

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería en Electricidad  
y Computación

“Calidad de Energía Eléctrica:  
Análisis Armónico de Sistemas Eléctricos  
de Potencia”

## **TESIS DE GRADO**

Previo a la Obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización POTENCIA

Realizada por:

**Vicente Gaston Nieto Gallino**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**1998**

## AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi profundo agradecimiento a quienes en la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, de forma directa e indirecta hicieron posible este trabajo. En especial al Ing. Otto Alvarado Moreno, Director de Tesis, por su ayuda y colaboración.

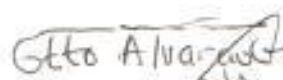
DEDICATORIA

A MIS PADRES  
A MIS HERMANOS



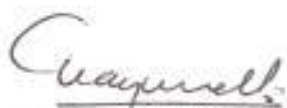
---

Ing. Armando Altamirano Chavez  
Sub-Decano



---

Ing. Otto Alvarado Moreno  
Director de Tesis



---

Ing. José Layana Chancay  
Miembro Principal



---

Dr. Cristóbal Mera Gencon  
Miembro Principal

## DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)

.....  
Vicente Gastón Nieto Gallino

## RESUMEN

El presente trabajo es un estudio del comportamiento de los equipos eléctricos y Sistemas de Potencia bajo los efectos de las corrientes y voltajes armónicos.

Accionamiento eléctricos de motores de velocidad variable, hornos de inducción, rectificadores e inversores, equipo electrónico que utilicen fuentes conmutadas, tales como computadoras, monitores de video, máquinas de fax, etc., actúan como fuentes de armónicos debido a su comportamiento no - lineal. Estas corrientes armónicas combinadas con la impedancia del sistema eléctrico resulta en la distorsión armónica de la tensión.

La introducción de este documento nos da una idea del tema de Calidad de Energía Eléctrica, su concepto, su importancia, sus efectos y los tipos de problemas que generan.

El concepto de armónico, el análisis de las formas de onda, así como el estudio teórico de la manera como ciertos equipos eléctricos, tales como transformadores saturados, convertidores estáticos de potencia, máquinas rotativas, banco de capacitores para corrección del factor de potencia y equipos de arco, introducen armónicos en los sistemas de potencia, son tratados en el Capítulo I.

En el Capítulo II, el tema de análisis son los equipos eléctricos y los sistemas de potencia bajo los efectos de las corrientes y voltajes armónicos. En la primera parte de este capítulo, examinamos el comportamiento de los equipos eléctricos (transformadores, convertidores, máquinas rotativas y capacitores) bajo la influencia de las corrientes y voltajes armónicos y los efectos que estas corrientes causan en ellos. En la segunda parte estudiamos al Sistema Eléctrico de Potencia en general afectado por el flujo de corrientes armónicas, la propagación de las señales armónicas en la red y las respuesta que da el sistema, como el fenómeno de resonancia. Todo esto se resume en la obtención de la característica Impedancia-

Frecuencia de dicho Sistema de Potencia. Se trata el tema de la interferencia telefónica sus causas y efectos.

Las mediciones, estándares y normas que se utilizan para realizar un estudio de los efectos armónicos en los equipos eléctricos y en los Sistemas de Potencia, se examinan en el Capítulo III. Este se inicia con los conceptos de las mediciones a realizar, estas son mediciones para distorsión armónica individual y total (THD y DIN) para corriente y voltaje y las mediciones de interferencia telefónica (TIF, producto VT y Producto IT). Seguidamente se tratan las normas y estándares de estas mediciones, que nos dan los niveles y límites permisibles de estas perturbaciones en los equipos eléctricos y en cualquier punto del Sistema de Potencia

En el Capítulo IV se presentan las técnicas y medidas para el control y reducción de las armónicas en los Sistemas de potencia, se explican las etapas (planeación, pre-operacional y operación) a seguir para el diseño y construcción de un sistema eléctrico con cargas especiales. También se hacen anotaciones sobre el diseño y construcción de equipos eléctricos y electrónicos para soportar los problemas que causan estas perturbaciones.

Las responsabilidades que tienen las empresas eléctricas y consumidores en la generación y atenuación de las distorsiones armónicas son también indicadas en esta parte. Las técnicas de supresión de armónicos en los Sistemas de Potencia y las alternativas para la correcta selección y diseño de los circuitos de filtrado para atenuar dichas señales armónicas forman también parte de este capítulo.

Finalmente se realiza el análisis de un caso real utilizando como herramienta el programa WHARMZW, que permita examinar un sistema de potencia en condiciones de no linealidad.

## INDICE GENERAL

RESUMEN	
INDICE GENERAL	
INDICE DE TABLAS	
INDICE DE FIGURAS	
INTRODUCCION	

### CAPITULO I

#### ARMONICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS

1.1 Análisis de armónicos	21
1.2. Armónicos de voltaje y de corriente	24
1.2.1 Armónicos de corriente	24
1.2.2 Armónicos de tensión	25
1.3 Fuentes armónicas	26
1.3.1 Generalidades	26
1.3.2 Transformadores	28
1.3.2.1. Circuito magnetizante y característica normal de excitación	28
1.3.2.2. Armónicas en transformadores monofásicos	35
1.3.2.3. Armónicas en transformadores conectados en red	36
1.3.2.3.1. Armónicas en transformadores en delta	36
1.3.2.3.2. Armónicas en transformadores en estrella	36
1.3.2.4. Armónicas en transformadores con devanado terciario	38
1.3.2.5. Corriente de irrupción	39
1.3.2.6. Núcleo de transformadores trifásicos	41
1.3.3 Maquinas rotativas	43
1.3.3.1. Generalidades	43
1.3.3.2. Distribución de la f.m.m. en las bobinas	43
1.3.3.3. Bobinas trifásicas	45
1.3.3.4. Ancho o paso de bobina	47
1.3.3.4.1. Devanado de paso fraccionario	51
1.3.3.5. Armónicas de diente de ranura	52
1.3.3.6. Armónicas producidas por motores de inducción	55
1.3.4 Convertidores de potencia	55
1.3.4.1. Convertidores estáticos de potencia	55
1.3.4.2. Relación de armónicos en convertidores	58
1.3.4.3. Armónicas de la línea d.c.	61
1.3.4.4. Armónicas de voltaje directo	62



1.3.4.5. Contenido armónico en la conmutación de convertidores....	64
1.3.4.5.1. Convertidores conmutados lineales.....	64
1.3.4.5.2. Convertidores conmutados propios.....	66
1.3.5. Equipos de arco.....	68
1.3.5.1. Generalidades.....	68
1.3.5.2. Hornos de arco.....	69
1.3.5.3. Lámparas fluorescentes.....	70

