra h . Por ejemplo, para la segunda armónica $h = 2$, para la tercera armónica $h = 3$, etc.

CAPÍTULO II

“EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS”

II. Efectos de las Corrientes Armónicas

II.1. Fuentes Emisoras de Corrientes Armónicas

La norma IEEE 519-1992 (Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica), relativa a "Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el Control de Armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia" (Ver Apéndice-Normas), agrupa a las fuentes emisoras de corrientes armónicas en tres categorías diferentes:

- a) Dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, etc.)
- b) Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, luz fluorescente, máquinas soldadoras, etc.)
- c) Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, etc.)

A estas tres categorías podemos agregar una cuarta:

- b) Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (molinos de laminación, trituradores, etc.)

A continuación se presenta un listado, en forma más específica, de las fuentes emisoras de corrientes armónicas encontradas típicamente en plantas industriales.

Fuentes emisoras de corrientes armónicas en plantas industriales.

- Motores de corriente directa.
- Convertidores de frecuencia (variadores).
- Transformadores (en procesos químicos).

- Reactores controlados por tiristores (compensadores estadísticos).
- Hornos de arco.
- Equipo de soldadura.
- Transformadores sobre excitados.
- Molinos de laminación.
- Molinos trituradores.
- En general, cargas no lineales.

Fuentes emisoras de corrientes armónicas en oficinas y otros edificios singulares.

- Alumbrado fluorescente y equipos electromecánicos de comunicación
- Controladores de energía.
- Alarmas.
- Computadoras.
- Elevadores controlados con electromecánica de estado sólido.

Estos son instalados cada vez en mayores proporciones en los edificios modernos, provocando altos niveles de distorsión armónica que ya es preciso tener en cuenta en la operación, mantenimiento y diseño de las redes eléctricas alimentadoras instaladas en los mismos, el contenido de armónicas que se viene encontrando ya en este tipo de instalaciones suelen alcanzar niveles tan elevados que exigen la aplicación de técnicas apropiadas para su manejo y control.

II.2. Propagación de las Corrientes Armónicas en las Redes de Distribución Eléctrica

Para poder estudiar la propagación de las corrientes armónicas, es necesario primero definir las etapas que recorre la energía eléctrica desde que la compañía suministradora la genera, hasta ser utilizada por el usuario (Figura 2.1).

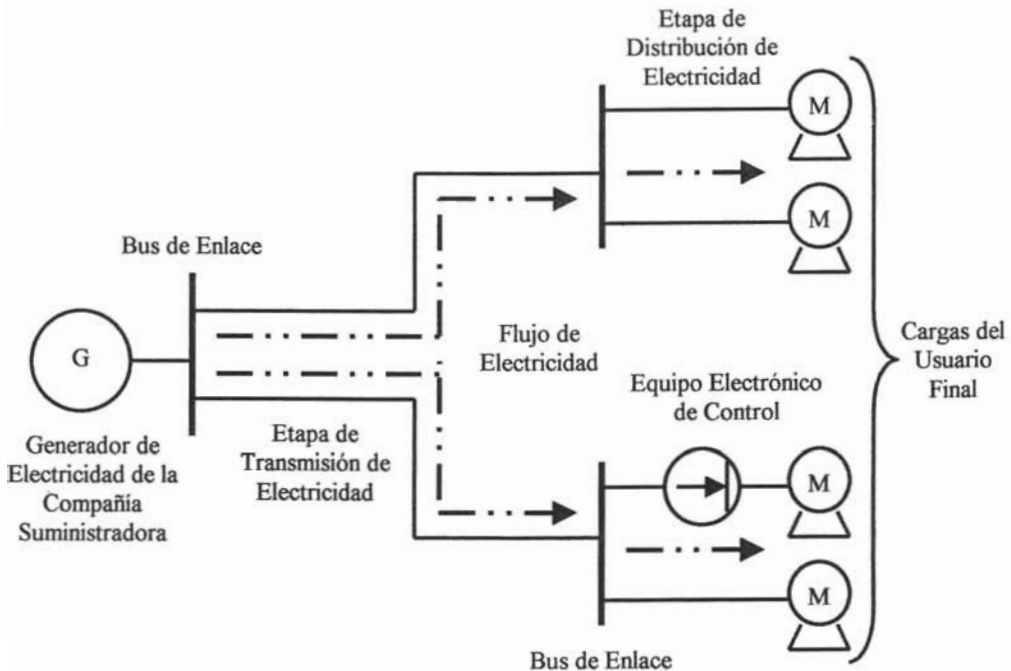


Figura 2.1

Esquema de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica

La Figura 2.2, representa la propagación de las corrientes armónicas, se puede observar que, como ya es sabido las corrientes fundamentales y las corrientes armónicas “buscan” y se dirigen a los lugares con menor resistencia (impedancia, misma que se identifica con la letra Z), que ofrecen los diferentes equipos, que tienen interacción en el sistema de distribución eléctrica.

Se puede observar en la Figura 2.2, que el equipo electrónico de control se "convierte" para este análisis en una fuente de corrientes armónicas.

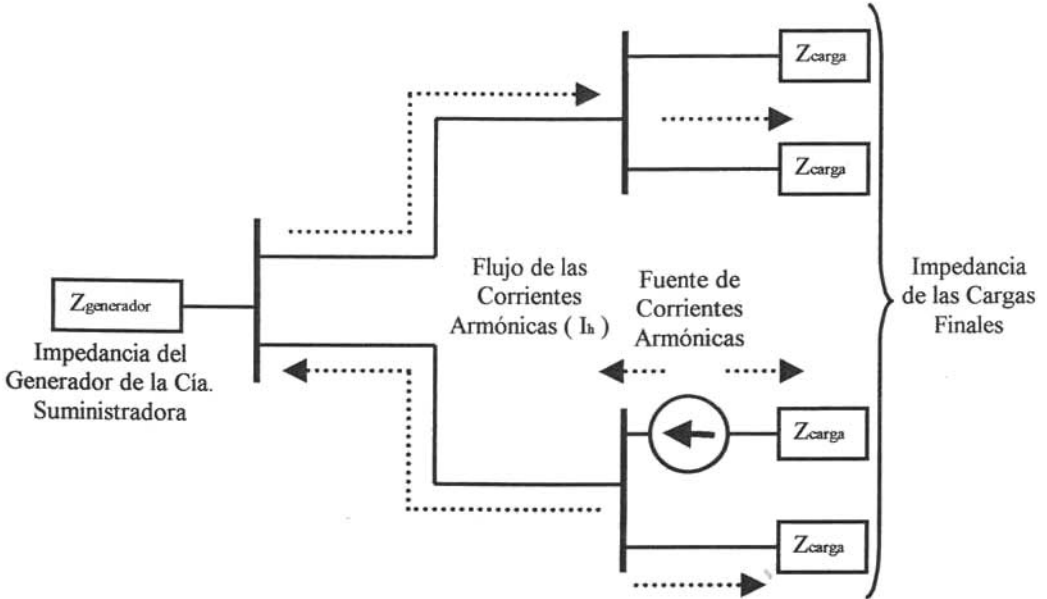


Figura 2.2

Esquema de Propagación de las Corrientes Armónicas (I_h)

En la Figura 2.3, podemos observar de manera muy general los flujos de las corrientes. A simple vista se puede sacar una muy evidente consecuencia de que en un sistema circulen corrientes parásitas (armónicas), y es que se presenta de sobremanera más energía eléctrica de la que fue calculada en su momento al diseñar la instalación (esto independientemente de la potencia reactiva y/o del factor de potencia) y provocando con ello la disminución de la vida útil de la misma.

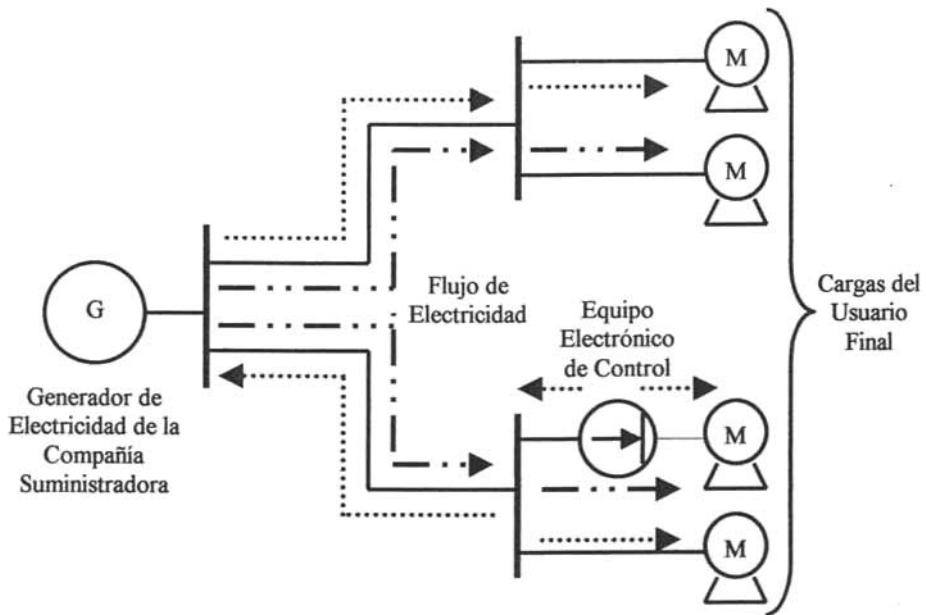


Figura 2.3
Flujo de las Corrientes que intervienen en un
Sistema de Distribución Eléctrica cuando existe la
presencia de Corrientes Armónicas

Nota:

Como ya fue explicado en el capítulo anterior las corrientes tanto fundamental como las armónicas se "adicionan" entre sí, aún cuando su sentido sea contrario, ya que estas tienen diferentes frecuencias.

Cuando existen en una red eléctrica emisores de corrientes armónicas de potencia significativa, se llegan a producir grandes flujos de este tipo de corrientes, en primera instancia, ocasionan los mismos inconvenientes y perjuicios de las corrientes reactivas responsables del bajo factor de potencia. Adicionalmente, pueden producir una serie de problemas graves los cuales se describen a continuación.

II.3. Problemas Generados por las Corrientes Armónicas

Los efectos nocivos producidos por flujos de corrientes armónicas son cada día más significativos en los sistemas eléctricos. Dichos efectos dependen de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y pueden resumirse en la forma siguiente:

- ✱ Múltiples cruces por cero en las ondas de tensión o de corriente; Lo cual a su vez produce:
 - Problemas de funcionamiento en dispositivos eléctricos de regulación, tanto en potencia, como de control.
 - Mal funcionamiento en dispositivos eléctricos de protección y medición.
 - Interferencias en sistemas de telecomunicación y telemando.
 - Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección. Actuación indebida de fusibles.
 - Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y/o cargas sensibles.
 - Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.

- × Sobrecalentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, etc...) y el cableado de potencia, con la disminución consecuente de vida media en los mismos e incremento considerable de pérdidas de energía en forma de calor.
 - Aumento de las pérdidas, y mal aprovechamiento de la instalación eléctrica.
 - Fallas en los aislantes.

- × Fallo en capacitores.
 - Exceso de corriente en capacitores y bancos de capacitores, con el consiguiente acortamiento de su vida útil.
 - Resonancia con otros componentes del sistema.

II.3.1. Múltiples Cruces por Cero en las Ondas de Tensión ó de Corriente.

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

Cuando se producen los múltiples cruces por cero típicos de las corrientes armónicas, los equipos antes mencionados pueden mostrar problemas de operación. Los múltiples cruce por cero pueden afectar también, por interferencia electromagnética, a las líneas de comunicación. Pares torsores de rotación inversa en los motores eléctricos.

Los grandes fabricantes, y compañías de telecomunicaciones están normalmente interesadas con respecto a la corriente de la distorsión armónica de entrada.

II.3.2. Sobrecalentamiento de los Equipos Eléctricos.

El desarrollo de la tecnología de control por medio de equipamiento electrónico de potencia controlado por tiristores, ha llevado a un incremento significativo de la cantidad de cargas no lineales en el sistema. Desafortunadamente los convertidores y otras cargas no lineales, tienen efectos indeseables en el suministro de corriente alterna requiriendo una cantidad importante de potencia reactiva inductiva con una corriente no senoidal. La red necesita estar libre de esta distorsión armónica para prevenir el funcionamiento inadecuado de los equipos. Una corriente típica de un convertidor está compuesta por una componente fundamental a la frecuencia de la red y un número de armónicas cuyas frecuencias son múltiplos de ésta (en redes trifásicas predominantemente 5°, 7°, 11° y 13°). Estas armónicas conducen a que la corriente en los capacitores se incremente en la medida que su impedancia desciende al aumentar la frecuencia. Aunado a esto El flujo de corrientes armónicas de secuencia negativa: 5a, 11a, etc., producen pares de rotación inversa en los motores de CA, con perjuicio en efectos dinámicos: vibraciones, inestabilidades, ..etc., que esto puede acarrear.

II.3.2.1. Sobrecalentamiento y Perdidas de Energía en los Transformadores.

Los transformadores de potencia estándar están diseñados para operar a tensión y corrientes específicas.

El flujo de las corrientes armónicas provoca sobrecalentamiento por:

- ✓ Incremento de pérdida por histéresis del núcleo.
- ✓ Incremento del flujo de corrientes de secuencia cero por los devanados delta.
- ✓ Incremento de las corrientes parásitas por devanados y núcleo.

Estos sobrecalentamientos provocan altas pérdidas de energía y fallos en los transformadores. Por cada 8° a 10° C de incremento de la temperatura operacional, puede bajar a la mitad, la vida media de un transformador.

La Tabla 2.1 presentada muestra las pérdidas de eficiencia y por consiguiente, mayor consumo de energía, en cálculos efectuados con transformadores estándar sometidos a flujo de corrientes armónicas. Puede observarse en dicha tabla cómo baja la eficiencia del transformador, o lo que es lo mismo, suben las pérdidas de energía, conforme aumenta la distorsión armónica de la onda de corriente que fluye a través del transformador.

Tabla 2.1
Pérdidas en Transformador Generadas por Armónicas

Distorsión Armónica (%)	Pérdidas RI^2 (%)	Pérdidas en el núcleo (%)	Eficiencia (%)	Pérdidas de Eficiencia (%)
0	2.5	2.5	95.0	5.00
10	2.5	5.2	92.2	7.80
20	2.5	8	89.4	10.60
30	2.5	10.8	86.6	13.40
40	2.5	13.5	83.9	16.10
50	2.5	16.3	81.1	18.90
60	2.5	19.1	78.3	21.70
70	2.5	21.9	75.5	24.50
80	2.5	24.6	72.8	27.20
90	2.5	27.4	70.0	30.00
100	2.5	30.2	67.2	32.80

II.3.2.2. Sobrecalentamientos y Pérdidas de Energía en los Conductores Eléctricos.

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

1. - Pérdidas Ohmicas.

La RI al cuadrado es igual a R de I al cuadrado 1, + I al cuadrado de 2, + I al cuadrado de 3, etc...

La corriente eficaz aumenta al existir corrientes armónicas y esto incrementa las pérdidas óhmicas. En la práctica, este efecto es menos significativo para altas frecuencias, que tienden a disminuir la amplitud, cuanto mayor es el orden de las mismas.

2. - Pérdidas por Efecto Pelicular.

El flujo de altas frecuencias obliga a las corrientes parásitas a fluir concentrándose cerca de la superficie externa de los conductores, esto provoca mayores pérdidas óhmicas por el incremento en la densidad de la corriente. Este efecto puede ser significativo en la práctica.

3. - Pérdidas por Efectos de Proximidad entre Cables.

Son debidas a corrientes parásitas inducidas entre cables instalados próximos entre sí. Son más importantes cuando más altas son las frecuencias involucradas.

II.3.3. Fallas en Capacitores

Los capacitores de potencia conectados a una red conteniendo corrientes armónicas tienden a tomar sobrecorrientes significativas, debido a la baja impedancia que muestra un capacitor al ser alimentado con ondas de tensión de alta frecuencia (Figura 2.4). La corriente efectiva I que toma un capacitor de corriente nominal I_N al ser alimentado con una onda de tensión que contiene armónicas de orden h , con amplitudes relativas e_h , expresadas en tanto por ciento respecto a la onda fundamental.

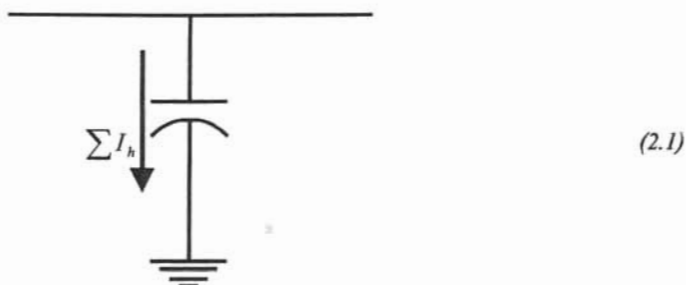


Figura 2.4

Capacitor Recibiendo las Corrientes Armónicas del Sistema

$$X_{ch} = \frac{1}{2\pi h f C} \quad (2.2)$$

$$h = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, \infty$$

$$I = 0.01 I_N \cdot \sqrt{100^2 + 9e_3^2 + 25e_5^2 + \dots} \quad (2.3)$$

De donde:

ΣI_h = Sumatoria de las Corrientes Armónicas prevalectientes en el Sistema

X_{Ch} = Reactancia Capacitiva bajo los Efectos de las Corrientes Armónicas

h = Grado de la Corriente Armónica

f = Frecuencia de la Corriente Fundamental (Hertz)

C = Valor del Capacitor Afectado por las corrientes Armónicas (Faradios)

I = Corriente la Cual circula por el Capacitor

I_N = Corriente Nominal a la cual esta diseñado el Capacitor

e_h = Amplitud relativa de tensión que contiene armónicas de orden h .