## CAPITULO II

### SISTEMAS ELÉCTRICOS BAJO CONDICIONES NO SINUSOIDALES

2.1 Introducción.....	73
2.2 Efecto de los armónicos sobre los equipos eléctricos.....	75
2.2.1. Capacitores.....	75
2.2.2. Transformadores.....	78
2.2.3. Máquinas rotativas.....	82
2.2.4. Equipos convertidores.....	83
2.3. Generación y propagación de señales armónicas.....	84
2.4. Resonancia.....	87
2.5. Análisis de la característica impedancia-frecuencia en función del factor de calidad "Q".....	98
2.6. Respuesta de un sistema real.....	102

## CAPITULO III

### MEDICIONES Y ESTÁNDARES PARA EL ANÁLISIS ARMÓNICO

3.1 Introducción.....	109
3.2 Distorsiones armónicas.....	110
3.2.1 Distorsión armónica total (THD).....	110
3.2.2 Índice de distorsión (DIN).....	112
3.3 Interferencia telefónica.....	114
3.3.1 Factor de interferencia telefónica.....	114
3.3.2 Producto V.T y producto V.T.....	117
3.3.3 Índice de ponderación de mensajes C.....	120
3.4 Límites admisibles de distorsión armónica en los sistemas de potencia.....	122
3.4.1 Norma IEEE 519.....	127
3.4.2 Límites de distorsión armónica brasileños.....	131
3.4.2.1 Definición y conceptos.....	131
3.4.2.2 Límites de distorsión de voltaje.....	133
3.4.2.3 Límites de distorsión de corriente.....	134
3.4.2.4 Tolerancia y/o flexibilidad.....	135
3.5 Límite de interferencia telefónica.....	135

## CAPITULO IV

### CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

4.1	Introducción	138
4.2	Monitoreo de la calidad de energía	138
4.3	Diseño y construcción de sistemas eléctricos	139
4.4	Diseño de equipos eléctricos o electrónicos	139
4.5	Técnicas de investigación	147
4.5.1.	Flujo de potencia armónico	147
4.6	Técnicas para la cancelación de armónicos	149
4.6.1.	Transformadores	149
4.6.1.1.	Transformadores conectados en delta	149
4.6.1.2.	Transformadores conectados en estrella	150
4.6.1.3.	Transformadores con devanado terciario	151
4.6.2.	Convertidores	152
4.6.2.1.	Multiplicación de fases	152
4.6.3.	Filtros armónicos	154
4.6.3.1.	Clasificación de los filtros ideales	157
4.6.3.2.	Filtros de corriente continua	157
4.6.3.3.	Filtros de corriente alterna	160
4.6.3.4.	Filtros sintonizados	160
4.6.3.5.	Filtros paso-bajo	162
4.6.3.6.	Diseño de filtros	162
4.6.3.7.	Componentes de los filtros	166

## CAPITULO V

### APLICACIÓN DE EL PROGRAMA WHARMZW PARA EL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA TÍPICO CON CARGAS NO LINEALES.

5.1	Sistema eléctrico de potencia a analizar	168
5.2	Datos e información del caso a analizar	170
5.3	Resultados e identificación de el problema	173
5.3.1	Desde el punto de vista de la empresa suministradora	173
5.3.2	Desde el punto de vista del consumidor	179
5.3.2.1	Análisis armónico del horno de inducción a 60 Hz	182
5.3.2.2	Análisis armónico en el hornos de inducción a 300 Hz	183
5.4	Resumen de los problemas	186
5.5	Soluciones propuestas	187
5.6	Análisis del sistema eléctrico de potencia incluyendo filtros	194
5.7	Base de datos del sistema de potencia a analizar para el programa WHARMZW	202

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	206
ANEXO	
MANUAL DE EL USUARIO DE EL PROGRAMA WHARMZW.....	213
BIBLIOGRAFÍA .....	283

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pag</b>
2.1 Efecto de las distorsiones armónicas.....	86
2.2 Resonancia en serie y paralelo.....	88
3.1 Coeficientes de Para Interferencia Telefónica (TIF) y Ponderación de Pesos C.....	99
3.2 Recomendaciones prácticas y límites estándares del THD, TIF, IT y V.T.....	121
3.3 Secuencia de las corrientes armónicas en el caso ideal.....	123
3.4 Características armónicas de convertidores de p-pulsos.....	124
3.5 Valores límites de voltaje (recomendación inglesa).....	124
3.6 Corriente armónica permisible total (recomendación inglesa g.5/c).....	126
3.7 Máxima carga en los convertidores correspondientes a la corriente armónica de la tabla 3.7.....	126
3.8 Distorsión armónica de corriente.....	130
3.9 Distorsión armónica de voltaje en el PCC.....	130
3.10 Límite globales de tensión expresado en porcentaje de la tensión fundamental.....	134
3.11 Límites de tensión por consumidor expresado en porcentaje de la tensión Fundamental.....	134
3.12 Valores de TIF y TI utilizados en algunos Proyectos.....	136
3.13 Valores Orientativos para el Parámetro IT.....	137
5.1 Distorsión total de tensión y TIF en los puntos de acople común de las industrias con cargas no lineales.....	172
5.2 Distorsión total de tensión y TIF en los puntos de acople común de las industrias con cargas no lineales (sin SICOM).....	172
5.3 Distorsión total de tensión y TIF en las barras dentro de SICOM.....	172
5.4 Distorsión total de tensión y TIF en las barras dentro de SICOM sin los hornos de 300 Hz.....	199
5.5 Distorsión total de tensión y TIF, con los filtros instalados en los puntos de acople común de las industrias con cargas no lineales, con los filtros instalados.....	199
5.6 Distorsión total de tensión y TIF, con los filtros instalados en las barras dentro de SICOM.....	199

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
1.1 a) Curva de magnetización del núcleo de un transformador.	
b) Corriente de magnetización de el transformador.....	30
1.2 Corriente de perdida de el núcleo de un transformador.....	31
1.3 Corriente total de excitación de un transformador.....	35
1.4 Corriente de irrupción del transformador.....	41
1.5 Producción de un sistema trifásico de voltaje a partir de tres bobinas separadas $120^\circ$ entre si. ....	44
1.6 a) Rotor de material ferromagnético pasando frente a un conductor de estaño. b) Distribución de la densidad de flujo magnético. c) Voltaje inducido en el conductor.....	48
1.7 Voltaje de salida de un generador trifásico con devanado de paso diametral y con devanado de paso fraccionario.....	54
2.1 Sistema eléctrico simplificado.....	74
2.2 Circuito equivalente.....	80
2.3 Circuito RLC serie.....	91
2.4 Magnitud y fase de un circuito RLC (Búsqueda de frecuencia)...	91
2.5 Magnitud y fase de un circuito RLC (búsqueda de frecuencia)....	92
2.6 Magnitud y fase de un circuito RLC serie(Búsqueda de capacitancia).....	94
2.7 Circuito RLC paralelo.....	95
2.8 Búsqueda de frecuencia de un circuito RLC paralelo.....	96
2.9 Búsqueda de capacitancia de un circuito RLC paralelo.....	97
2.10 Red ejemplo.....	98
2.11 Búsqueda de frecuencia para la red ejemplo.....	99
2.12 Búsqueda de capacitancia para la red ejemplo.....	100
2.13 Diagrama unifilar que contiene fuente de armónicos y su correspondiente circuito equivalente.....	103
2.14 Factor de distribución de corriente armónica versus el orden armónico (Sin el reactor sintonizado).....	107
2.15 Factor de distribución de corriente armónica versus el orden armónico (Con el reactor sintonizado).....	108
3.1 Distorsión armónica Total(THD) versus Índice de Distorsión (DIN).....	113
3.2 Circuito equivalente monofásico de orden K.....	122
3.3 Punto de acople común.....	128
4.1 Diferentes Maneras de resolver el alambrado del edificio y alimentar las cargas sensibles; a) no es tan buena como b).....	141
4.2 Conexión Scott.....	153
4.3 Absorción de armónicos con circuito de filtrado.....	155
4.4 Curvas características de filtros ideales. (a) Paso Bajo; (b) Paso alto; Paso de banda; (d) Eliminación de banda; (e) Pasa todo	

(magnitud); <i>f</i> ) Pasa todo (fase).....	158
4.5 Impedancia-Frecuencia, Filtros de resonancia Paralelo.....	159
4.6 Filtros trampa de onda.....	159
4.7 Característica ideal de un filtro paso Bajo.....	163
4.8 Diagrama esquemático de un filtro paso bajo (filtro paralelo no sintonizado).....	163
5.1 Diagrama unifilar del sistema de potencia a analizar.....	169
5.2 Histograma de distorsión total de tensión en el punto de acople de SICOM.....	174
5.3 Voltaje armónico versus corriente armónica.....	174
5.4 Corriente armónica versus potencia activa.....	175
5.5 Distorsiones armónicas en la barra 100.....	175
5.6 Distorsiones armónicas en la barra 200.....	177
5.7 Distorsiones armónicas en la barra 300.....	177
5.8 Distorsiones armónicas en la barra 400.....	178
5.9 Distorsiones armónicas en la barra 12.....	178
5.10 Espectro armónico de la corriente en la línea entre las barras 100 - 200.....	180
5.11 Impedancia propia de la barra 100 (magnitud vs frecuencia).....	180
5.12 Impedancia propia de la barra 200 (magnitud vs frecuencia).....	181
5.13 Impedancia propia de la barra 300 (magnitud vs frecuencia).....	181
5.14 Impedancia propia de la barra 400 (magnitud vs frecuencia).....	184
5.15 Impedancia propia de la barra 500 (magnitud vs frecuencia).....	184
5.16 Distorsiones armónicas en la barra 110.....	185
5.17 Espectro armónico de la corriente en el secundario de el transformador (110 - 111).....	185
5.18 Impedancia propia de la barra 110 (magnitud vs frecuencia).....	188
5.19 Tensión armónica en función de la potencia activa en el horno de 60 Hz.....	188
5.20 Distorsiones armónicas en la barra 108.....	189
5.21 Espectro armónico de la corriente en el secundario de el transformador (108 - 111).....	189
5.22 Corriente armónica en función de la potencia activa en el horno de 300 Hz.....	190
5.23 Distorsiones armónicas en la barra 100 (Con filtros).....	196
5.24 Distorsiones armónicas en la barra 200 (Con filtros).....	196
5.25 Distorsiones armónicas en la barra 300 (Con filtros).....	197
5.26 Distorsiones armónicas en la barra 400 (Con filtros).....	197
5.27 Distorsiones armónicas en la barra 12 (Con filtros).....	198
5.28 Espectro armónico de la corriente en la línea entre las barras 100 - 200 (Con filtros).....	198
5.29 Distorsiones armónicas en la barra 108 (Con filtros).....	200
5.30 Distorsiones armónicas en la barra 110 (Con filtros).....	200
5.31 Espectro armónico de la corriente en el secundario de el	

transformador (108 - 111) (Con filtros).....	201
5.32 Espectro armónico de la corriente en el secundario de el transformador (110 - 111) (Con filtros).....	201

## INTRODUCCION

En toda actividad humana, la preocupación por el costo y la calidad es inevitable. Cuando se indaga sobre la calidad de un producto o servicio queda implícita su aceptación o rechazo, dependiendo de el cliente que hace uso del mismo.

Calidad es la satisfacción del consumidor respecto al producto que el compra.

La energía eléctrica posee características que la hacen diferentes a los demás insumos industriales. ella no puede ser almacenada en cantidades significativas, no puede ser transportada por los medios usuales, el consumo se realiza en el instante en que se la produce y es quizás el único producto industrial cuya calidad depende de quien la produce y también de quien la consume.

Los sistemas eléctricos tienen como finalidad básica, dar atención a los consumidores dentro de patrones de continuidad, grados de adecuación, seguridad aceptables y al menor costo global posible. Evidentemente a pesar de todo los esfuerzos que se vayan a realizar, los sistemas estaran siempre sujetos a problemas que puedan llevar a la interrupción y mala calidad del suministro de energía a los consumidores. Como la energía eléctrica es un insumo para cada uno de los consumidores, la interrupción y mala calidad de esta puede originar serios trastornos, como por ejemplo: perdida de la producción, perdida de la materia prima, ociosidad de las instalaciones y de mano de obra, etc. Siendo por tanto importante que se entiendan los problemas causados por estas interrupciones, así como los costos asociados a estas.

Un problema de calidad de energía, se define como cualquier fenómeno de origen eléctrico que interrumpe el correcto funcionamiento de los sistemas y equipos eléctricos.

La importancia de la calidad de la energía es que significa productividad, en la actualidad los sistemas eléctricos están cambiando muy rápidamente de sistemas electromecánicos a sistemas electroelectrónicos, se automatizan las líneas de producción, el empleo cada vez mas importante de la electrónica de potencia, las



nuevas características de las cargas formadas por equipos sensibles (basados en microprocesadores). Dicha transformación responde a un necesario aumento de la productividad industrial, de una utilización más eficiente de la energía eléctrica y el aprovechamiento de los rápidos avances tecnológicos.