Un fenómeno muy importante (y nocivo, para la red eléctrica y los equipos operando en la misma) que puede originarse al operar capacitores de potencia en presencia de armónicas: se trata de las resonancias locales estos amplifican los problemas eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia (Figura 2.5).

La reactancia capacitiva X_{Ch} que el capacitor presenta para la frecuencia correspondiente a una cierta armónica h , sintoniza siempre con la reactancia inductiva del sistema X_{Sh} a una frecuencia natural de resonancia h_0 .

Cuando la fuente emisora, energizada en paralelo con los capacitores, emite alguna frecuencia armónica próxima a h_0 , tienden a infinito tanto la corriente I_{Ch} que toman los capacitores como la I_{Sh} que fluye hacia al sistema. Esto constituye una resonancia local (Figura 2.6).

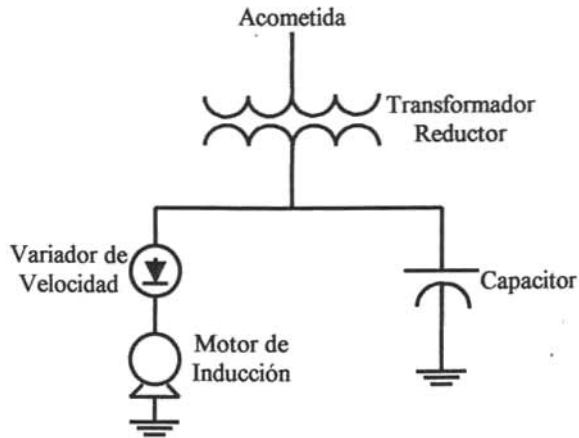


Figura 2.5
Diagrama Unifilar

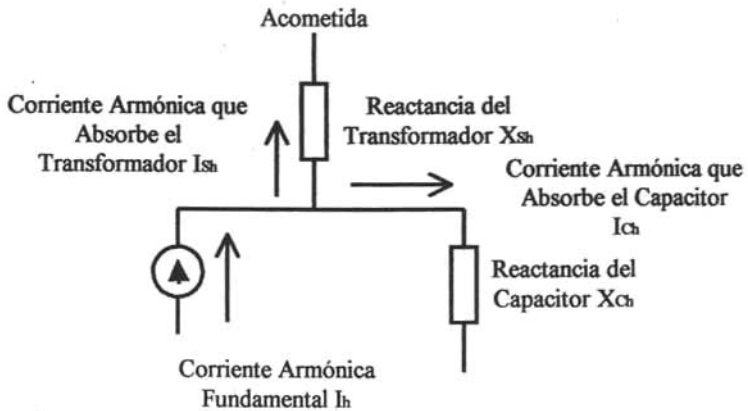


Figura 2.6
Diagrama de Corrientes Circulantes en el Sistema

En la práctica, las corrientes y las elevaciones de tensión provocadas en los equipos, no pueden llegar a hacerse infinitas, pero sí pueden experimentar incrementos de valor muy importantes que agraven significativamente los efectos nocivos que pueden acarrear las corrientes armónicas, que mismos fueron descritos anteriormente.

La Figura 2.7, muestra un sistema con mediciones obtenidas en varios puntos de un sistema, se puede apreciar que existe una gran cantidad de corrientes armónicas circulando estos datos nos servirán para evaluar de manera practica sus efectos en las impedancias inductivas de los transformadores (Caso a) y en las impedancias capacitivas de los capacitores (Caso b).

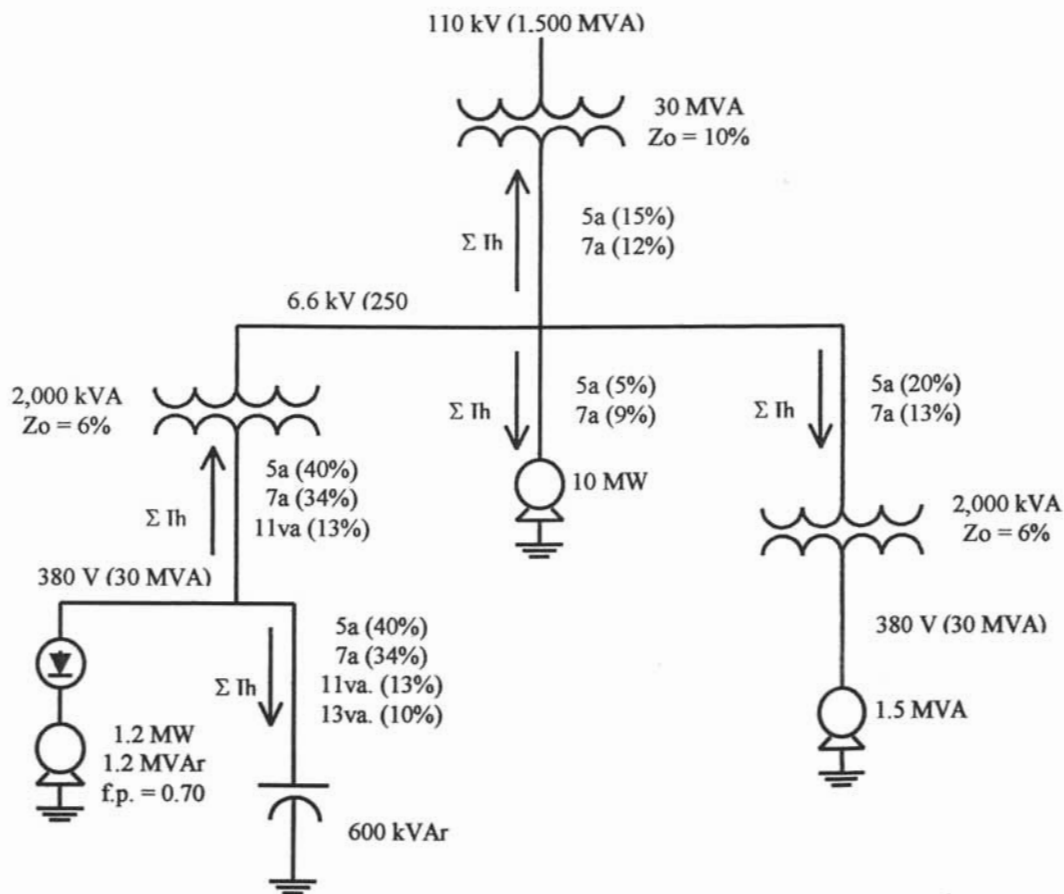


Figura 2.7

Diagrama Unifilar de un Sistema con Armónicas

a) Caso inductivo

La impedancia de una inductancia aumenta con la frecuencia.

$$Z_L = 2\pi fL$$

(2.4)

De donde:

$Z_L =$ Impedancia Inductiva

$f =$ Frecuencia (Hz)

$L =$ Valor de la Inductancia (Henrios)

Así la corriente decrece con el aumento de la frecuencia a voltaje constante. El resultado es también que la caída de voltaje en la fuente principal, debido a la inductancia, será tan alta como aumenta el rango de la armónica.

b) Caso Capacitivo

La impedancia del capacitor disminuye si la frecuencia aumenta

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.5)$$

De donde:

$Z_C =$ Impedancia Capacitiva

$f =$ Frecuencia (Hz)

$C =$ Valor del Capacitor (Faradios)

La corriente que fluye a través del capacitor se eleva conforme se incrementa la frecuencia (por que el rango de la armónica es más alto).

- ✓ Calculando el sobrevoltaje en el capacitor

$$\text{Sobrevoltaje} = \text{Voltaje de línea} \sqrt{1 + \left(\frac{\% \text{de armónica}}{100}\right)^2} \quad (2.6)$$

$$380 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 409V$$

es decir, 8% más alto.

✓ Calculando el valor de la corriente efectiva para la 5ª armónica:

$$I_{rms} = \sqrt{1 - h^2 * \left(\frac{\%dearmónica}{100}\right)^2} \quad (2.7)$$

$$20 \cdot \sqrt{1 - 5^2 * \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 44.7A \quad (2.7)$$

O sea, más del doble.

Si el 40% estuviera en la 7ª armónica, la corriente efectiva habría sido:

$$20 \cdot \sqrt{1 + 7^2 * \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 59.5A \quad (2.8)$$

3 veces más grande con relación a 20 A. (para el mismo sobrevoltaje).

II.3.3.1. Resonancia en Serie

Hemos visto que la impedancia de una inductancia aumenta con la frecuencia, y que es la inversa en el caso de los capacitores. Si una inductancia es colocada en serie con un capacitor, la impedancia total será igual a la suma de las impedancias inductivas y capacitiva (Figura 2.8).

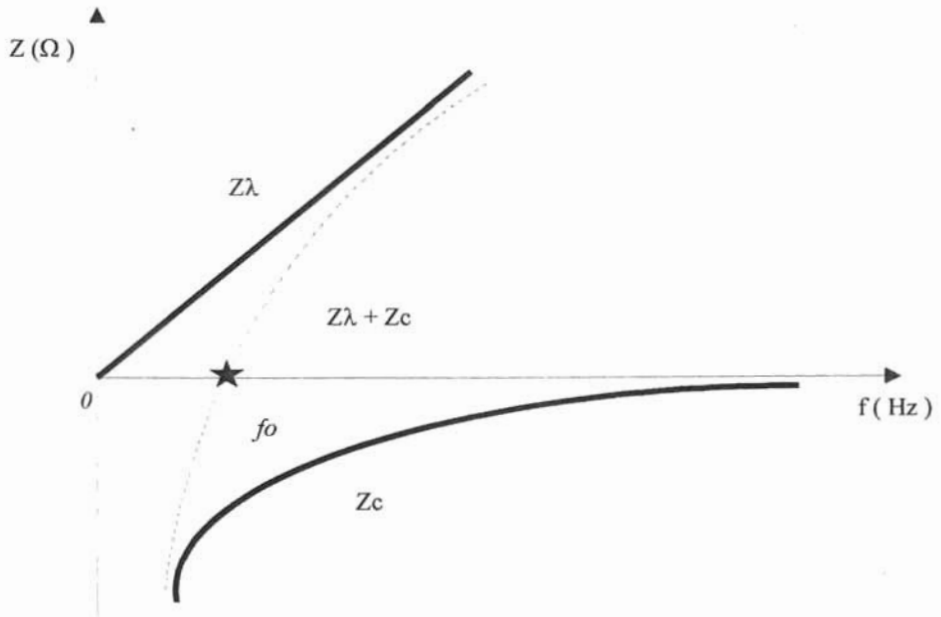


Figura 2.8
Grafica de Impedancias

Donde:

$Z\lambda$ = Impedancia de los Devanados de la Carga

Z_c = Impedancia del Capacitor

f_0 = Frecuencia de Resonancia

Así como una impedancia aumenta con la frecuencia y la otra disminuye, se entiende que para una cierta frecuencia (f_0) habrá una igualación del valor absoluto de ambas impedancias.

Tenemos:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\lambda C}} \quad (2.9)$$

Donde:

f_0 = Frecuencia de Resonancia

λ = Inductancia de los Devanados de la Carga

C = Valor del Capacitor

Para esta frecuencia, la corriente está limitada solamente por la resistencia (ρ) del cableado de la fuente, y como ésta es usualmente baja, el valor de la corriente será alto.

Esta corriente crea un sobrevoltaje muy alto que fluye a través del capacitor y del circuito.

La relación entre este sobrevoltaje y el voltaje nominal es conocida como "Q" y llamada el factor de sobrevoltaje o factor de calidad.

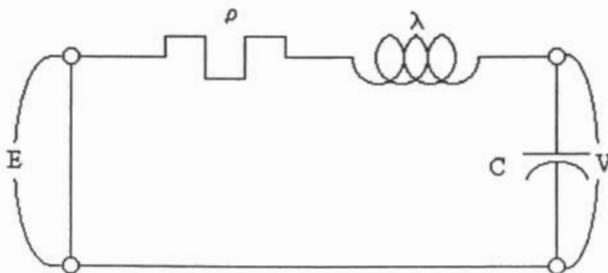


Figura 2.9

Representación Grafica de los elementos que ocasionan Resonancia

De donde:

E = Voltaje Aplicado al Sistema

ρ = Señal de Salida Típica de un Equipo Regulador de Velocidad

λ = Inductancia de los Devanados de la Carga

C = Valor del Capacitor

V = Voltaje entre Terminales del Capacitor

Transformando la ecuación antes citada en potencia y proponiendo $n = f_0/f$ en el que n es el rango de la frecuencia de resonancia. Tenemos:

$$n = \frac{f_0}{f} = \sqrt{\frac{E^2}{\omega\lambda}} = \sqrt{\frac{\text{Potencia_de_cortocircuito}}{\text{Potencia_del_capacitor}}} \quad (2.10)$$

De donde:

E = Voltaje aplicado al sistema

λ = Inductancia de los devanados de la carga

C = Valor del Capacitor

f_0 = Frecuencia de resonancia

f = Frecuencia del sistema

El rango de la frecuencia de resonancia puede obtenerse de la raíz cuadrada de la relación entre potencia de cortocircuito y el rango del capacitor (se asume implícitamente que la resistencia del circuito es mínima).

La atenuación del sobrevoltaje de resonancia ocurre cuando el circuito está cargado.

II.3.3.2. Problemas con un Factor de Potencia Bajo

Hemos visto la considerable influencia que el factor de potencia tiene sobre el valor de la corriente demanda en el sistema.

Este punto en que aumenta la corriente ocasionara muchas desventajas para el usuario industrial, todo lo cual tiene repercusiones financiera. Esas costosas desventajas pueden situarse en dos categorías;

Aumentan las pérdidas por efecto Joule las cuales son una función del cuadrado de la corriente,

- a) Los cables de alimentación.
- b) Los embobinados de los transformadores de distribución.

Las instalaciones no pueden ser usadas en toda su capacidad resultando en altos costos de depreciación. Esto es particularmente importante en el caso de transformadores de distribución.

Aunado a lo anterior, un aumento en la caída de voltaje resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámpara, etc.); estas cargas sufren de una reducción en su potencia de salida.

Esas desventajas también afectan al productor y al distribuidor de energía eléctrica. Es completamente comprensible, sin embargo, él debe penalizar al usuario haciendo que el mismo pague más por su electricidad, esto se puede observar en las penalizaciones económicas por bajo factor de potencia que se encuentra en la facturación respectiva.

II.3.3.2.1. Pérdidas en los Cables

Para la misma potencia activa transmitida, una mejora en el factor de potencia significa una reducción en la corriente principal.

Para un cable dado, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. Para mejorar el factor de potencia de un valor inicial $\text{Cos } \varphi_1$ a un valor $\text{Cos } \varphi_2$, las pérdidas I^2R en Watts pueden ser reducidas por un factor "K" (Ecuación 2.11)

$$K = \left[1 - \left(\frac{\text{Cos } \varphi_1}{\text{Cos } \varphi_2} \right)^2 \right] * 100\% \quad (2.11)$$

De donde:

$K = \text{Pérdidas en los Cables}$

$\text{Cos } \varphi_1 = \text{Coseno del Angulo } (\varphi) \text{ Inicial}$

$\text{Cos } \varphi_2 = \text{Coseno del Angulo } (\varphi) \text{ Final}$

Veamos que una mejora del $\text{Cos } \varphi$ de 0.6 a 0.8

$$K = \left[1 - \left(\frac{0.6}{0.8} \right)^2 \right] * 100\% = 44\%$$

reduce las pérdidas en 44% y una mejora de 0.6 a 1.00

$$K = \left[1 - \left(\frac{0.8}{1.0} \right)^2 \right] * 100\% = 64\%$$

resultará en una reducción del 64%.

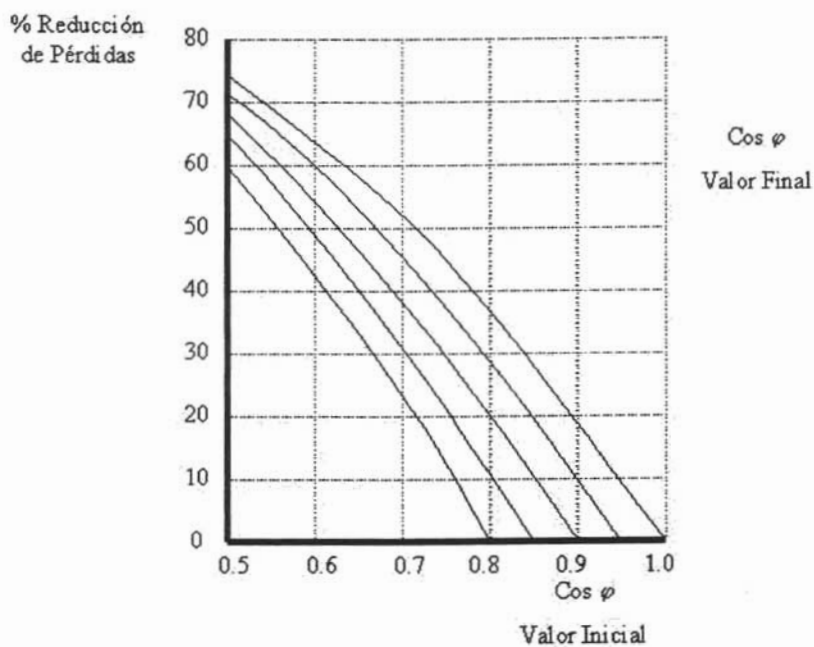


Figura 2.10

Grafica de Reducción de Pérdidas en Relación a el Factor de Potencia

El cálculo económico es tan simple como se muestra en este ejemplo:

Supongamos que tenemos una instalación que alimenta a un grupo de bombas.

El motor está clasificado en 37 kW a 380V, y tiene un $\cos \varphi = 0.72$

El cable alimentador es tipo aéreo de 35 mm² con una longitud de 180 m. la instalación está en servicio 480 horas / mes.