El estudio de la Calidad de la Energía está basado en:

- Maximizar la productividad de empresas generadoras, distribuidoras y usuarios
- Determinar la calidad y confiabilidad existentes en los sistemas eléctricos
- Desarrollar recomendaciones para la mejora de la calidad y confiabilidad de la energía en los sistemas eléctricos y en los usuarios

La calidad de energía es básicamente un problema de calidad de voltaje, pero no es estrictamente un problema de voltaje, lo es también de corriente. El mejoramiento en la calidad de la energía fundamentalmente significa controlar estas corrientes.

Hay generalmente dos tipos básicos de problemas en la calidad de la energía

- 1.- Los que crean la interrupción de cargas eléctricas o de circuitos enteros
- 2.- Los que causan la interacción del equipo eléctrico y el sistema de suministro eléctrico. Estas perturbaciones pueden originarse por actividades dentro de la planta o en el sistema eléctrico de energía, fuera de dichos terrenos.

Entre estos dos grupos de problemas podemos recalcar los siguientes:

**Interrupciones prolongadas.**- Las interrupciones prolongadas son el tipo más reconocible de perturbación. Se presentan ordinariamente como fallas eléctricas permanentes. Los diseños de los sistemas de transmisión o distribución de energía eléctrica se los hace de manera de aislar las fallas permanentes y las interrupciones prolongadas resultantes, al área más pequeña posible.

**Interrupciones momentáneas.**- Las interrupciones momentáneas son pérdidas temporales totales de voltaje y lo origina a menudo la operación de los dispositivos automáticos de protección por sobrecorriente.

**Caídas de voltaje.**- Los descensos o caídas de voltaje son niveles de voltaje mas bajos del nominal. La disminución de voltaje puede ocurrir como consecuencia de:  
1.-Cargas grandes tales como motores o soldadoras eléctricas que estén conectadas al mismo circuito. 2.- Caída total de voltaje en las barras de el circuito de distribución del suministro eléctrico, por arranque de motores, ó 3.- Fallas eléctricas en circuitos alimentados desde la misma fuente.

**Sobrevoltajes y perturbaciones en el sistema.**- Los sobrevoltajes son incrementos temporales de voltaje con duración de 2 segundos o menos, pueden ocasionarlos las descargas de rayos o la interrupción de cargas grandes.

**Armónicas.**- La distorsión armónica es la sobreposición de señales en múltiplos de la frecuencia fundamental de la potencia sobre la onda senoidal de la misma. Las cargas lineales que toman que toman corriente en proporción directa del voltaje aplicado no generan grandes niveles de armónicos. Las cargas no lineales toman corrientes en pulsos. Estas corrientes de pulso crea caídas de voltaje en todo el sistema como resultado de la interacción de la corriente con la impedancia del sistema.

**Impulsos y ruido.**- Los impulsos son condiciones de sobrevoltajes que duran menos de medio ciclo. A causa de la forma de onda ( tiempos marcados de elevación y descenso), a los impulsos se les llama en ocasiones " puntos de conmutación " o " transitorios ". Los rayos y la operación de interruptores pueden ocasionar impulsos o transitorios.

## CAPITULO I

### ARMONICAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

#### 1.1.- ANALISIS DE ARMONICAS

El proceso de calcular la magnitud y fase de una onda, periódica fundamental y sus armónicas en un periodo  $T$  se denomina análisis de armónicas.

En los primeros años de siglo XIX, el matemático francés J.B.J. Fourier, en sus investigaciones sobre conducción de calor se vio conducido al descubrimiento notable de ciertas series trigonométricas que llevan ahora su nombre. Desde entonces las series de Fourier y sus generalizaciones de series integrales y ortogonales de Fourier, han llegado hacer una parte integral de los conocimientos básicos de científicos, ingenieros y matemáticos, tanto desde el punto de vista aplicado como del teórico.

El teorema de Fourier declara que: " Toda oscilación periódica compleja  $S = f(t)$  se puede representar en forma de una suma de las oscilaciones armónicas simples con frecuencias cíclicas múltiples de la frecuencia cíclica fundamental  $\omega = 2\pi/T$ , donde  $T$  es el periodo de las oscilaciones".

$$S = f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad (1)$$

Esta representación de la función periódica  $F(t)$  se denomina análisis armónico de las oscilaciones armónicas complejas. Los términos de la serie de Fourier corresponden a las oscilaciones armónicas con frecuencias cíclicas  $\omega, 2\omega, 3\omega$ , etc. se llama armónica primera o fundamental, segunda, tercera, etc. de la oscilación armónica compleja  $S = f(t)$ . La comparación del espectro de oscilaciones depende de la función periódica  $f(t)$ . En los casos mas simples el espectro puede estar compuesto por un número pequeño de armónicas. Por el espectro de oscilaciones se suele entender el espectro de frecuencias, es decir, el conjunto de frecuencias de las

oscilaciones armónicas simples, cuya composición se puede obtener la oscilación compleja considerada.

En la serie de Fourier para una función periódica (ecuación 1), el término  $a_0$  es el valor promedio de la función  $f(t)$ , los términos  $a_n$  y  $b_n$ , se denominan coeficientes de la serie de Fourier y son los componentes rectangulares de los armónicos de orden  $n$ .

$$A_n = a_n + jb_n \quad (2)$$

Cuyo modulo y ángulo de fase es:

$$A_n^2 = a_n^2 + b_n^2 \quad (3)$$

$$\theta = \text{tag}^{-1} \frac{b_n}{a_n} \quad (4)$$

El procedimiento para calcular el término  $a_0$  de la función  $f(t)$  consiste en integrar ambos lados de la ecuación (1) desde  $-T/2$  a  $+T/2$ , Es el periodo  $T$  tal que:

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \left[ a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \right] dt \quad (5)$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = a_0 \int_{-T/2}^{T/2} dt + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt + b_n \int_{-T/2}^{T/2} \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (6)$$

Resolviendo la ecuación, notamos que al lado derecho de la expresión nos queda  $a_0 * T$ , los otros términos  $a_n$  y  $b_n$  son cero, el coeficiente constante  $a_0$  es igual a:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (7)$$

Que no es otra cosa que el área bajo la curva de  $f(t)$ , en el intervalo  $-T/2$  a  $+T/2$ , dividido para el periodo de la onda.

Para el calculo de los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  de la serie de Fourier aplicamos la condición de ortogonalidad, esta condición indica: "Una integral extendida  $(-T/2$  a

+T/2, para nuestro caso particular), el producto de dos funciones distintas que integra el sistema es nula".