¿Cuál es el ahorro anual en kWh cuando el factor de potencia es mejorado de 0.72 a 0.95?

1. - Determinación de la corriente de fase

a) Considerando $\cos \varphi = 0.72$; tenemos

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \varphi} = \frac{37,000}{1.73 * 380 * 0.72} = 78A \quad (2.12)$$

b) Considerando $\cos \varphi = 0.95$; tenemos

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \varphi} = \frac{37,000}{1.73 * 380 * 0.95} = 59A \quad (2.13)$$

2. - Resistencia del cable (por fase)

De la Tabla 2.2 podemos obtener las pérdidas del cable para 35 mm^2 ;

$$35 \text{ mm}^2 \Rightarrow 0.0005 \text{ ohm/m} \quad (2.14)$$

Por lo tanto la resistencia total nos da:

$$0.0005 \text{ ohm/m} * 180 \text{ m} = 0.09 \Omega \quad (2.15)$$

La Tabla 2.2 muestra los valores de resistencia en Ohms por metro cuadrado de acuerdo a las regulaciones internacionales para muestra de un metro con sección transversal uniforme.

Tabla 2.2 Resistencia de Alambres de Cobre $\left(R = \frac{\rho L}{A} \right)$

Resistencia a 20 °C en alambre de cobre electrolítico			
Diámetro (mm)	Área de Sección (mm ²)	Peso (kg / km)	Resistencia (Ohms/m)
0.05	0.00196	0.017	8.796000
0.10	0.00785	0.070	2.196000
0.20	0.31420	0.280	0.549000
0.30	0.70960	0.629	0.244000
0.40	0.12570	1.120	0.137000
0.50	0.19640	1.750	0.087800
0.60	0.28270	2.520	0.061000
0.70	0.38480	3.430	0.044800
0.80	0.50270	4.470	0.034300
1.00	0.78540	6.990	0.022000
1.13	1.00000	8.900	0.017200
1.12	1.31000	10.070	0.015200
1.38	1.50000	13.350	0.011500
1.50	1.76700	15.730	0.009760
1.78	2.50000	32.300	0.006900
2.00	3.14200	28.000	0.005490
2.26	4.00000	35.600	0.004310
2.60	5.30900	47.300	0.003250
2.76	6.00000	53.400	0.002870
3.00	7.06900	62.900	0.002440
3.20	8.04200	71.600	0.002140
3.40	9.07900	80.800	0.001900
3.57	10.00000	89.000	0.001720
4.52	16.00000	142.400	0.001075
5.63	25.00000	222.500	0.000688
6.67	35.00000	311.500	0.000500
7.97	50.00000	445.000	0.000344
11.00	95.00000	845.500	0.000181

3. - Pérdidas Térmicas

a) Con $\cos \varphi = 0.72$; tenemos:

$$P = 3 * RI^2 = 3 * 0.09 * (78)^2 = 1,643W = 1.643kW \quad (2.16)$$

b) Con $\cos \varphi = 0.95$; tenemos:

$$P = 3 * RI^2 = 3 * 0.09 * (59)^2 = 940W = 0.940kW \quad (2.17)$$

$$\text{Ahorro en Pérdidas Térmicas} = 1,643 - 940 = 703 W \quad (2.18)$$

Este ahorro representa el 2% de la cantidad consumida, solamente por el concepto mínimo de "pérdidas en cables"

$$\frac{703W}{37,000W} * 100\% \approx 2\% \quad (2.19)$$

4. - Diferencia en Consumo Anual de Energía

Esta diferencia es posible determinarla sobre la base del *Ahorro en Pérdidas Térmicas*, *Horas de trabajo al mes* y *Los meses que comprenden el año*. Para lo cual tenemos:

$$\frac{703W * 480hrs / mes * 12meses}{1,000} = 4,050kWh / año \quad (2.20)$$

La determinación del ahorro económico anual se puede obtener si se sabe la tarifa local por kWh y multiplicando dicha tarifa por los kWh efectivos consumidos.

II.3.3.2.2. Pérdidas en un Transformador

Las pérdidas en un transformador son de dos clases diferentes:

- Pérdidas en el embobinado (cobre o aluminio).

- Pérdidas en el núcleo, corresponden aproximadamente a la potencia disipada en el transformador bajo condiciones sin carga.

II.3.3.2.2.a. Pérdidas en el Embobinado (Cobre ó Aluminio).

Para poder entender en función de en qué, se dan estas pérdidas aplicaremos un ejemplo, para lo cual nos auxiliaremos de la Figura 2.11.

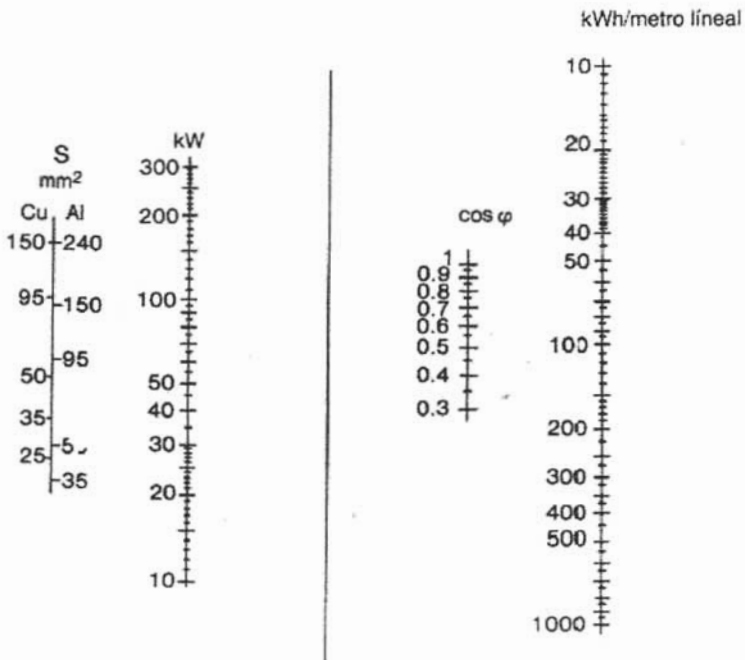


Figura 2.11

*Nonograma para la estimación de pérdidas activas por metro de cable
Para uso de potencia en un periodo de 3,000 horas por año con una
Alimentación de 380 Volts en un sistema Trifásico*

Las pérdidas en el cobre varían con el cuadrado de la corriente y por lo tanto están directamente relacionadas con el factor de potencia.

II.3.3.2.2.b. Pérdidas en el Núcleo

Las pérdidas totales con iguales pérdidas en el núcleo, más las pérdidas en el cobre a plena carga (Figura 2.13), corregidas, por la relación al cuadrado de las potencias aparentes, a la carga dada, divididas por la potencia a plena carga.

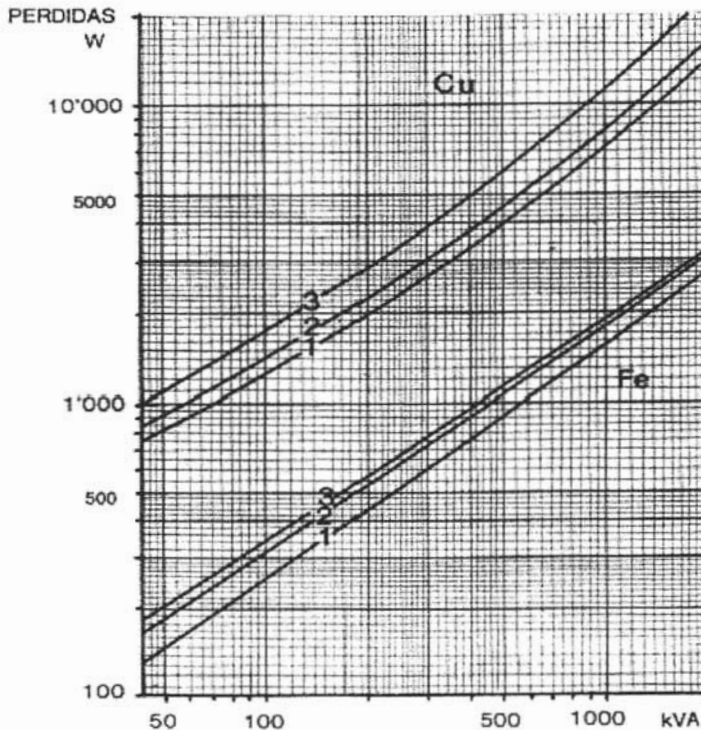


Figura 2.13

Valores de las pérdidas del núcleo y del bobinado de los transformadores en función de su salida nominal

- 3 = Transformador con pérdidas normales.
 2 = Transformador con pérdidas bajas.
 1 = Transformador con pérdidas extra-bajas

Ahora bien supongamos que tenemos un transformador de 500 kVA dando 300 kW con un factor de potencia de 0.7.

Las pérdidas totales son:

$$Pérdidas_Totales = Pérdidas_{Fe} + \left\{ Pérdidas_{Cu} \left(\frac{Potencia_Activa}{f.p. * Potencia_Aparente_{TR}} \right)^2 \right\} \quad (2.22)$$

$$1,150Fe + \left\{ 6,000Cu \left(\frac{300}{0.7 * 500} \right)^2 \right\} = 5,588W$$

Si el factor de potencia puede ser mejorado hasta la unidad,

$$1,150Fe + \left\{ 6,000Cu \left(\frac{300}{1 * 500} \right)^2 \right\} = 3,310W$$

las pérdidas se pueden reducir a 3,310 W, es decir, puede lograrse una ganancia de

$$\frac{5,588 - 3,310}{1,000} = 2.27kW \quad (2.23)$$

Suponiendo un tiempo de trabajo de 480 horas por mes, la reducción de pérdida anual será:

$$2.27 \text{ kWh} * 480 * 12 = 13.075 \text{ kWh} \quad (2.24)$$

Nota:

Si esta última cantidad de multiplica por la tarifa por kWh; se obtiene el costo de la reducción de pérdidas anuales.

II.3.3.2.3 Potencia Aparente Disponible en un Transformador

La potencia que puede ser liberada de un transformador está expresada en kVA, donde la potencia máxima corresponde, en un voltaje dado a la corriente máxima.

Esta es la máxima potencia aparente que un transformador puede entregar. Pero su requerimiento es para potencia activa. Un transformador es entonces mucho mejor utilizado cuando el factor de potencia de la carga esta cercano a la unidad. Esto es evidente si se observa la Figura 2.14.

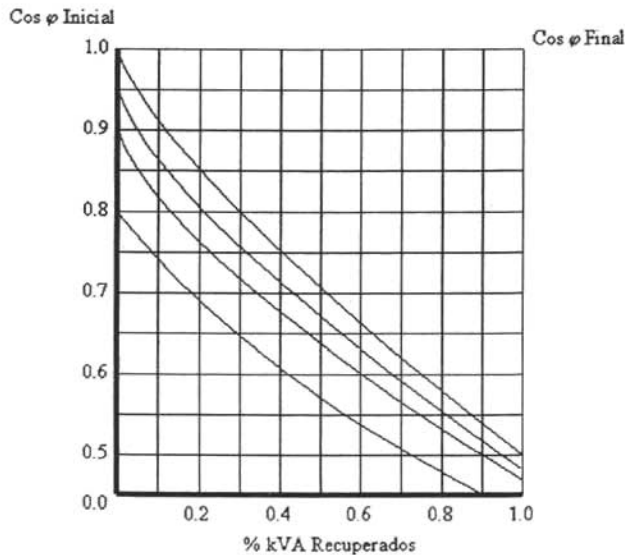


Figura 2.14

Recuperación de potencia en un Transformador

La potencia aparente esta aprovechable mientras se mantiene la misma potencia activa y está puede ser expresada por:

$$kVA_{RECUPERADOS} = kW \left(\frac{1}{\cos \varphi_1} - \frac{1}{\cos \varphi_2} \right) \quad (2.25)$$

De donde:

$kVA_{RECUPERADOS}$ = Capacidad del Transformador Recuperada

kW = Demanda del Sistema

$\cos \varphi_1$ = Factor de Potencia Inicial

$\cos \varphi_2$ = Factor de Potencia Final

Lo cual nos da en forma gráfica y por kW de carga, la potencia aparente recuperada.

Ejemplo:

Un transformador de 400 kVA; con una carga de 200 kW, con un factor de potencia $\cos \varphi = 0.5$, está cargado a su máximo. Si el factor de potencia puede ser mejorado a 0.8, otros 150 kVA serán aprovechables (Ecuación 2.26).

$$kVA_{RECUPERADOS} = 200kW \left(\frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) = 150kVA \quad (2.26)$$

Y si el factor de potencia puede ser mejorado en otro paso hasta 1.00, otros 50 kVA se aprovecharán (Ecuación 2.27).

$$kVA_{RECUPERADOS} = 200kW \left(\frac{1}{0.8} - \frac{1}{1.0} \right) = 50kVA \quad (2.27)$$

Esto muestra que tan importante es mantener el factor de potencia en la salida del transformador tan cercano a la unidad como sea posible.

CAPÍTULO III

**“MEDIDAS DE
CORRECCIÓN”**

III. Medidas de Corrección

III.1. Medición y Análisis de Corrientes Armónica

Para diagnosticar los problemas provocados por el flujo excesivo de corrientes armónicas es preciso definir parámetros de medida de las mismas y contar con los equipos que permitan medir los niveles de distorsión armónica en el sistema.

El análisis de estos flujos de corrientes se efectúan aplicando las leyes de Kirchhoff (Ver Apéndice-Leyes), para cada componente armónico existente en la red y tomando en cuenta la variación de la impedancia a diferente frecuencia de los elementos de la misma.

III.1.1. Parámetros de Medida

III.1.1.1. Espectros Discretos de Amplitud y de Fase.

Los espectros discretos de amplitud son gráficas mediante las cuales se relacionan las amplitudes de los diferentes términos de la Serie de Fourier y la frecuencia o el orden armónico.

III.1.1.2. Factores de Distorsión.

El factor de distorsión es una medida del alejamiento de la forma de onda de una función periódica cualquiera con respecto a otra con forma de onda senoidal pura. Este factor de distorsión, normalmente se expresa en porcentaje. Hay dos tipos de factores de distorsión:

- Factor de Distorsión de Voltaje (FDV) ó Total Harmonics Distorsion Volts (THDV).
- Factor de Distorsión Armónica Individual de Voltaje (DV_h)
- Factor de Distorsión de Corriente (FDI) ó Total Harmonics Distorsion Curren (THDI).
- Factor de Distorsión Armónica Individual de Corriente (DI_h)

III.1.1.2.a. Factor de Distorsión Armónica Total de Voltaje (FDV ó THDV)

El factor de distorsión total del voltaje (FDV ó THDV) se define como la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores eficaces de las componentes armónicas al cuadrado, desde $h = 2$ hasta $h =$ infinito, dividida entre el valor eficaz de la componente fundamental (Ecuación 3.1).

El THDV es igual al valor eficaz de la forma de onda de voltaje, excluyendo de la original la componente fundamental y la componente de corriente continua, dentro del valor eficaz de la componente fundamental.

Si una resistencia se alimenta con una forma de onda de voltaje distorsionada, la potencia debida a las armónicas dividida entre la potencia debida a la fundamental es igual al THDV al cuadrado.

También, el valor eficaz de la forma de onda de voltaje es igual al producto del valor eficaz de la componente fundamental y la raíz cuadrada de la suma de 1 más THDV al cuadrado.

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_i} * 100\% \quad (3.1)$$

$$h = 2, 3, 4, 5, \dots, \infty$$

De donde:

THDV = Total Harmonics Distorsion Volts (Distorsión Armónica Total de Voltaje)

V_h = Voltaje de la Señal Armónica

V_i = Voltaje Eficaz de la Señal Fundamental

III.1.1.2.b. Factor de Distorsión Armónica Individual de Voltaje (DV_h)

El factor de distorsión armónica individual de voltaje se define como la relación del valor eficaz de una armónica dada y el valor eficaz de la componente fundamental (Ecuación 3.2). Nos indica qué tan grande (o tan pequeña) es una armónica dada con respecto a la componente fundamental.

$$DV_h = \frac{V_h}{V_i} * 100\% \quad (3.2)$$

$$h = 2, 3, 4, 5, \dots, \infty$$

De donde:

DV_h = Distorsion Volts (Distorsión Armónica Individual de Voltaje)

V_h = Voltaje de la Señal Armónica

V_i = Voltaje Eficaz de la Señal Fundamental

III.1.1.2.c. Factor de Distorsión Armónica Total de Corriente (FDI ó THDI)

El factor de distorsión total del corriente (FDI ó THDI) se define como la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores eficaces de las componentes armónicas al cuadrado, desde $h = 2$ hasta $h = \infty$, dividida entre el valor eficaz de la componente fundamental. El THDI es igual al valor eficaz de la forma de onda de corriente, excluyendo de la original la componente fundamental y la componente de corriente continua, dentro del valor eficaz de la componente fundamental (Ecuación 3.3).

Si una resistencia se alimenta con una forma de onda de corriente distorsionada, la potencia debida a las armónicas dividida entre la potencia debida a la fundamental es igual al THDI al cuadrado.

También, el valor eficaz de la forma de onda de corriente es igual al producto del valor eficaz de la componente fundamental y la raíz cuadrada de la suma de 1 más THDI al cuadrado.