En la determinación del coeficiente  $a_n$  multiplicamos la ecuación (5) por  $\cos(2\pi mt/T)$ , donde  $m$  es un entero positivo y obtenemos:

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt = \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) \left[ \int_{-T/2}^{T/2} \left[ a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] dt \right] \right] \quad (8)$$

Cumpliendo con la condición de ortogonalidad, el termino  $b_n$  Es cero, para  $\operatorname{sen}(2\pi \cdot nt/T)$  y  $\cos(2\pi \cdot mt/T)$  para todo  $m$  y  $n$  si tenemos  $a_0 = 0$  y hacemos  $n = m$ , la ecuación se describe de la siguiente forma

El termino  $\frac{a_n}{2} \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{4\pi mt}{T}\right) dt$  es igual a cero e integrando el siguiente termino

obtenemos  $a_n \cdot T/2$ , el coeficiente  $a_n$  es calculado

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt \quad \text{para } n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

El calculo del coeficiente  $b_n$  se lo realiza de una forma similar, se multiplica la ecuación (5) por  $\operatorname{sen}(2\pi \cdot mt/T)$  y se procede igual que en el caso anterior, obteniendo

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt \quad \text{para } n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

Escribiendo la serie de Fourier de forma completa en términos de la frecuencia angular, tenemos

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dt \quad (11)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(n\omega t) dt \quad (12)$$

$$a_b = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sen(n\omega t) dt \quad (13)$$

## 1.2.- ARMONICOS DE CORRIENTE Y DE TENSION.

Los armónicos son corrientes o tensiones cuya frecuencia son múltiplos enteros de frecuencia fundamental de la alimentación. Por ejemplo si la frecuencia fundamental es de 60 Hz, el segundo armónico tendrá una frecuencia de 120 Hz, el tercero de 180 Hz, etc.

En la actualidad, los armónicos son un subproducto de la electrónica moderna, se manifiestan donde hay un gran número de ordenadores personales, motores de velocidad regulable y otros equipos que absorben corriente en forma de impulsos. Cuando hay armónicos la forma de la onda no presenta una forma sinusoidal, la forma de la onda aparece distorsionada. Decimos que estas ondas son no sinusoidales.

Las forma la onda de tensión y de corriente ya no representan una relación simple entre si, de ahí el termino de " no linealidad " que se les aplica.

### 1.2.1.- ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Los armónicos son creados por cargas no lineales que absorben corrientes en impulsos bruscos en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal. Estos impulsos

crean ondas de corriente distorsionadas que originan a su vez corrientes armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

Este fenómeno se manifiesta especialmente en los equipos provistos de fuente de alimentación de entrada con condensadores y diodos, es decir, ordenadores personales, impresoras y material electromédico.

Estos equipos están diseñados para absorber corriente durante solo una fracción controlada de la onda de tensión de alimentación. Esto, provoca armónicos de la corriente de carga y con ellos el sobrecalentamiento de transformadores, conductores neutros y el disparo de interruptores automáticos.

Las causas eléctricas del fenómeno son que la tensión alterna de entrada, una vez rectificadas por los diodos, se utiliza para cargar un condensador de gran capacidad. Después de un semiperíodo, el condensador se descarga a la tensión de pico de la onda sinusoidal, por ejemplo, a 322 V en una línea de alterna a 230 V. Entonces el equipo electrónico absorbe corriente de esta elevada tensión de continua para alimentar el resto del circuito.

Normalmente, las fuentes de alimentación con condensadores y diodos que llevan incorporados los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. Por el contrario en las plantas industriales, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y fuentes de tensión ininterrumpida (UPS).

### **1.2.2.-ARMÓNICOS DE TENSIÓN**

La relación entre la corriente armónica absorbida por cargas no lineales y la impedancia de la fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm, lo que provoca armónicos de tensión. La impedancia de fuente la constituye el transformador de alimentación y los componentes del ramal.

La propia red de alimentación puede ser una fuente indirecta de los armónicos de tensión.

Todas las cargas que comparten un transformador o un ramal con fuerte carga de armónicos podrían resultar afectados por los armónicos de tensión producidos.

- En un ambiente de oficinas, los ordenadores personales son particularmente sensibles a los armónicos de tensión. El rendimiento de la fuente de alimentación con condensadores y diodos dependen críticamente de la magnitud de la tensión de pico. Los armónicos de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de este modo la tensión de pico. En el peor de los casos se puede producir un reset del ordenador a causa del fallo en la alimentación.
- En el entorno industrial, los motores de inducción y capacitores para la corrección del factor de potencia también puede resultar gravemente afectados por los armónicos de tensión.
- Los condensadores de corrección de factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas del un sistema de distribución de corriente. Si la frecuencia resonante esta cerca de la tensión armónica, la corriente armónica resultante podría aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de estos. La salida del condensador por falla, desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.

### **1.3.-FUENTES ARMONICAS**

#### **1.3.1.- GENERALIDADES**

Las armónicas generadas en los sistemas de potencia son producidas por diferentes fuentes conectadas a la red, como son: convertidores estáticos, máquinas rotativas transformadores y equipos de arco.

Previo al desarrollo de los convertidores estáticos de potencia, que son fuentes considerables de armónicas, las armónicas eran principalmente generadas por las máquinas eléctricas y transformadores.



En posteriores investigaciones se estableció que, por su diseño y operación, las principales fuente de armónicas era la corriente de magnetización del transformador. Los generadores de potencia eléctrica son la segunda fuente principal de generación armónicas.

Bajo condiciones de operación de estado estable, y debido al moderno diseño, los transformadores y máquinas rotativas no son responsable de distorsión significativa en la forma de onda. Sin embargo cuando salen de su rango de operación normal y durante perturbaciones transientes, ellos pueden incrementar considerablemente su contribución de armónicas.

Junto a los convertidores estáticos hay dos cargas no - lineales que debido a su contribución de armónicas necesitan ser consideradas, estos son los equipos de arco y lamparas fluorescentes.

Los accionamientos electrónicos de motores de velocidad variable, hornos de inducción, rectificadores inversores, equipos electrónicos que utilicen fuentes conmutadas tales como computadoras, monitores de vídeo, fax, controles microprocesados son algunos de los equipos electrónicos que actúan como fuentes de corriente armónica en función de su no - linealidad. Estas corrientes armónicas combinadas con la impedancia del sistema resultan en distorsión armónica de tensión.

La distorsión de tensión puede causar la operación errónea de controladores, quema de capacitores, sobrecalentamiento de motores y transformadores y aumento general de pérdidas en el sistema. Es por consiguiente un problema de calidad de energía.

## **I.3.2.-TRANSFORMADORES**

### **I.3.2.1.-CIRCUITO DE MAGNETIZACION Y CARACTERISTICA NORMAL DE EXCITACION**

El hierro es usado en un transformador para reducir la reluctancia al flujo que lo atraviesa. Muy poca corriente es requerida para inducir un flujo magnético en el núcleo de un transformador.