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (3.3)$$

$$h = 2, 3, 4, 5, \dots, \infty$$

De donde:

$THDI =$ Total Harmonics Distorsión Curren (*Distorsión Armónica Total de Corriente*)

$I_h =$ Corriente de la Señal Armónica

$I_1 =$ Corriente Eficaz de la Señal Fundamental

III.1.1.2.d. Factor de Distorsión Armónica Individual de Corriente (DI_h)

El factor de distorsión armónica individual de corriente se define como la relación del valor eficaz de una armónica dada y el valor eficaz de la componente fundamental (Ecuación 3.4). Nos indica qué tan grande (o tan pequeña) es una armónica dada con respecto a la componente fundamental.

$$DI_h = \frac{I_h}{I_1} * 100\% \quad (3.4)$$

$$h = 2, 3, 4, 5, \dots, \infty$$

De donde:

$DI_h =$ Distorsión Curren (*Distorsión Armónica Individual de Corriente*)

$I_h =$ Corriente de la Señal Armónica

$I_1 =$ Corriente Eficaz de la Señal Fundamental

III.1.2. Medición de Armónicas

Existen aparatos "Analizadores de Armónicas" por medio de los cuales la amplitud y la frecuencia de las diferentes armónicas pueden ser medidas.

Un analizador de armónicas incluye (Figura 3.1):

- Un circuito de entrada por medio del cual el voltaje suministrado puede ser reducido, o la corriente puede ser transformada en voltaje usando una carga puramente resistiva.
- Una serie de circuitos sintonizados a varias frecuencias de la armónica (filtro).
- Un amplificador de calibración, si se requiere.
- Un dispositivo de medición, dando ya sea una medición instantánea o un registro para un periodo dado.

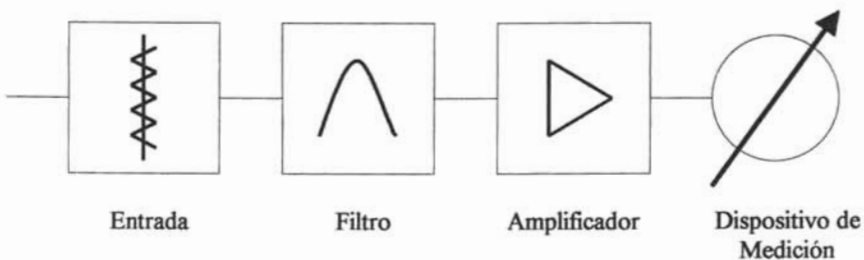


Figura 3.1

Diagrama de Bloques Típico de un Medidor de Armónicas

Los avances modernos en electrónica han resultado en reducción de peso (reemplazo de filtros inductivos por electrónica), y reducción en tamaño y costo.

Las etapas más significativas y de las cuales nos interesa abordar son:

- a) Como realiza la Medición el Analizador de Corrientes Armónicas
- b) El Cálculo del Contenido de Corrientes Armónicas presentes en el Sistema

A continuación se detallan estos conceptos:

a) Medición

Debe recordarse que una onda senoidal consiste de numerosas ondas de frecuencia múltiple. El aparato de medición, ya sea un voltímetro ó un amperímetro si se diseño para la fundamental (50-60 Hz), tiene curvas de respuesta que tiende a ser erróneos con los aumentos de frecuencia lo cual significa que existe un riesgo considerable que la lectura este fuera de la realidad.

Un buen aparato mostrará sobre su carátula el valor limite para uso de frecuencia. Debe ser posible al menos medir hasta la armónica 11.

Estas observaciones también se aplican al transformador de intensidad y especialmente para la pinza de gancho para medir Amperes. Un probador de gancho ligero y barato no se debe usar en redes que contengan armónicas.

Nota Importante: En la práctica aún un buen amperímetro no detectará la presencia de armónicas.

b) Cálculo

Cuando el valor de la fundamental y los valores (voltaje / corriente) de las frecuencias armónicas son conocidos, el valor efectivo puede ser calculado. El dispositivo aplica la Ecuación 3.5, para calcular el valor.

Así tenemos:

$$I^2 = I_f^2 + I_{h_1}^2 + I_{h_2}^2 + I_{h_3}^2 + \dots + I_{h_n}^2 \quad (3.5)$$

De donde:

I^2 = Corriente Efectiva al Cuadrado

I_f^2 = Corriente Fundamental al Cuadrado

I_{hn}^2 = Corriente de la Armónica "n" al Cuadrado

El cuadrado del valor efectivo es igual a la suma de los cuadrados de la fundamental y los valores armónicos.

La expresión se analiza agrupando la suma de los cuadrados del valor armónico. Este es la magnitud de la corriente armónica (Ecuación 3.6)..

Tenemos:

$$I = \sqrt{I_f^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3.6)$$

$$h = 1, 2, 3, 4, \dots, \infty$$

De donde:

I = Corriente Efectiva

I_f^2 = Corriente Fundamental al Cuadrado

ΣI_h^2 = Sumatoria de las Corriente de la Armónica "n" al Cuadrado

Esta Ecuación 3.6, se representa en la Figura 3.2.

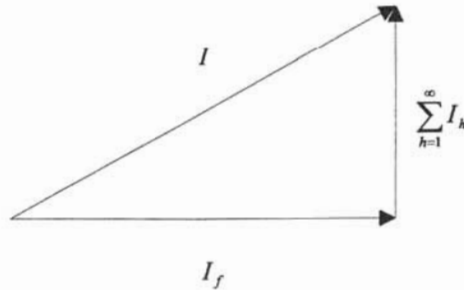


Figura 3.2

**Representación Grafica de la Corriente Eficaz
registrada en un Medidor de Armónicas**

La onda fundamental de corriente y la corriente armónica están en cuadratura (es decir, con una diferencia de fase de 90°). Si por ejemplo, la corriente armónica es igual al 20% de la corriente fundamental, la corriente total es aumentada en solo 2%.

III.1.2.1. Analizadores de Armónicas

Son analizadores de redes diseñados especialmente para medir espectros de corrientes armónicas mostrando los valores de distorsión armónica individual y distorsión armónica total de las ondas de tensión y de corriente. Junto a estos parámetros pueden presentar también valores de demanda de potencia activa y reactiva de la carga que se está analizando, junto con el factor de potencia y los valores r.m.s. de las ondas de tensión y de corriente. Además pueden tener capacidad de analizar y presentar en el espectro hasta el orden de la 40ª armónica, aunque en la práctica, contar con espectros de hasta la 20ª armónica suele resultar suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

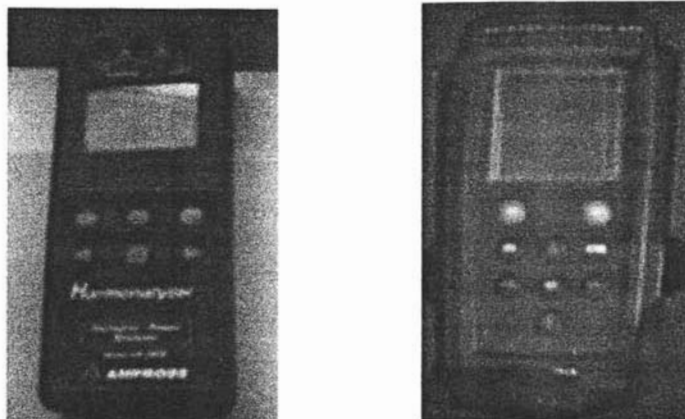


Figura 3.3
Medidores de Armónicas

III.2. Posibles Soluciones

III.2.1. La Elección del Equipo más Adecuado

El primer aspecto a tener en cuenta, es cual es el objetivo que se pretende mediante la incorporación de un equipo de control y/o eliminación de las corrientes armónicas, teniendo en cuenta las características del tipo de carga a compensar, habiendo efectuado previamente las tareas de medición de parámetros eléctricos y de corrientes armónicas tanto de tensión como de corriente.

Existen datos técnicos que son fundamentales conocer, para poder calcular el sistema de protección y por ende seleccionar el equipo mas adecuado, estos son:

1. Diagrama unifilar de la planta donde se efectuará la instalación, con impedancias de los transformadores principales.
2. Potencia de cortocircuito en el punto de acometida y variaciones posibles en la misma.
3. Máximos niveles de distorsión armónica.

4. Condiciones ambientales.
5. Tensión nominal de la red
6. Potencia reactiva requerida a frecuencia fundamental.
7. Corriente nominal y espectro de corrientes armónicas generadas por la carga.
8. Recibos del consumo de electricidad, por lo menos de un trimestre.

Las medidas correctivas que se vienen aplicando con éxito para resolver o minimizar este tipo de problemas, son básicamente de tres tipos:

- a) Medidas que tienden a bloquear el paso de las corrientes armónicas hacia equipos especialmente sensibles (Bancos de Capacitores, Tarjetas y Controles Electrónicos, Motores, etc.), quedando éstos protegidos de la influencia de las mismas, aunque estas corrientes armónicas sigan circulando por el resto de la red.

- Protección a Bancos de Capacitores.
 - Dispositivos de Bloqueo
- Reactores de choque.
- Transformador Estrella – Delta.
- Transformador Zig-Zag.
- Transformador de Aislamiento.
- Bloqueo de la 5ª y 7ª armónica.

b) Medidas que tienden a bloquear y/o absorber las corrientes armónicas, confinándolas a circular por zonas limitadas de la red, preferentemente circunscritas a los focos emisores de las mismas.

➤ Filtros de Absorción.

▪ Antirresonantes

○ Fijos

○ Automáticos

▪ Sintonizados.

➤ Filtros de Rechazo

➤ Compensadores Estáticos.

c) Medidas tendientes a sobredimensionar, recurriendo incluso hasta a diseños especiales, los equipos y conductores sometidos al flujo de corrientes armónicas, con objeto de minimizar los efectos nocivos provocados en los mismos.

➤ Sobredimensionamiento del Neutro.

➤ Transformador Tipo K.

III.2.2. Medidas que tienden a Bloquear el Paso de las Corrientes Armónicas

III.2.2.1. Protección a Bancos de Capacitores

Para evitar resonancias entre un capacitor y la red, colocaremos una inductancia en serie con el capacitor (Figura 3.4). Esta inductancia es calculada de tal forma que el acoplamiento entre capacitor y la inductancia, tenga una impedancia inductiva para todas las armónicas posibles en la red.

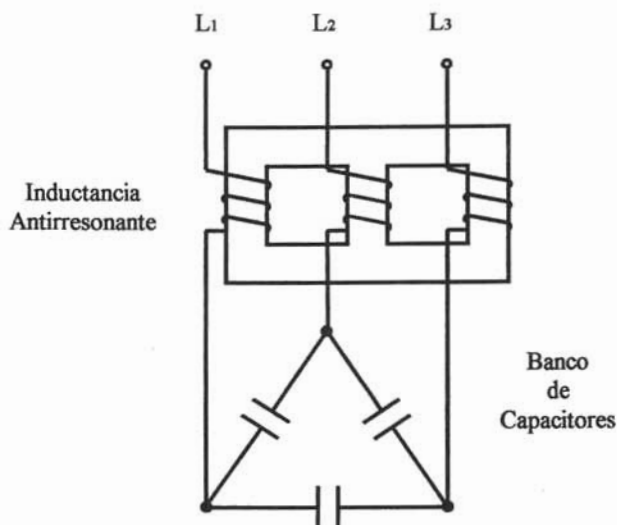


Figura 3.4

Capacitor Trifásico Protegido por una Inductancia Antirresonante

Dimensionamiento de la corriente

La impedancia proporcionada durante el flujo de la corriente armónica por el ensamble del capacitor y la inductancia, es menor que la ofrecida por el capacitor solo. Las inductancias deben ser, por lo tanto, diseñadas permanente para resistir corrientes armónicas considerables sin sobrecalentamiento o saturación.

En la práctica, los sobrevoltajes armónicos que crean el flujo de las corrientes armónicas en la inductancia y el capacitor son rara vez más del 5% arriba del voltaje nominal.

Voltaje en las terminales del capacitor

El voltaje en las terminales del capacitor aumentará debido a la presencia de la inductancia. Se deberá elegir un capacitor con un voltaje nominal más grande que el voltaje principal.

Nota:

No es siempre necesario proteger todos los capacitores conectados a la red. En efecto, a más alta potencia capacitiva instalada, más baja frecuencia de resonancia calculada en la red.

Existe una manera más sofisticada de proteger los capacitores de las corrientes armónicas, estos son los llamados Dispositivos de Bloqueo.

III.2.2.1.1. Dispositivos de Bloqueo

Un circuito de bloqueo es un circuito resonante que consta de una inductancia y un capacitor en paralelo (Figura 3.5).

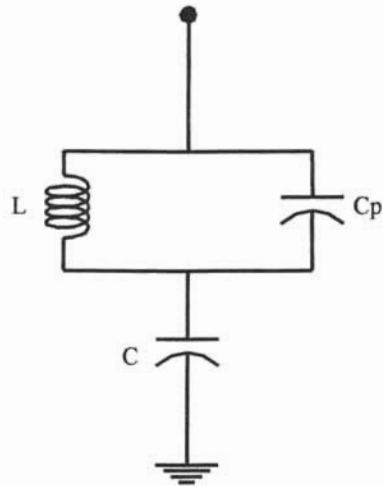


Figura 3.5

Dispositivo de Bloqueo Utilizando una Inductancia y un Capacitor en Paralelo

De donde:

C = Capacitor a Proteger.

L = Inductancia conectado Serie.

Cp = Capacitor conectado en Serie No Sintonizado.

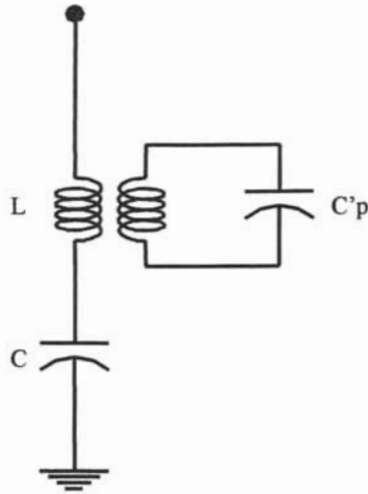


Figura 3.6

Dispositivo de Bloqueo utilizando una Inductancia con un Devanado Secundario y un Capacitor en Paralelo

De donde:

$C'p$ = Capacitor conectado en Serie al Capacitor a Proteger, Sintonizado a la Frecuencia de la Armónica más representativa en el Sistema y conectado en Paralelo con un Transformador de Inductancia L

Para reducir el costo del capacitor, la inductancia está normalmente equipada con un devanado secundario. El capacitor de filtro es entonces conectado atravesando el devanado secundario de alto voltaje (Figura 3.6).

En este caso, el valor del capacitor $C'p$ es igual a Cp multiplicado por la raíz cuadrada de la relación del transformador $N1/N2$ (Ecuación 3.7).

$$C'p = Cp \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} \quad (3.7)$$

De donde:

C_p = Capacitor conectado en Serie No Sintonizado.

$C'p$ = Capacitor conectado en Serie Sintonizado a la Frecuencia de la Armónica más Representativa en el Sistema.

N_1 = Número de Vueltas del Devanado del Primario del Transformador Conectado en Paralelo con el Capacitor $C'p$

N_2 = Número de Vueltas del Devanado del Secundario del Transformador Conectado en Paralelo con el Capacitor $C'p$

III.2.2.2. Reactores de Choque

Un variador de velocidad genera niveles de distorsión armónica de 45% en la onda de corriente. La instalación de variadores en serie hace necesaria la protección individual (para cada motor) con reactores de choque que impidan presentarse problemas de operación en el motor debido al flujo de corrientes armónicas proveniente de los demás variadores.

La Figura 3.7 muestra la forma de proteger una instalación de variadores de velocidad, con reactor de choque.

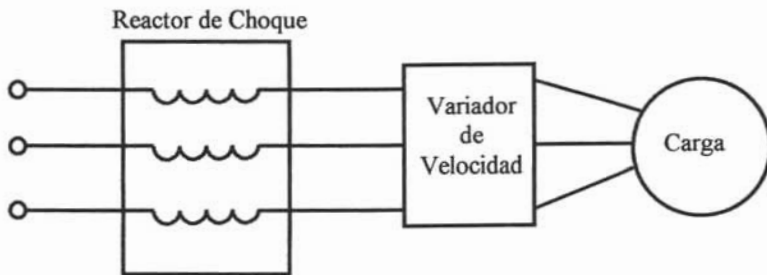


Figura 3.7

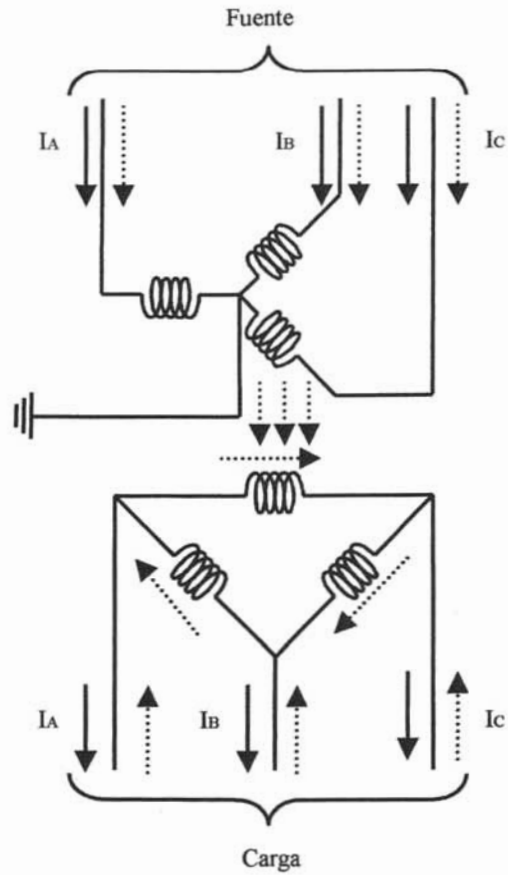
Esquema de Conexión de un Reactor de Choque

Los reactores comerciales se ofrecen con caídas de tensión (según la corriente nominal del variador) de 3% y 5%, a elegir por el usuario.