Los núcleos de los transformadores no son construidos con bloques sólidos de hierro, ya que se inducen corrientes circulatorias con altas pérdidas de energía. Construyendo el núcleo con laminas delgadas se reducen estas corrientes. En los núcleos tradicionales se emplea generalmente acero con 4% de silicio. Este material proporciona facilidad de manipulación, pérdidas pequeñas por histéresis, corrientes de Foucault y una adecuada permeabilidad a inducciones magnéticas elevadas. Si a esta aleación la sometemos a un tratamiento térmico adecuado se obtiene un material que, comparado con el hierro, tiene mejores propiedades para los flujos magnéticos y además una resistividad mayor.

Cuando se conecta una fuente c.a. a un transformador, fluye corriente por el circuito primario, aun cuando el circuito secundario permanezca abierto. Esta corriente es la necesaria para crear el flujo en el núcleo ferromagnético, y puede considerarse formada por dos componentes:

- 1.-Corriente de Magnetización, o corriente requerida para producir el flujo en el núcleo del transformador.
- 2.-Corriente de pérdida del núcleo, o corriente requerida para alimentar las pérdidas de histéresis y por corrientes de Foucault (corrientes parásitas).

La fig. 1.1 muestra la característica de magnetización de un núcleo típico de transformador. Si se conoce el flujo en el núcleo, puede hallarse la magnitud de la

corriente de magnetización. Despreciando por el momento los flujos de dispersión, el flujo promedio en el núcleo es:

$$\phi = \frac{1}{N_p} \int (V_p(t)) dt \quad \text{Wb} \quad (14)$$

Si el voltaje primario esta representado por la expresión  $V_p = V_M \cos \omega.t$ , el flujo resultante será:

$$\phi = \frac{1}{N_p} \int (V_M \cos \omega) dt \quad \text{Wb} \quad (15)$$

$$\phi = \frac{V_M}{\omega N_p} \text{sen } \omega.t \quad \text{Wb} \quad (16)$$

Es posible construir una gráfica de la corriente de la corriente de magnetización de un transformador, haciendo una comparación punto a punto de la corriente necesaria para producir un flujo determinado. (Fig. 1.1a), La fig. 1.1b muestras la construcción gráfica correspondiente. Obsérvese lo siguiente:

- La corriente de magnetización del transformador no es sinusoidal.
- Las componentes de alta frecuencia son debidas a la saturación del núcleo.

La otra componente de la corriente de vacío del transformador la constituyen aquellas corrientes necesarias para suministrar la corriente que consume el núcleo debido a la histéresis y a las corrientes parásitas. Esta es la corriente de perdida del núcleo. Supóngase que el flujo se sinusoidal. Como las corrientes de Foucault en el núcleo son proporcionales a  $\frac{d\phi}{d.t}$ , estas serán mas intensas cuando el flujo este pasando por su valor cero. La perdida por histéresis es marcadamente no - lineal, pero también es máxima cuando el flujo atraviesa por cero. Por consiguiente, la corriente de perdidas

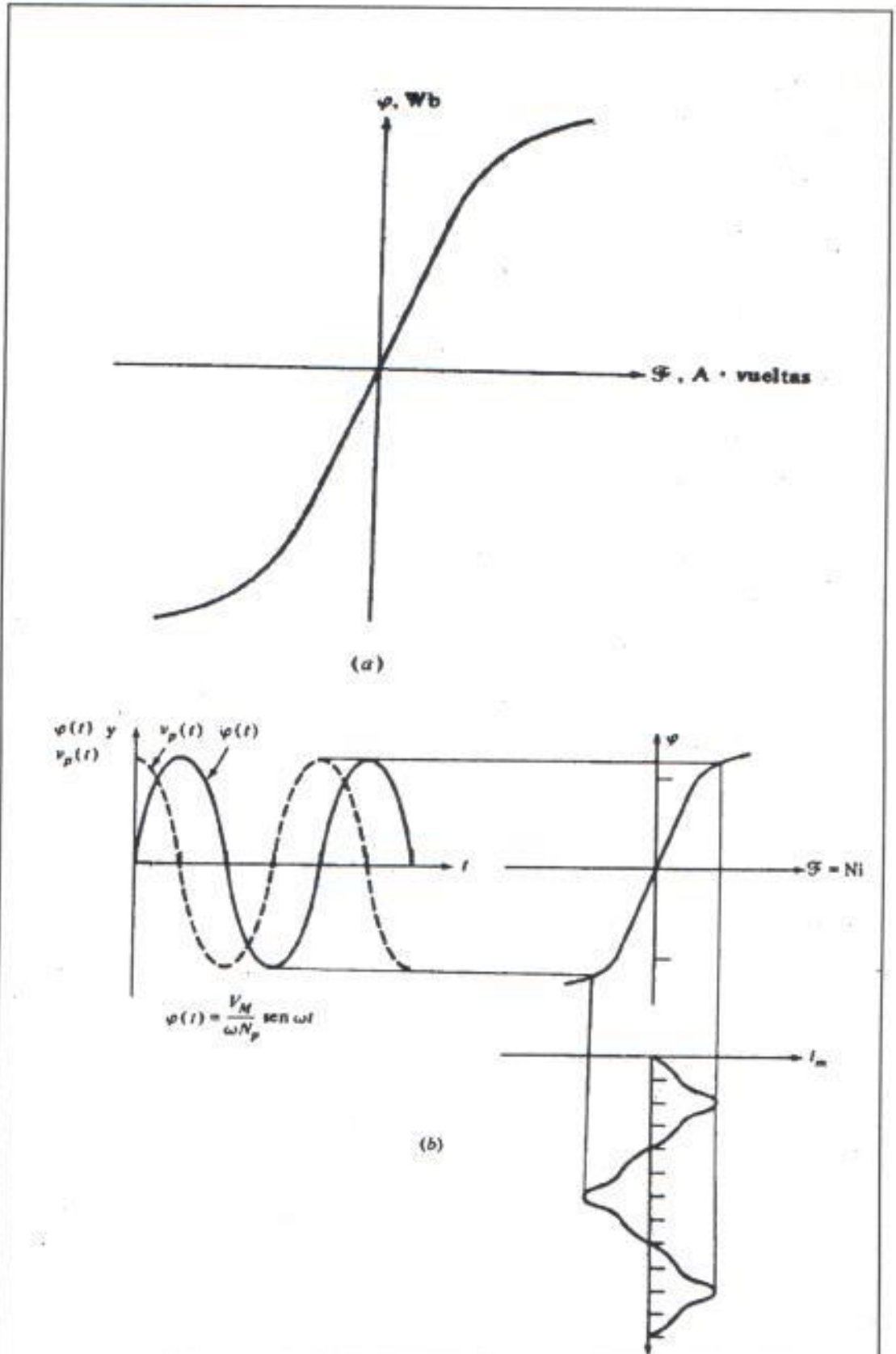
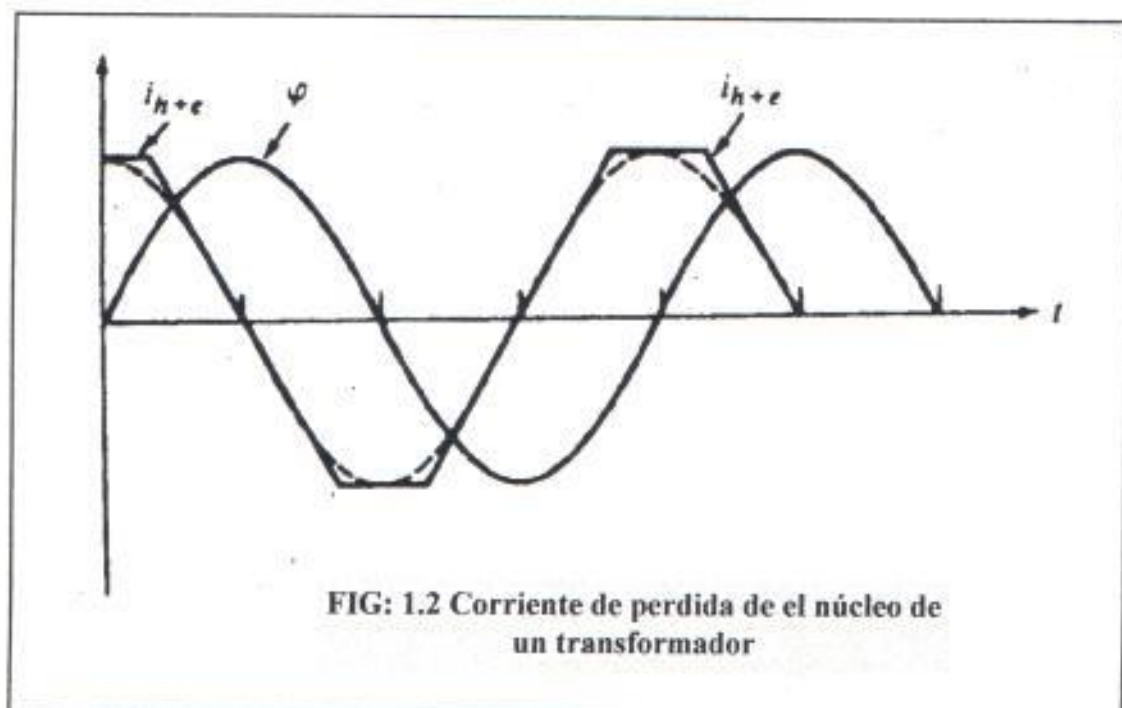


FIG : 1.1 a) Curva de magnetización del núcleo de un transformador. b) Corriente de magnetización de el transformador

en el núcleo es mayor en los instantes en que la onda de flujo pasa por cero. La fig. 1.2 muestra la corriente total necesaria para proporcionar las pérdidas del núcleo. La corriente de pérdida presenta los siguientes aspectos.

- No es lineal, debido a la no linealidad de la histéresis.
- Su componente fundamental está en fase con el voltaje aplicado.



A la corriente total de vacío se la suele llamar corriente de excitación del transformador, y corresponde a la suma de las corrientes de magnetización y de pérdidas del núcleo. La fig. 1.3 muestra la corriente de excitación típica de un transformador.

En resumen podemos decir que la corriente de magnetización del transformador es no sinusoidal. Las componentes de alta frecuencia son debidas a la saturación del magnética del núcleo

La forma de la corriente de excitación no-senoidal que se produce en el núcleo de un transformador, cuando un voltaje senoidal es aplicado, causa la saturación del

transformador y genera armónicas. Los niveles de saturación de los transformadores están en función del voltaje aplicado. Si el voltaje aplicado es superior al voltaje nominal, Las componentes armónicas de las corrientes de excitación se incrementan considerablemente en magnitud.

La Forma no senoidal de onda tiene un componente alto de tercera armónica, que esta retrasado  $90^\circ$  con respecto a la fundamental, y un componente menor de quinta armónica, en fase con la fundamental. Sin embargo los transformadores cargados producen algunas componentes d.c. que incrementan las armónicas pares e impares de la corriente de excitación.

#### Expresión para la f.m.m eléctrica de fase.

Los voltajes armónicos para la fase de un circuito trifásicos son computadas de igual manera como las del caso de una onda seno simple. Pero considerando la simetría del sistema observamos que la f.m.m. en cada fase, es representada por la ecuación:

$$e_I = E_{1m} * \text{sen}(\omega.t + \alpha) + E_{3m} * \text{sen}(3\omega.t + \alpha_1) + E_{5m} * \text{sen}(5\omega.t + \alpha_5)$$

$$e_{II} = E_{1m} * \text{sen}(\omega.t + \alpha - 2\pi/3) + E_{3m} * \text{sen}(3\omega.t + \alpha_1 - 3 * 2\pi/3) +$$

$$E_{5m} * \text{sen}(5\omega.t + \alpha_5 - 5 * 2\pi/3) \quad (V)$$

$$e_{III} = E_{1m} * \text{sen}(\omega.t + \alpha - 4\pi/3) + E_{3m} * \text{sen}(3\omega.t + \alpha_1 - 3 * 4\pi/3) +$$

$$E_{5m} * \text{sen}(5\omega.t + \alpha_5 - 5 * 4\pi/3) \quad (17)$$

Simplificando esta ecuación será:

$$e_l = E_{1m} * \text{sen}(\omega.t + \alpha_1) + E_{3m} * \text{sen}(3\omega.t + \alpha_3) + E_{5m} * \text{sen}(5\omega.t + \alpha_5)$$

$$e_l = E_{1m} * \text{sen}(\omega.t + \alpha_1 - 2\pi/3) + E_{3m} * \text{sen}(3\omega.t + \alpha_3) + E_{5m} * \text{sen}(5\omega.t + \alpha_5 + 2\pi/3) \quad (\text{V})$$

$$e_l = E_{1m} * \text{sen}(\omega.t + \alpha_1 - 2\pi/3) + E_{3m} * \text{sen}(3\omega.t + \alpha_3) + E_{5m} * \text{sen}(5\omega.t + \alpha_5 - 2\pi/3) \quad (18)$$

Toda armónica que es múltiplo de tres, como la novena, décima quinta, vigésima primera son iguales en las tres fases del circuito. Estas viajan en la misma dirección de rotación de la onda fundamental, En un sistema conectado en estrella son todas dirigidas hacia fuera ó cerca del punto neutro y en un sistema conectado e delta ellas actúan en la misma dirección alrededor del circuito.