Estos reactores pueden amortiguar un poco las corrientes armónicas generadas por el variador; de 4% a 6% en el caso de reactores de 3% de caída de tensión y de 8% a 10% para reactores de 5%.

III.2.2.3. Transformador Estrella / Delta

Estos equipos son instalados para cuando se han detectado armónicas de secuencia cero (3^a , 5^a , 9^a , etc.) y su configuración puede observarse en la Figura 3.8.

**Figura 3.8*****Transformador Estrella - Delta***

III.2.2.4. Transformador Zig - Zag.

El transformador zig-zag proporciona un bloqueo muy eficaz de armónicas de secuencia cero, ya que el devanado en zig-zag produce el mismo desplazamiento angular que un devanado en delta, proporcionando además, un hilo de neutro para cargas monofásicas (Figura 3.9).

Aunque para su construcción necesita 15% más de material conductor, constituye una buena alternativa para sustituir a un transformador estándar cuando éste se está sobrecalentando por el flujo de corrientes armónicas, especialmente las de secuencia cero, tal como es el caso en instalaciones de alumbrado fluorescente y computadores personales.

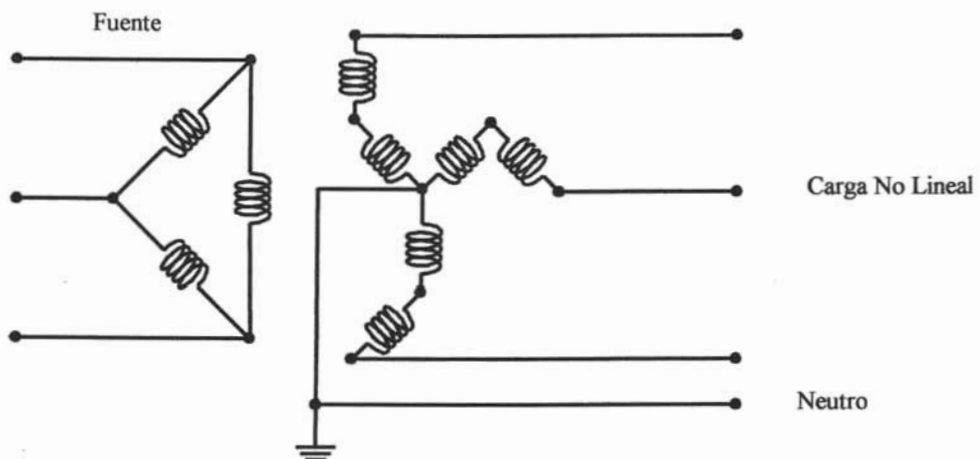


Figura 3.9

Esquema de un Transformador Zig - Zag

Se usa también para proteger Sistema Ininterrumpido de Potencia (UPS) que alimentan computadoras.

III.2.2.5. Transformador de Aislamiento

Estos son transformadores diseñados "a la medida" de la aplicación: tamaño de la carga, espectro emitido por la misma, impedancia de la fuente... etc., con blindajes y efectos capacitivos en el núcleo, para impedir el paso de altas frecuencias hacia el lado de la fuente (Figura 3.10). Normalmente la relación es 1/1.

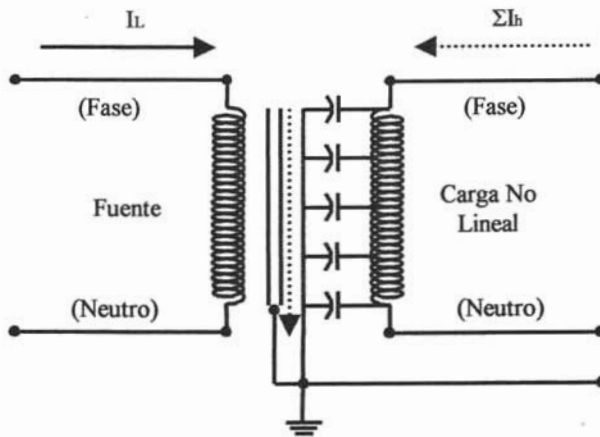


Figura 3.10

Funcionamiento y Capacidad de bloqueo de los Transformadores de Aislamiento.

III.2.2.6. Bloqueo de 5ª y 7ª Armónicas

Presentan una técnica de bloqueo de 5ª y 7ª armónicas usando doble variador de frecuencia con desfases de $+15^\circ$ y -15° en el disparo de ambos rectificadores de 6 pulsos (Figura 3.11). Se usan dos variadores, "A" y "B", idénticos para alimentar en paralelo a la carga, con 15° de adelanto, respecto a una referencia común, en el variador "A" y 15° de atraso en el "B". El comportamiento ante las barras de alimentación es como el de un solo variador de 12 pulsos de potencia.

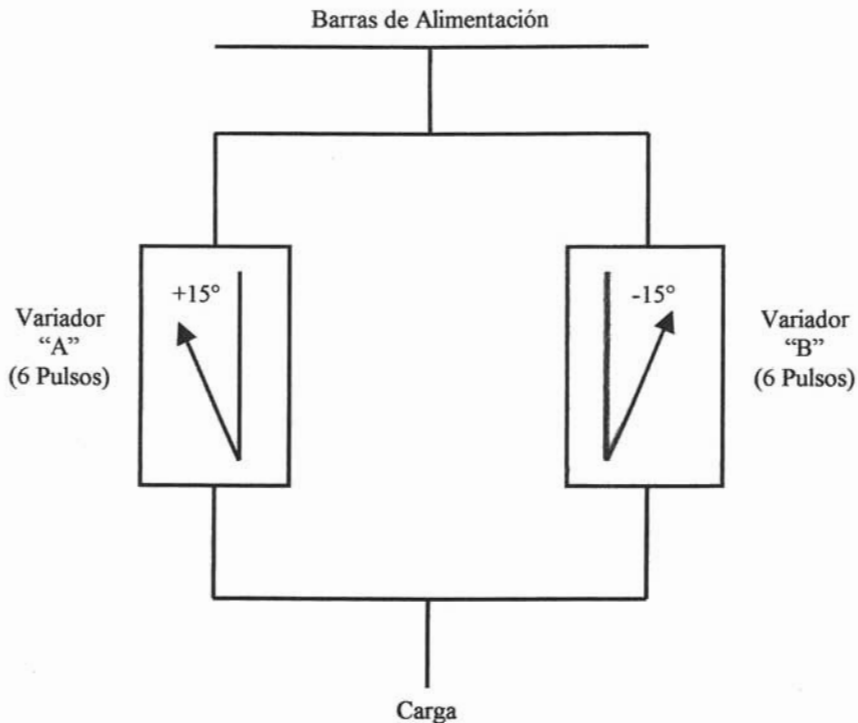


Figura 3.11
Sistema de Bloqueo de 5ª y 7ª Armónica

Otro arreglo más sofisticado que cumple con la misma función, se logra dividiendo los rectificadores de 6 pulsos en dos grupos idénticos alimentados cada uno con un transformador Delta/Delta y Delta/Estrella, respectivamente (Figura 3.12).

La carga se alimenta con dos variadores, "A" y "B", idénticos y cada uno de ellos se energiza por medio de un transformador Delta/Delta y Delta/Estrella, respectivamente. El desfase de 30° que ambos transformadores provocan en sus secundarios a la onda principal propicia el bloqueo de 5ª y 7ª armónicas en las barras alimentadoras, simulando el conjunto un solo variador de 12 pulsos.

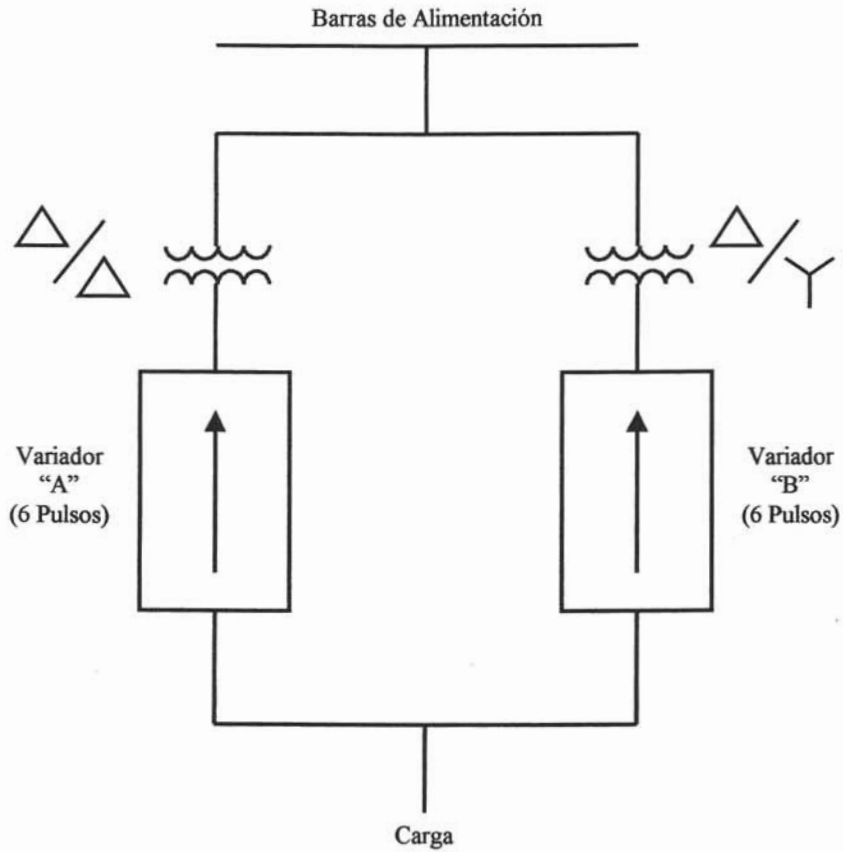


Figura 3.12

*Sistema de Bloqueo empleando
Transformadores en Arreglos Delta/Delta y Delta/Estrella*

III.2.3. Medidas que tienden a bloquear y/o absorber las corrientes armónicas

III.2.3.1. Filtros de Absorción

Si no desea transferir las armónicas (posiblemente al sistema en alto voltaje), pero en su lugar quiere eliminarlas, es necesario instalar filtros.

Los filtros no son usados para armónicas arriba de la 13^a porque su amplitud es despreciable en relación a la amplitud de la fundamental. Ocasionalmente, sin embargo, puede ser necesario eliminar una armónica de alto rango específica si está perturbando la red.

Los componentes básicos de un filtro de absorción son reactores y capacitores conectados en serie y sintonizados de forma que constituyan una baja impedancia para las armónicas que se deben absorber (Figura 3.14). El diseño tanto de capacitores como de reactores debe permitir la absorción de toda la energía que fluye por el sistema para cada armónica, ya que al presentar cada sección del filtro una impedancia casi nula para la armónica a la que se ha sintonizado, dicha sección se comporta como un sumidero de energía que puede fallar si no se dimensiona correctamente.

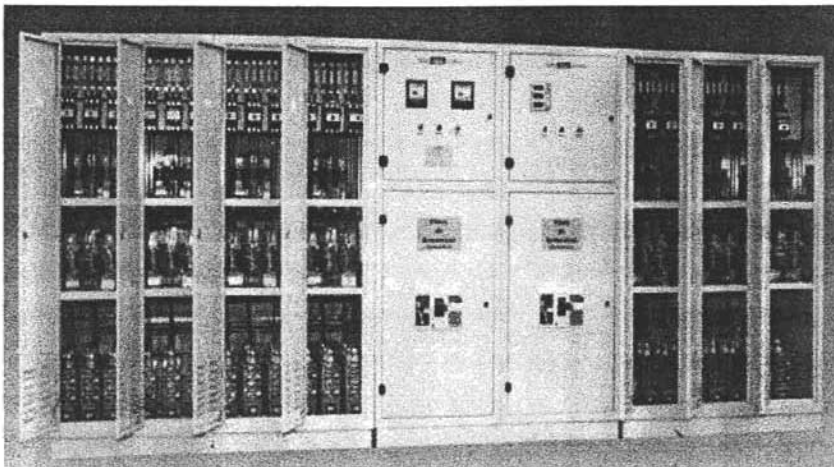


Figura 3.14

Filtro de Armónicas

Los Filtros de Armónicas son conectados en paralelo con la carga (Figura 3.15)

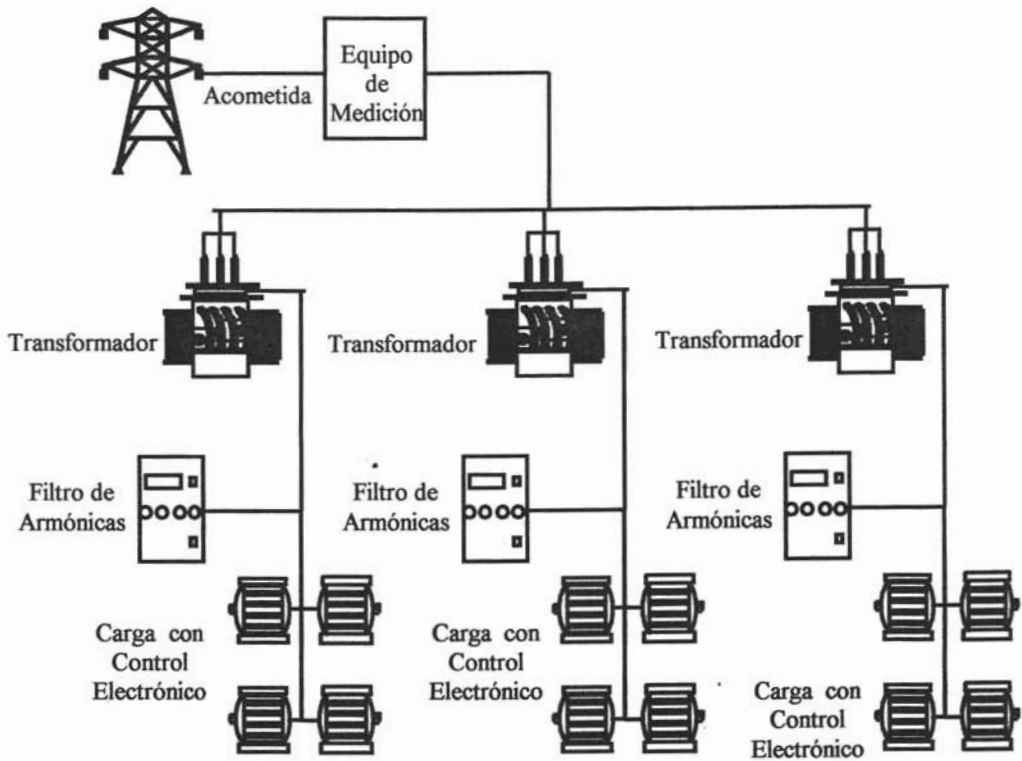


Figura 3.15

Representación Grafica de un Sistema con Filtros de Armónicas

La Figura 3.15 puede ser también representada por un diagrama unifilar (Figura 3.16), esto con la finalidad de facilitar el análisis de su operación.

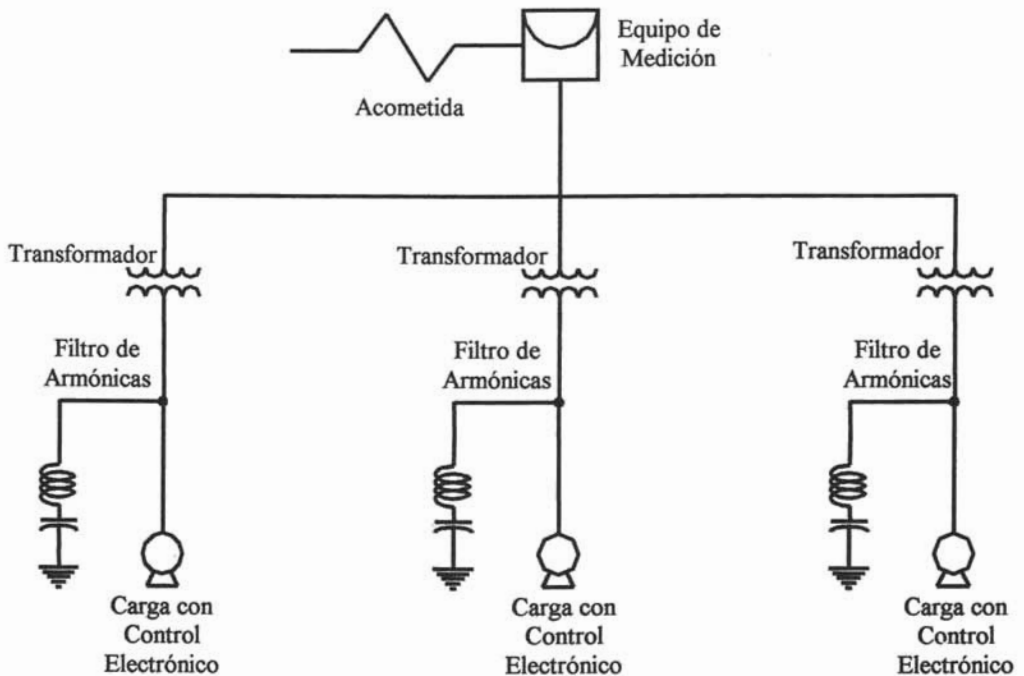


Figura 3.16

Diagrama Unifilar de un Sistema con Filtros de Armónicas

La corriente armónica generada por el control electrónico y misma que fluye hacia donde exista menor impedancia, cuando se instala un filtro de armónicas, este jala la mayor parte de estas corrientes parásitas dejando en el sistema una mínima cantidad de ellas, las cuales no generan grandes problemas en el sistema y por ende sus efectos son despreciativos (Figura 3.17)

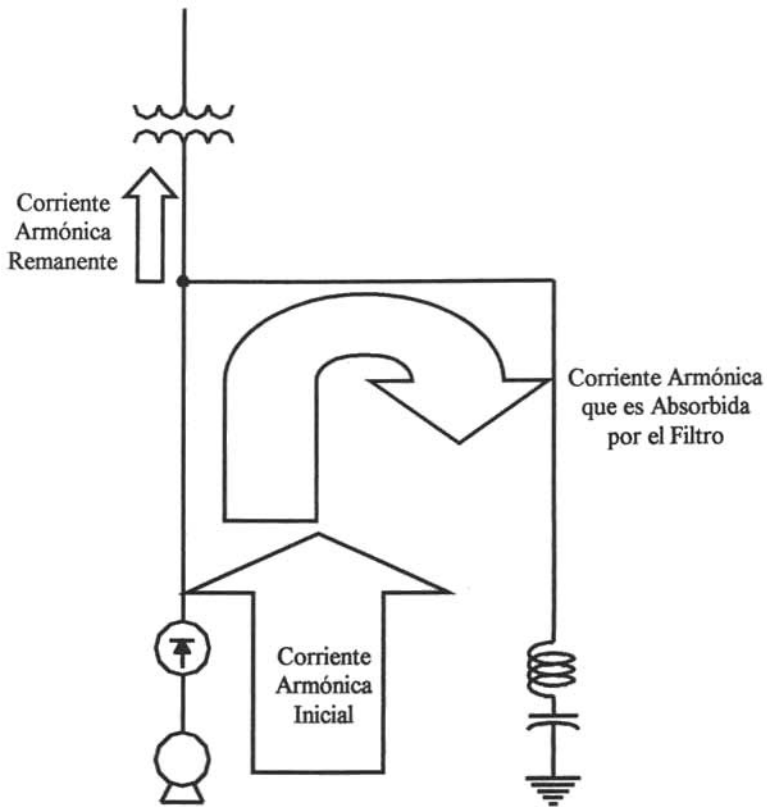


Figura 3.17

Comportamiento de las Armónicas cuando Existe en el Sistema Corrientes Armónicas

Los equipos de filtrado, empleados en las instalaciones industriales y redes antes mencionadas, permiten obtener las siguientes mejoras:

- ✓ Compensar el factor de potencia a cualquier valor deseado.
- ✓ Cumplir con la norma IEEE-519 (Ver Apéndice-Normas) en el punto de acometida.
- ✓ Optimizar energía (en realidad hay importantes disminuciones en los kWh consumidos)

- ✓ Proteger los capacitores.
- ✓ Eliminar resonancias.
- ✓ Absorber las armónicas del sistema.
- ✓ Evitar el factor de potencia adelantado, que prohíbe el artículo 64 del reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (Ver Apéndice-Normas). Estos se consiguen usando filtros de operación automática.
- ✓ Compensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental para un factor de potencia especificado.
- ✓ Disminuyen el porcentaje de distorsión armónica total (THD).
- ✓ Evitan fenómenos de resonancia, que surgirían al conectar capacitores sin protección contra armónicas.
- ✓ Disminución de pérdidas activas en cables y aparatos electromagnéticos, por reducción del THD.

Notas

- a) *Un filtro de armónicas elimina la mayoría de las armónicas a las cuales está sintonizado.*
- b) *Un filtro constituye un corto circuito para las corrientes armónicas no importando su intensidad. Si, por cualquier razón las corrientes armónicas en la instalación son más altas (o tienden a ser más altas) que la corriente para la cual el filtro ha sido calculado, al final puede provocar fuego (este es especialmente el caso de la inductancia). Para evitar esto, cada filtro debe estar protegido contra sobreintensidades por un relevador término ajustado a \pm 5% arriba de la corriente térmica de la inductancia.*
- c) *Para mejores resultados, un filtro debe ser sintonizado cerca del 4% debajo de la frecuencia de la armónica a ser eliminada.*

- d) *Cuando la intensidad de las corrientes armónicas aumenta al mismo tiempo que la potencia reactiva, es útil dividir el filtro en varios pasos controlados por un regulador de VARs.*

Básicamente, los equipos de filtrado permiten resolver los inconvenientes planteados en el Capítulo II. Para definir el tipo de equipo a instalar es necesario efectuar un minucioso estudio de armónicas, con mediciones de tensión y corriente, análisis mediante simulador y selección del equipo más adecuado. Como el circuito de filtrado absorbe parte o la totalidad de las armónicas generadas por los convertidores, deberá ser adecuadamente diseñado.

III.2.3.1.1. Filtros Antirresonantes:

Están diseñados para presentar una frecuencia de resonancia por debajo de la menor armónica que ofrece el sistema (generalmente la 5^o). El valor de frecuencia de desintonía se encuentra comprendido entre 179 y 223 Hz y se logra agregando un reactor de desintonía en serie con los capacitores de uso convencional. Dicho reactor elevará la tensión del capacitor por sobre la tensión de la red, siendo por lo tanto que la tensión nominal de éste deberá elegirse superior al valor resultante. El valor de la sobretensión en el capacitor dependerá del grado de desintonía elegido.

Este tipo de instalación tiene además un efecto parcial de filtrado permitiendo la reducción del nivel de distorsión armónica de tensión existente en la red, y este efecto es tanto más importante a medida que la frecuencia de resonancia del filtro se aproxima a la frecuencia de resonancia armónica natural, dicho en otros términos cuanto mayor es el grado de desintonía menor será la absorción de armónicas. Un mayor efecto de absorción (grado de filtrado) siempre depende de la impedancia de corto circuito del sistema y la resistencia residual del circuito de filtrado.

Los filtros antirresonantes (o de rechazo) se recomiendan para todos los casos donde las cargas generadoras de armónicas se encuentran entre un 20 y un 50% de la carga total a compensar, dependiendo este rango del grado de distorsión que presenten las cargas no lineales.

Así mismo este tipo de filtros pueden ser:

- Filtros Antirresonantes Fijos.
- Filtros Antirresonantes Automáticos.

III.2.3.1.1.1. Filtros Antirresonantes Fijos:

Están equipados con:

- ✓ Capacitores cilindricos antiexplosivos contruidos con film de polipropileno total autorregenerable (MKP) y/o film de polipropileno mas papel metalizado (MPP) con sistema de protección por sobre presión y resistores de descarga incorporados.
- ✓ Reactores antirresonantes trifásicos contruidos con chapa de acero magnético de bajas pérdidas, secado e impregnados con resina al vacío.
- ✓ Contactores equipados con relevo térmico.
- ✓ Fusibles de alta capacidad de ruptura para protección contra cortocircuitos.
- ✓ Gabinete adecuado para el grado de protección exigido por las condiciones ambientales donde el equipo será instalado.
- ✓ Cableado, barreado, morsetería de interconexión, forzadores de aire para ventilación, accesorios, etc.

III.2.3.1.1.2. Filtros Antirresonantes Automáticos:

Están equipados con:

- ✓ Conjunto de Capacitores cilíndricos antiexplosivos construidos con film de polipropileno total autorregenerable (MKP) y/o film de polipropileno mas papel metalizado (MPP) con sistema de protección por sobre presión y resistores de descarga incorporados para cada uno de los pasos que integran el banco.
- ✓ Un reactor antirresonante trifásico por paso construido con chapa de acero magnético de bajas pérdidas, secado e impregnado con resina al vacío.
- ✓ Contactores para cada paso, equipados con relevo térmico.
- ✓ Fusibles de alta capacidad de ruptura para protección contra cortocircuitos en cada paso del equipo.
- ✓ Relee controlador del factor de potencia microprocesado, con display indicador del factor de potencia y otras magnitudes eléctricas, fácilmente programable desde el frente del equipo.
- ✓ Gabinete adecuado para el grado de protección exigido por las condiciones ambientales donde el equipo será instalado.
- ✓ Cableado, barreado, morsetería de interconexión, forzadores de aire para ventilación, accesorios, etc.

III.2.3.1.2. Filtros Sintonizados:

Estos filtros presentan una impedancia muy baja para la corriente armónica individual, derivando la mayor parte de la corriente distorsionada, generada por las cargas no lineales, hacia el filtro y no hacia el suministro. El valor de frecuencia de resonancia en este caso, se encontrará siempre levemente por debajo de la armónica que se desea filtrar, aunque mucho más próxima que en el caso de los filtros desintonizados. En estos casos es muy importante tener en cuenta el valor de la corriente armónica máxima que se desea filtrar, pues de ésta dependen el dimensionamiento del reactor y de la tensión del capacitor. El dimensionamiento de este tipo de filtros, requiere por lo tanto un estudio más a fondo de las características de la instalación, las armónicas presentes y el objetivo de distorsión en barras al cual se quiere llegar.

III.2.3.2. Filtros de Rechazo

El funcionamiento de filtros de rechazo, es colocar en serie con los capacitores se instala un reactor de inductancia L , sintonizado con la capacitancia C del capacitor a una frecuencia inferior a la de cualquier armónica significativa existente en el sistema (Figura 3.18). El reactor se ha sintonizado con el capacitor a una 4ª. Armónica. Este dispositivo hace imposible la resonancia e impide que los capacitores absorban una corriente armónica excesiva. Por consiguiente, el uso del filtro de choque permite:

- ✓ Proteger a los capacitores
- ✓ Evitar resonancias
- ✓ Corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental

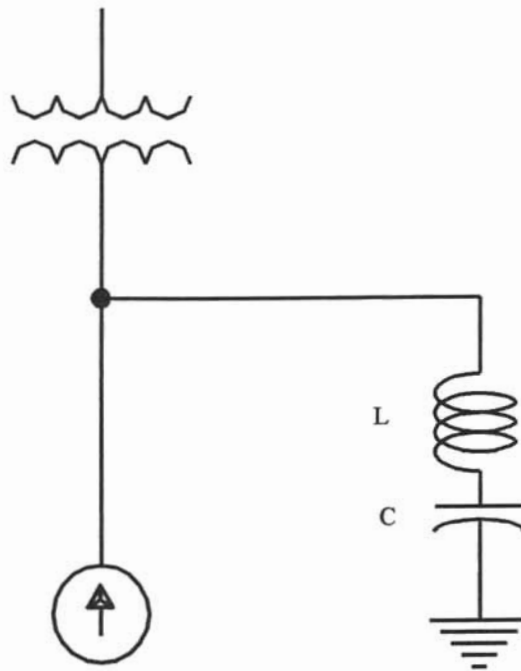


Figura 3.18

Diagrama de un Filtro de Rechazo

III.2.3.3. Compensadores Estáticos

En esencia, se trata de un filtro de absorción operando en paralelo con un reactor L, de la misma capacidad en KVA, a frecuencia fundamental, que de los capacitores, pero con un banco de tiristores que controla el paso de corriente al reactor de forma que, al fluir la energía reactiva de los capacitores pueda graduar casi instantáneamente el paso de la energía reactiva hacia la fuente de consumo, en parte hacia el reactor y en parte hacia la fuente de consumo (en este caso un Horno de Arco), tal como ésta la demande (Figura 3.19).

El uso del compensador estático permite:

- ✓ Proteger a los capacitores
- ✓ Evitar resonancias
- ✓ Eliminar armónica del sistema
- ✓ Controlar los transitorios
- ✓ Regular el nivel de tensión en el punto de conexión al sistema
- ✓ Corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental

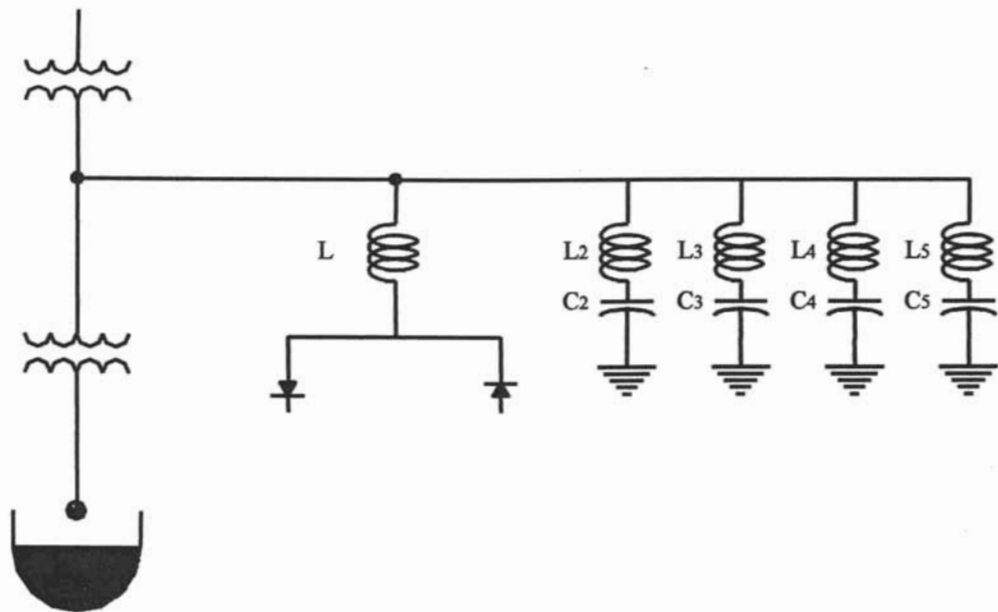


Figura 3.19

Compensador Estático conectado a un Horno de Arco

III.2.4. Medidas Tendientes a Sobredimensionar

III.2.4.1. Sobredimensionamiento del Neutro.

Las modernas balastras electrónicas de alumbrado fluorescente, las fuentes de poder de computadoras (especialmente PC's), estaciones de monitoreo, copiadoras y otros equipos electrónicos alimentados con fuentes de corriente rectificadas y a su vez en forma monofásica, provocan una fuerte distorsión armónica en la onda de corriente alimentadora, con alto contenido en 3ª, 9ª y 15ª armónica (armónicas de secuencia cero).

La tercera armónica puede causar serios problemas en los sistemas trifásicos, ya que estas corrientes no se cancelan en el conductor de neutro y pueden sobrecargarlo. Este conductor normalmente no está dimensionado para altas corrientes, ya que las corrientes de la fundamental se cancelan en el neutro. En el peor de los casos, la sobrecarga podría causar fuego. De cualquier manera, lo que usualmente sucede es que el interruptor del circuito se abre o se queman fusibles sin razón aparente, causando disturbios inexplicables en la operación.

Estas armónicas, al sumarse en el hilo de neutro de la instalación, provocan flujos de corriente en el mismo que pueden alcanzar valores eficaces de valor doble que la corriente en las fases.

En el caso de instalaciones con una gran proporción de carga consistente en los equipos electrónicos y en el código de instalaciones eléctricas norteamericano (NEC), en el inciso 210-4A (Ver Apéndice-Normas), indica que el conductor de neutro debe ser un calibre igual o mayor al de los conductores de fase.

Es importante también observar la caída de tensión que provocan estas corrientes de secuencia cero a través de la impedancia del hilo de neutro. A veces ésta puede ser lo suficientemente alta (10% valor pico, respecto a la amplitud fase/ neutro de la onda de tensión) como para provocar problemas de operación en equipo sensible.

III.2.4.2. Transformadores Tipo K

Los transformadores tipo K están diseñados y probados para operar con cargas no lineales. El factor K indica la severidad de la distorsión armónica que el transformador puede soportar.

Un transformador tipo K puede ocupar 130% a 140% de espacio y pesar 115% de un transformador estándar. El costo es aproximadamente el doble.

La capacidad en KVA de un transformador tipo K se calcula como la de un transformador estándar. El factor K se calcula a partir del espectro de corriente, medido o estimado, que producen las cargas, según los lineamientos de la norma ANSI/IEEE C57, 110-1986 (Ver Apéndice-Normas).

El método de cálculo del factor K cuando el transformador alimenta a una combinación de cargas emisoras de armónicas con distintos niveles de distorsión.

III.2.4.2.1. Factor K

Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a las armónicas es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce, de esta manera aparece el Factor K (Ecuación 3.8) el cual es aplicado a transformadores.

Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores, indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados, esto es:

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 h^2 \quad (3.8)$$

De donde:

K = Factor K

I_h = Corriente Armónica más representativa

I_{rms} = Corriente Eficaz del transformador

h = Grado de la Armónica más representativa

Donde la corriente de la Ecuación 3.8 es la corriente de la carga no lineal la cual será o es alimentada por el transformador.

Los Factores K más comunes de transformadores son de 4 y 13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.

CAPÍTULO IV

“CASO PRÁCTICO”

IV. Caso Práctico

IV.1. Antecedentes

Conscientes de la necesidad de mejorar continuamente las condiciones de operación en AceroCentro, S. A. de C. V., ha incluido en sus programas de mejora continua de resultados la optimización del uso de energía en sus instalaciones, a fin de reducir los costos y las inversiones para su mejor aprovechamiento, contribuyendo también a mejorar la calidad y capacidad de su producción.

IV.1.1. Descripción de la Empresa

La empresa AceroCentro, S. A. de C. V., fundada hace más de 30 años se encuentra ubicada en la Ciudad de León, Guanajuato, fundada en 1971 especializada en la elaboración de alambres pulidos y recocidos además de la fabricación de productos de alambre de acero electrosoldado, principalmente para refuerzo de concreto en la industria de la construcción.

IV.2. Desarrollo del Proyecto

El proyecto fue dividido en dos fases principales, las cuales se describen a continuación:

- ✓ Medición en el lado de baja tensión en el transformador principal que suministra energía eléctrica al proceso productivo. Cálculo de las pérdidas económicas y de energía eléctrica.
- ✓ Selección del equipo adecuado para reducir el flujo de corrientes armónicas en el sistema. La estimación del ahorro económico y de energía, que se obtendrá.

IV.2.1. Mediciones en Transformador Principal en el lado de Baja Tensión

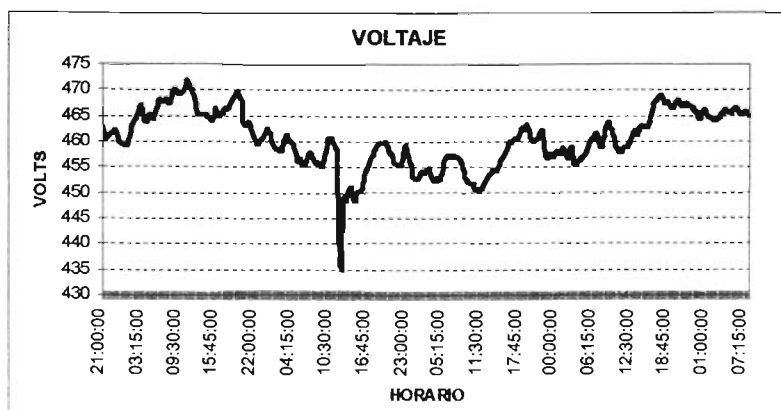
Es necesario realizar mediciones preliminares de manera continúa en el lado de baja tensión con la finalidad de poder obtener un perfil adecuado de los parámetros eléctricos más usuales (Voltaje, Corriente Trifásica, Demanda Trifásica, Factor de Potencia Trifásico, THDV, THDI, etc.)

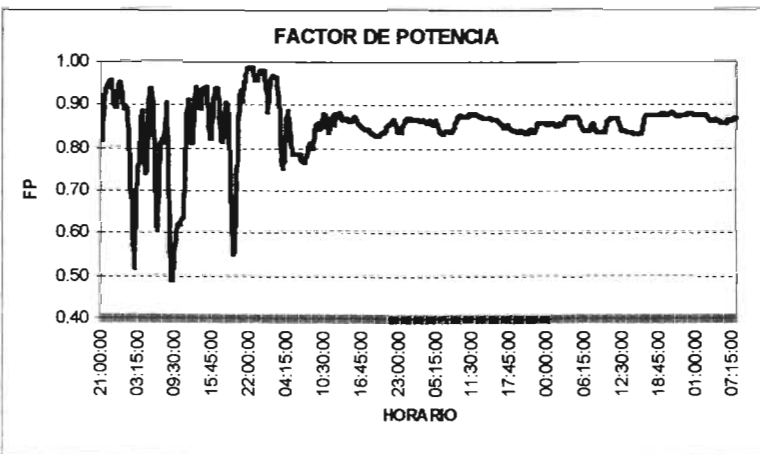
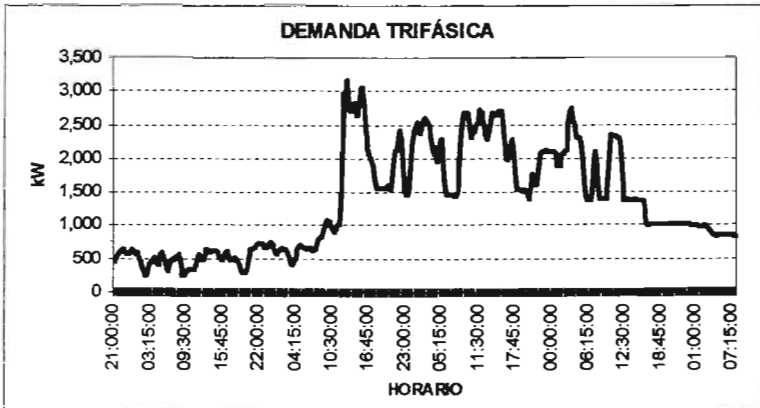
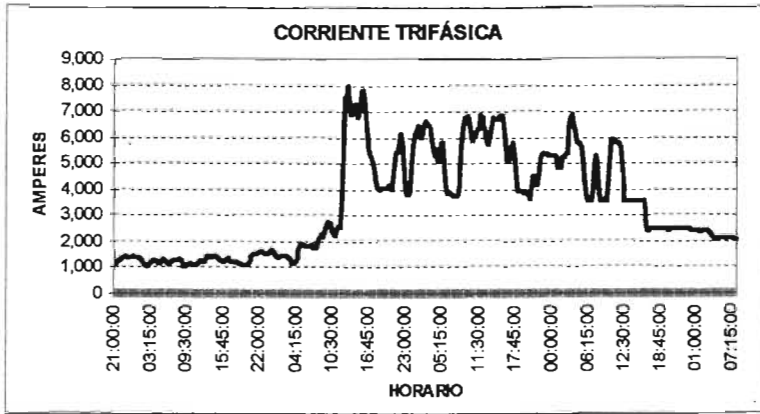
Tabla 4.1
Datos Generales del Transformador Principal

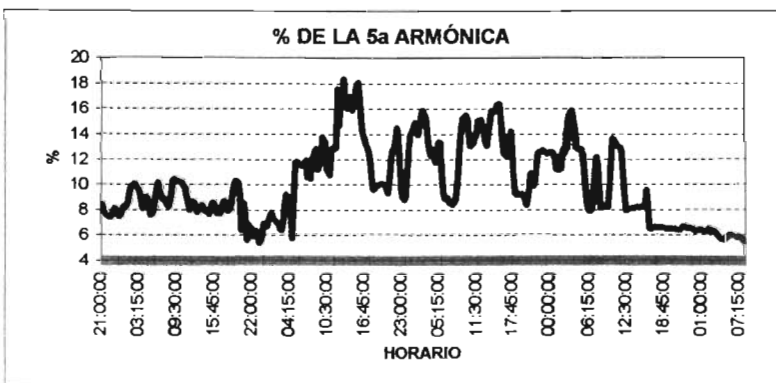
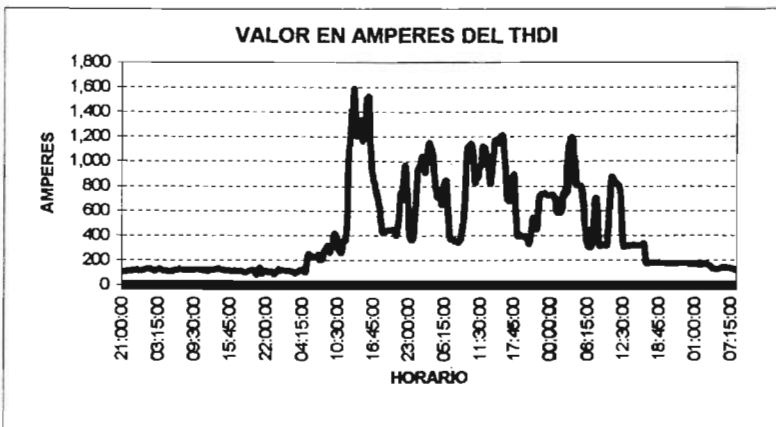
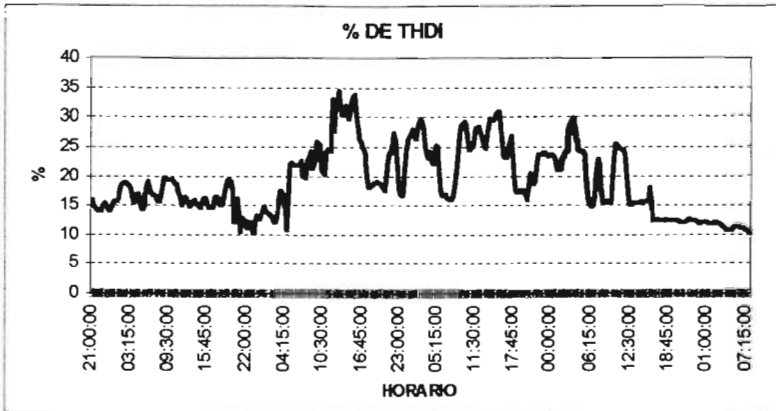
Capacidad Nominal (kVA)	Impedancia (%)	Tensión en el Primario (Voltaje)	Tensión en el Secundario (Voltaje)	Tipo de Enfriamiento
4,000	4.0	13,000	440	Sumergido en Aceite

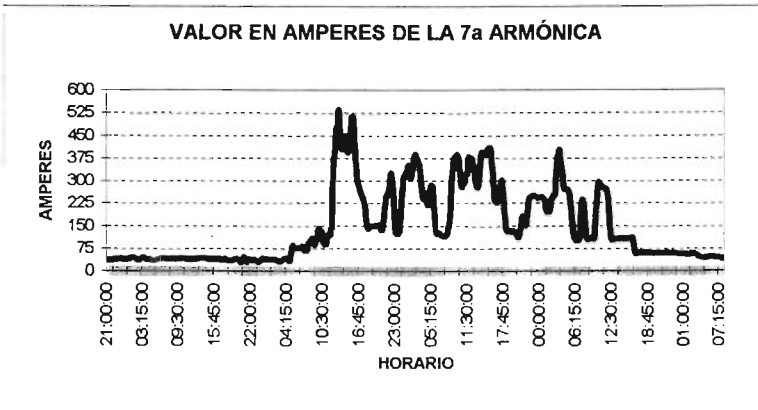
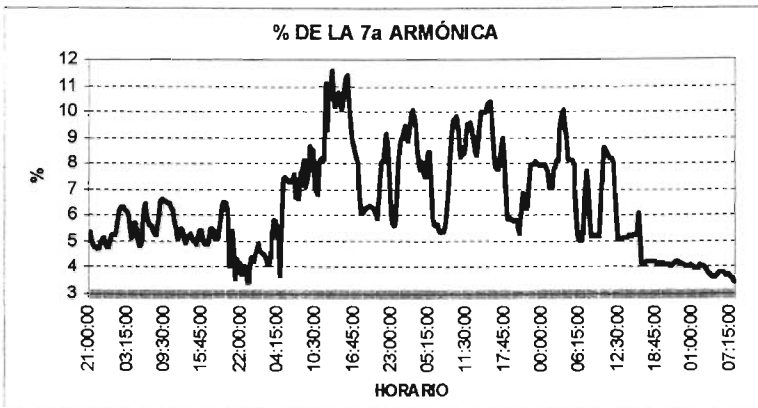
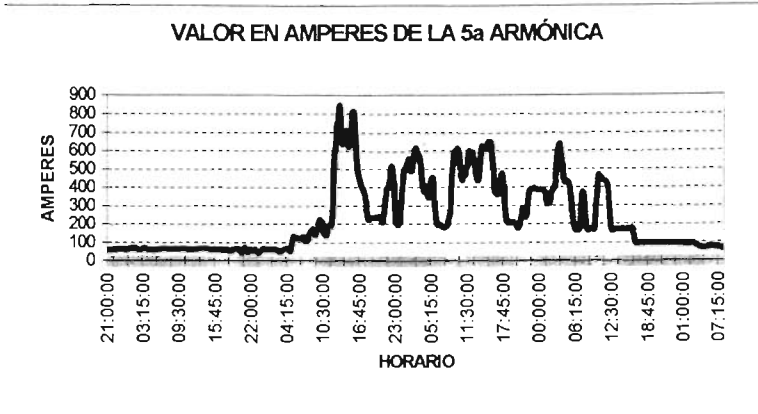
IV.2.1.1 Graficas de los Parámetros Principales

Estas mediciones fueron realizadas en los días de mayor producción y por un periodo aproximado de 96 horas (4 días).









IV.2.1.2. Cuadro de Mediciones

En el siguiente cuadro se muestran los parámetros registrados a carga máxima.

Tabla 4.2
Parámetros Registrados

Condiciones a Máxima Carga									
Voltaje	Corriente 3 ϕ	kW 3 ϕ	f. p. 3 ϕ	THD (%)	THD (A)	5a (%)	5a (A)	7a (%)	7a (A)
448.49	7,990.56	3,164.38	0.8830	34.47	1,590.52	18.33	845.61	11.60	535.33

IV.2.2. Anomalías Detectadas

Como se puede apreciar en la Tabla 4.2, los niveles de distorsión armónica total es de 34.47%, así mismo para la 5ª armónica se tiene 18.33% y la 7ª armónica tiene 11.60%, lo que representa que, estas dos armónicas son las de mayor presencia en el sistema. Aunado a lo anterior el factor de potencia se encuentra en 0.883, lo que genera una penalización en la facturación.

Por otro lado se nos comunico por parte del personal de mantenimiento, los constantes daños que sufren las tarjetas electrónicas de los equipos de control, de igual manera se nos indico que es muy usual reestablecer constantemente el interruptor termomagnético de los distintos capacitores que se encuentran en la empresa y después de un corto tiempo de haberlos adquirido es necesario el cambio de capacitores ya que se llegan a "ponchar" o de plano a estallar.

IV.2.3. Objetivos a Alcanzar

Una vez conocidos los niveles de corrientes armónicas, se planteo los objetivos a lograr, los cuales son:

- ✓ Eliminar del sistema eléctrico de la planta al menos el 50% de las corrientes armónicas.
- ✓ Elevar el factor de potencia por lo menos al 0.95 y con esto pasar de la penalización actual a una bonificación por un factor de potencia mayor a 0.90.
- ✓ Bajar los índices de daños en las tarjetas electrónicas y reducir el constante cambio de capacitores.

IV.2.4. Selección del Equipo más Adecuado

Debido a los requerimientos del cliente, en erradicar lo mejor posible las corrientes armónicas del sistema de distribución eléctrica se tomo la decisión de instalar un Filtro de Corrientes Armónicas, ya que estos equipos han demostrado eliminar en un buen porcentaje el contenido de armónicas, obteniendo además un protección muy efectiva a las tarjetas electrónica. Cabe destacar que para este caso el equipo cuenta con un banco de capacitores independiente con el objeto de corregir el factor de potencia .

IV.2.4.1. Dimensionamiento del Equipo (Filtro de Armónicas)

Una vez determinado el tipo de equipo a adquirir, es necesario dimensionar adecuadamente la capacidad del mismo (Tabla 4.3).

Tabla 4.3

Cálculo para determinar la capacidad del Filtro de Armónicas

5a (%)	5a (A)	7a (%)	7a (A)	I_5^2	I_7^2	ΣI_h^2	kVAr Calculados del Filtro
18.33	845.6	11.6	535.3	715,056.27	286,578.21	1,001,634.48	978.89

De donde:

I_5^2 = Valor al cuadrado en amperes de la 5ª armónica

I_7^2 = Valor al cuadrado en amperes de la 7ª armónica

ΣI_h^2 = Sumatoria de las corrientes armónicas al cuadrado

Debido a que los filtros de armónicas esta dimensionados de acuerdo a la potencia reactiva de los capacitores incluidos en el equipo, en necesario establecer los kVAr necesarios. La Ecuación 4.25, ha sido determinada por el fabricante para el dimensionamiento de sus equipos.

$$kVAr_{CALCULADOS} = \sqrt{\frac{\text{Voltaje_de_Sistema} * \Sigma I_h^2}{\text{seno}\phi * 1,000}} \quad (4.1)$$

$$kVAr_{CALCULADOS} = 987.89 \text{ kVAr (Ver Tabla 4.3)} \quad (4.2)$$

Se puede observar en la Ecuación 4.2, que la capacidad nominal del filtro podría ser de 1,000 kVAr, pero antes de tomar una decisión es fundamental, comprobar los kVAr "efectivos" que, el filtro de armónicas va contribuir al sistema (Ecuación 4.3). Esto se puede determinar calculando el derrateo que se producirá por la diferencia entre el voltaje prevaleciente en la red (real), y el voltaje nominal del equipo, que en este caso es de 480 Volts.

$$kVAr_{EFECTIVOS} = kVAr_{NOMINALES} \left(\frac{\text{Voltaje_Real}}{\text{Voltaje_No min al}} \right)^2 \quad (4.3)$$

Suponiendo un Filtro de Armónicas con capacidad nominal de 1,000 kVAr, así tenemos pues que:

$$kVAr_{\text{EFECTIVOS}} = 1,000kVAr \left(\frac{448.49V}{480V} \right)^2 = 873kVAr \quad (4.4)$$

Como se observa el filtro de 1,000 kVAr (Ecuación 4.4), no será suficiente, por lo que realizaremos el mismo análisis para un filtro de capacidad nominal de 1,200 kVAr (Ecuación 4.5).

$$kVAr_{\text{EFECTIVOS}} = 1,200kVAr \left(\frac{448.49V}{480V} \right)^2 = 1,047.62kVAr \quad (4.5)$$

El Filtro de Armónicas de 1,200 kVAr es el idóneo para cubrir las necesidades planteadas.

IV.3. Estimación de Ahorros

Reducción las corrientes armónicas

- % de THDI de acuerdo a la Tabla 4.2 = 34.47 % (4.6)

- % de Pérdidas de acuerdo a la Tabla 2.1 del Capítulo II (Utilizando Interpolación Lineal)

$$y = \frac{(y_1 - y_0)(x - x_0)}{x_1 - x_0} + y_0 = \frac{(16.1 - 13.4)(34.47 - 30)}{40 - 30} + 13.4 = 14.61\% \quad (4.7)$$

- kW de Pérdidas Reales

$$\% \text{ de Pérdidas} * kW \text{ operación} = (14.61\%) * (3,164.38 kW) = 462.31 kW \quad (4.8)$$

- Considerando que, el porcentaje de distorsión armónica en el sistema se reduzca al 17.23% (que representa la mitad del THDI original), tenemos una pérdida de eficiencia del 9.82% (ver Tabla 2.1, realizando interpolación lineal).
- Nivel de Pérdidas

$$\% \text{ Pérdidas (al 50\% del original)} * kW \text{ operación} = (9.82\%) * (3,164.38 kW) = 310.74 \quad (4.9)$$

- Ahorro en la Demanda Eléctrica (kW)

$$kW \text{ de Pérdidas Reales} - kW \text{ de Pérdidas a Obtener} = 462.31 kW - 310.74 kW = 151.57 kW \quad (4.10)$$

- Horas de Operación Promedio Mensuales = 589 h / mes (4.11)

- Reducción en el Consumo Eléctrico Anual

$$\text{Ahorro en Demanda} * \text{Horas de Operación al mes} * \text{Meses al Año} \quad (4.12)$$

$$151.57 kW * 589 h/mes * 12 meses = 1'072,357 kWh / año \quad (4.13)$$

- Precio Ponderado por kWh

Para poder determinar el precio por kWh durante el año y en vista de que se tiene contratada una tarifa donde el horario en que se consume la energía eléctrica es la que marca el precio de la misma, para determinar el precio ponderado en primera instancia nos auxiliaremos de la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

Datos a considerar para determinar el Precio Ponderado por kWh

TARIFA HM			
PERIODOS	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
HORAS AL AÑO ¹ (hrs. / año)	3,016	5,000	744
PORCENTAJE DE HORAS AL AÑO ²	34.43%	57.08%	8.49%
IMPORTE POR PERIODO ⁴	\$ 0.5247	\$ 0.6525	\$ 1.8218
IMPORTE APLICANDO EL % DE hrs. / año ⁴	\$ 0.1807	\$ 0.3724	\$ 0.1547

Notas:

1. Fuente: Pagina Web de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (www.cfe.gob.mx)
2. Para determinar el porcentaje de horas al año por periodo se efectuó la división de las horas correspondientes por periodo entre las 8,760 horas que contiene el año.
3. Son los determinados por CFE para el mes de enero de 2005.
4. Se obtuvo multiplicado el porcentaje de horas al año y el importe por periodo.

Una vez obtenido los importes ponderados por periodo se adicionan entre sí y nos da como resultado:

$$\text{Precio Ponderado} = \$ 0.1807 + \$ 0.3724 + \$ 0.1547 = \$ 0.7078 / kWh \quad (4.14)$$

- Beneficio Económico al Año

$$\text{Beneficio Económico} = \text{Precio Ponderado} * \text{Reducción en el Consumo Eléctrico Anual} \quad (4.15)$$

$$\text{Beneficio Económico} = \$ 0.7078 / kWh * 1'072,357 kWh / año = \$ 759,014.28 / año. \quad (4.16)$$

Corrección del factor de Potencia

- Cargo mensual por demanda y consumo eléctrico (para el mes de enero de 2005)

$$\$ 977,926.00 \quad (4.17)$$

- Porcentaje de penalización por bajo factor de potencia:

$$\%Penalización = \left[\frac{3}{5} * \left(\frac{90}{f.p.} - 1 \right) \right] * 100\% = \left[\frac{3}{5} * \left(\frac{90}{88.3} - 1 \right) \right] * 100\% = 1.155\% \quad (4.18)$$

- Monto de penalización:

$$\%Penalización * Facturación Mensual = 1.155\% * \$ 977,926 = \$ 11,295.05 / mes \quad (4.19)$$

- Porcentaje de bonificación propuesto por factor de potencia:

$$\%Bonificación = \left[\frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{f.p.} \right) \right] * 100\% = \left[\frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{95} \right) \right] * 100\% = 1.316\% \quad (4.20)$$

- Monto de bonificación:

$$\%Bonificación * Facturación Mensual = 1.316\% * \$ 977,926 = \$ 12,869.51 / mes \quad (4.21)$$

- Beneficio económico mensual por incremento del factor de potencia:

$$Penalización + Bonificación = \$ 11,295.05 + \$ 12,869.51 = \$ 24,164.56 / mes \quad (4.22)$$

- Beneficio económico anual por buen factor de potencia:

$$\text{Beneficio Mensual} * 12 \text{ meses} = \$ 289,974.72 / \text{año} \quad (4.23)$$

Beneficio por Reducción de Calentamiento en Cables (Efecto Joule)

En nuestro caso, para un factor de potencia de 88.3 %, la corriente consumida es:

$$\frac{f \cdot P_{\text{FUTURO}}}{f \cdot P_{\text{ACTUAL}}} = \frac{95\%}{88.3\%} = 1.076 \quad (4.24)$$

1.076 veces mayor que la que se consumiría con un factor de potencia del 95%, lo que significa que las pérdidas por calentamiento ($I^2 R$) se incrementan en

$$(1.076)^2 = 1.158 \text{ veces} \quad (4.25)$$

Suponiendo que las pérdidas de diseño en el sistema son del 5%, esto considerando el factor de potencia actual (88.3%). Ahora bien si se corrige el factor de potencia a 95% se podrá lograr una disminución en las pérdidas por el efecto joule (Ecuación 4.21).

$$\frac{5\%}{1.158} = 4.317\% \quad (4.26)$$

Esta reducción en las pérdidas representa un:

$$5\% - 4.317\% = 0.683\% \quad (4.27)$$

Este porcentaje puede ser aplicable como ahorro económico correspondiente en la facturación de electricidad.

- Reducción en el Consumo Eléctrico

Tomado como base el consumo eléctrico de la facturación correspondiente al mes de enero de 2005, tenemos:

$$1,027,596 \text{ kWh} / \text{mes} \quad (4.28)$$

Aplicando la reducción de las pérdidas al consumo eléctrico anual, se obtiene:

$$0.683\% * 1,027,596 \text{ kWh} / \text{mes} * 12 \text{ meses} = 84,222 \text{ kWh/año} \quad (4.29)$$

- Ahorro económico.

$$84,222 \text{ kWh/año} * \$ 0.7078 / \text{kWh} = \$ 59,612.33 / \text{año} \quad (4.30)$$

Beneficio económico total:

Resumen de beneficios anuales por:

✓	<i>Reducción de corrientes armónicas:</i>	\$	759,014.28 / año
✓	<i>Corrección del factor de potencia:</i>	\$	289,974.72 / año
✓	<i>Reducción de pérdidas efecto Joule</i>	\$	59,612.33 / año
✓	<i>Beneficio económico total:</i>	\$	1'108,601.33 / año

Nota:

A los importes mencionados se les deberá adicionar el Impuesto al Valor Agregado (IVA).

En la Figura 4.1, se muestra la forma en que se interconectó el Filtro de Armónicas al sistema de distribución eléctrica.

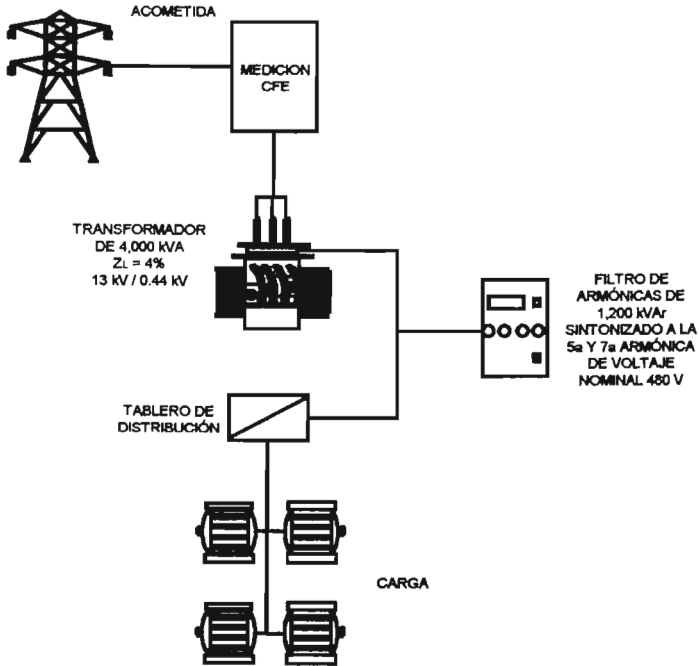


Figura 4.1

Esquema de Interconexión del Filtro de Armónicas

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Hemos visto en el Capítulo II, las severas consecuencias de que existan Corrientes Armónicas en el Sistema de Distribución Eléctrica, no solo al usuario que las genera sino también al entorno, es decir a otros consumidores de energía, estos daños que en un principio parecen despreciables, en un corto plazo se transforman en gastos económicos importantes para el que las padece.

En el Capítulo IV, se da a conocer un Caso Práctico de una industria con alto contenido de corrientes armónicas, se observa los registros de los parámetros eléctricos de manera continúa (perfiles de carga), en donde se puede observar claramente en la grafica de factor de potencia, en el primer tercio de la misma como se “botan y se restablecen” los interruptores termomagnéticos de los capacitores, hasta que, terminan por “poncharse” los capacitores y con esto el factor de potencia cae por debajo de 90% provocando una penalización en la facturación. También se presentan el método de calculo para dimensionar, en este caso, un filtro de corrientes armónicas. En el tema económico se percibe claramente un ahorro global de \$ 1'108,601.33 pesos (*Un millón ciento ocho mil seiscientos un pesos 00/100 m.n.*), que, comparado con el costo anual de la energía (\$11'735,112.00)*, representa el 9.44% de la facturación anual.

Por desgracia en la mayoría de las industrias se desconoce el concepto de Corrientes Armónicas ó no le toma importancia ya que por lo general se tienen ya establecidos los lineamientos de control y mantenimiento de las instalaciones, y hasta de cierta manera es “normal” que las tarjetas electrónicas se quemen, los capacitores se “ponchen” ó estallen, que los motores se lleven constantemente a rebobinar, etc. Ahora bien, el personal administrativo es muy difícil convencerlo de las repercusiones de tener este problema ya que en la actualidad este concepto no esta incluido en los cobros facturados.

*Este importe es el resultado del producto de la Ecuación 4.17, referente al costo mensual considerado, por los doce meses que conforman el año.

Por lo anterior es necesario crear conciencia de los efectos de estas corrientes parásitas y efectuar un Análisis de Corrientes Armónicas profundo en cada una de las empresas, oficinas y centros comerciales del país (Capítulo IV), para esto es fundamental que el personal de mantenimiento así como el administrativo se acerquen a los profesionales en Calidad de Energía Eléctrica y en caso de ser necesario implementar un proyecto de instalación de alguna de las alternativas presentadas en el Capítulo III, de acuerdo a los registros, fuentes de corrientes armónicas y a los equipo que se desean proteger; ya que los beneficios económicos son muy considerables (Capítulo IV).

Si le empresa no cuenta con los recursos económicos necesarios para implementar programas de calidad de la energía, existen instituciones como el Fideicomiso para el Ahorro de la Energía Eléctrica (FIDE) que podría financiar el proyecto, una vez que sus expertos hayan analizado y aceptado, el estudio de factibilidad del proyecto.

Considero que en un futuro no muy lejano se podría incluir en los parámetros que se registran el la facturación por concepto de suministro y aprovechamiento de la energía eléctrica, los niveles de distorsión armónica total e individual de voltaje y de corriente y con esto penalizar o bonificar económicamente al usuario que no cumpla con los lineamientos recomendados hasta ahora (5% de Distorsión Armónica Total de Voltaje y 10% de Distorsión Armónica Total de Corriente), como en nuestros días se efectúa con el Factor de Potencia.

APÉNDICE

APÉNDICE**Ecuaciones más Relevantes****Corriente**

Con resistencia

$$I = \frac{V}{R}$$

Con inductancia

$$I = \frac{V}{\omega L}$$

Con capacitor

$$I = \omega CV$$

En donde:

V = Voltaje (Volts)

I = Corriente (Amperes)

R = Resistencia (Ohms)

L = Inductancia (Henry)

C = Capacitancia (Faradios)

ω = Velocidad Angular ($\omega = 2\pi f$)

f = Frecuencia (Hertz)

Potencia

Con resistencia

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

Con inductancia

$$Q = \frac{V^2}{2\pi fL}$$

Con capacitor

$$Q = 2\pi fCV^2$$

En donde:

P = Potencia Activa o Potencia Real (Watts)

Q = Potencia Reactiva Capacitiva ó Inductiva (VAR's)

Perdidas en los Cables:

Las perdidas son en función de:

$$\left[1 - \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right] * 100\%$$

La caída de Voltaje equivale a:

$$\Delta V = I(\cos \varphi + \omega L \operatorname{sen} \varphi)$$

De donde:

$\cos \varphi_1 = \text{Coseno del Angulo } (\varphi) \text{ Inicial}$

$\cos \varphi_2 = \text{Coseno del Angulo } (\varphi) \text{ Final}$

Transformador

La caída de voltaje es igual a:

$$\Delta V = \Delta V_r \cos \varphi + \Delta V_s \operatorname{sen} \varphi$$

Capacitor

Las pérdidas están dadas por:

$$P = Q \tan \delta$$

Resonancia

Es obtenida para:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

En la que:

f_0 = frecuencia de resonancia en Hz.

L = inductancia en Henry

C = capacitancia en Faradios

Armónicas

En corriente tenemos:

$$I^2 = I_f^2 + I_{h_1}^2 + I_{h_2}^2 + I_{h_3}^2 + \dots + I_{h_n}^2$$

$$I = \sqrt{I_f^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

En donde:

I = Valor total

I_f = Valor de la onda fundamental (frecuencia de la red).

I_h = Valor efectivo de la armónica.

Las relaciones son idénticas en voltaje, por lo que I debe ser reemplazada por V .

Factor K

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 h^2$$

De donde:

K = Factor K

I_h = Corriente Armónica más representativa

I_{rms} = Corriente Eficaz del transformador

h = Grado de la Armónica más representativa

Dimensionamiento de Filtros de Armónicas

$$kVAr_{\text{CALCULADOS}} = \sqrt{\frac{\text{Voltaje_de_Sistema} * \Sigma I_h^2}{\text{seno}\phi * 1,000}}$$

$$kVAr_{\text{EFECTIVOS}} = kVAr_{\text{NOMINALES}} \left(\frac{\text{Voltaje_Real}}{\text{Voltaje_Nominal}} \right)^2$$

Interpolación Lineal

$$y = \frac{(y_1 - y_0)(x - x_0)}{x_1 - x_0} + y_0$$

% de Penalización

$$\left[\frac{3}{5} * \left(\frac{90}{f.p.} - 1 \right) \right] * 100\%$$

% de Bonificación

$$\left[\frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{f.p.} \right) \right] * 100\%$$

Leyes

Las Leyes de Kirchhoff de voltaje y corriente son dos métodos muy utilizados en el análisis de circuitos eléctricos. Al aplicar estos métodos podemos determinar valores desconocidos de corriente, voltaje y resistencia en circuitos resistivos.

La Primera Ley de Kirchhoff o Ley de Kirchhoff de Corrientes establece lo siguiente:

La suma algebraica de las corrientes en cualquier nodo en un circuito es cero. Las corrientes que entran al nodo se toman con un mismo signo y las que salen con el signo contrario.

La Segunda Ley de Kirchhoff o Ley de Kirchhoff de voltajes se aplica a las trayectorias cerradas y establece lo siguiente:

En una malla, la suma algebraica de las diferencias de potencial en cada elemento de ésta es cero. Las caídas de voltaje se consideran con un mismo signo, mientras que las subidas de voltaje se consideran con el signo contrario.

Normas

*Las recomendaciones del IEEE std 519 “ *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*” son las siguientes

Tabla A.1. Límites de distorsión de voltaje

Voltaje del bus	IHD	THD
$\leq 69 \text{ KV}$	3.0	5.0
$69 \text{ KV} < V_{\text{bus}} \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$> 161 \text{ KV}$	1.0	1.5

Tabla A.2. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 KV

Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares

I_{cc} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares

*Tabla A.3. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 69 001 V a 161 KV
Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares*

I_{cc} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<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	2.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares

*Tabla A.4. Límites de distorsión de corriente para sistemas mayores a 161 KV
Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares*

I_{cc} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares

I_{cc} Corriente máxima de corto circuito

I_L Corriente máxima de demanda (fundamental)

*ARTICULO 64 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.- Para los suministros en que intervenga el factor de potencia, el usuario conservará éste en la operación de su instalación entre noventa centésimos atrasado y uno, de acuerdo con las disposiciones que expida la Secretaría. El usuario no podrá regresar energía activa o reactiva a las líneas del suministrador, excepto cuando celebre convenio al respecto con el mismo. La contravención a estas disposiciones hará procedente la aplicación de las penalizaciones que prevean las disposiciones tarifarias, sin perjuicio de las sanciones que correspondan en los términos de la Ley y de este Reglamento por variar las condiciones del suministro.

*La norma ANSI/IEEE C57 110-1986, recomienda que los equipos de potencia que deban alimentar cargas no lineales (por ejemplo computadoras), operen a no más de un 80% de su potencia nominal. Es decir, los sistemas deben calcularse para una potencia del orden del 120% de la potencia de trabajo en régimen efectivo.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Armónicas en Sistemas Eléctricos Industriales, Armando Llamas, Salvador Acevedo, Jesús Báez, Jorge de los Reyes, Innovación Editorial Lagares México
- ✓ Electrical Power Systems Quality, roger c. Dugan, Mark F. McGranaghan, H.Wayne Beaty, Mc Graw Hill.
- ✓ *Circuitos Eléctricos*
Serie Schaum Mc Graw Hill
Edminister, Joseph., Nahvi, Mahmood
- ✓ Circuitos Eléctricos Análisis de Modelos Circuital Tomo I
Alfaomega
Oueyo, Héctor., Marco, Carlos
- ✓ Manual de Laboratorio para Circuitos Eléctricos
Alfaomega
Avtgis, Coughlin
- ✓ Practicas de Electricidad
Alfaomega
Zbar, Rockmaker., Bates
- ✓ Tratado de Electricidad Tomo 2 Corriente Alterna
Gustavo Gili Dawes
- ✓ Electrónica de Potencia
Prentice hall
Hart, Daniel

- ✓ Electrónica de Potencia Circuitos Dispositivos y Aplicaciones
Prentice Hal
Rashid, Muhammad

- ✓ Electrónica de Potencia Teoría y Aplicaciones
Alfaomega
Benavent García, José Manuel

- ✓ Transformada de Laplace
Mc Graw Hill
Murria R. Spiegel

- ✓ Corrientes Armónicas
Técnica Salgar
Crespo Navarro Alfredo