Toda armónica que no sea múltiplo de tres es desplazada 120 grados una de otra actúan en la misma dirección de rotación y contrario a la onda fundamental, por lo que se anulan entre sí, por ejemplo la rotación de la quinta, décimo primera, décimo séptima, vigésimo tercera y vigésimo noveno, ....etc., no están en la misma dirección de rotación que la onda fundamental, y la séptima, décima tercera, décimo noveno,.... etc., componentes armónicos serán de igual rotación que la onda fundamental.

### **Expresión de la f.m.m de línea un sistema trifásico conectado en estrella**

Obteniendo anteriormente la f.m.m eléctrica por fase. La expresión para la línea es escrita a continuación:

$$v_{t-II} = \sqrt{3}|E_{1m}| \cdot \text{sen}\left(\omega.t + \alpha_1 + \frac{\pi}{6}\right) + E_{3m} \cdot \text{sen}\left(3\omega.t + \alpha_3 + \frac{5\pi}{6}\right) +$$

$$E_{5m} \cdot \text{sen}\left(5\omega.t + \alpha_5 - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{II-III} = \sqrt{3}|E_{1m}| \cdot \text{sen}\left(\omega.t + \alpha_1 - \frac{\pi}{2}\right) + E_{5m} \cdot \text{sen}\left(5\omega.t + \alpha_5 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (V)$$

$$v_{III-I} e_I = \sqrt{3}|E_{1m}| \cdot \text{sen}\left(\omega.t + \alpha_1 + \frac{5\pi}{6}\right) + E_{5m} \cdot \text{sen}\left(5\omega.t + \alpha_5 - \frac{5\pi}{6}\right) \quad (19)$$

Si en la ecuación de línea la f.m.m. nosotros reemplazamos  $(\omega t + 1/6\pi)$  por  $\omega t$ , en el instante  $30^\circ$ , obtendremos:

$$v_{t-II} = \sqrt{3}|E_{1m}| \cdot \text{sen}(\omega.t' - \alpha_1) - E_{5m} \cdot \text{sen}(5\omega.t' - \alpha_5)$$

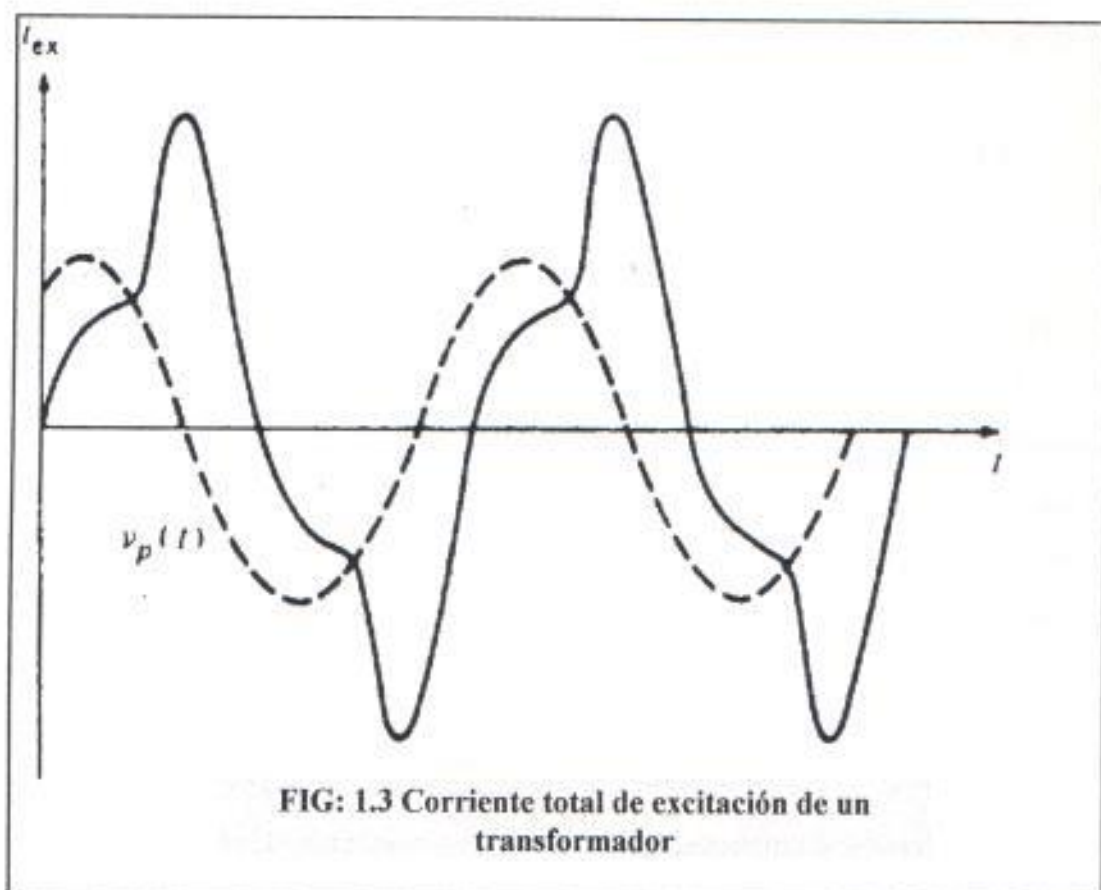
$$v_{II-III} = \sqrt{3}|E_{1m}| \cdot \text{sen}\left(\omega.t' - \alpha_1 - \frac{2\pi}{2}\right) - E_{5m} \cdot \text{sen}\left(5\omega.t' - \alpha_5 - \frac{4\pi}{2}\right) \quad (V)$$

$$v_{III-I} = \sqrt{3}|E_{1m}| \cdot \text{sen}\left(\omega.t' - \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}\right) - E_{5m} \cdot \text{sen}\left(5\omega.t' + \alpha_5 - \frac{3\pi}{3}\right) \quad (20)$$

Esta ecuación es ahora similar a la obtenida para la f.m.m de fase, excepto que :

- No hay armónicos triple.
- El signo de la quinta armónica es cambiado y el factor  $\sqrt{3}$  es introducido.





### 1.3.2.2.-ARMONICAS EN TRANSFORMADORES MONOFASICOS

Todos los transformadores monofásicos cuando se excitan al voltaje nominal, producen una tercera armónica. Esto se debe a que la curva de saturación de los núcleo de los transformadores aumenta abruptamente y se satura con rapidez, haciendo que la corriente de magnetización se distorsione. Así, un voltaje puramente senoidal a una frecuencia fundamental, produce una corriente de magnetización que contiene la componente fundamental mas un componente grande de tercera armónica. En los transformadores monofásicos, la corriente de magnetización es pequeña comparada con la corriente de carga y la onda de corriente que resulta solo esta ligeramente distorsionada. En consecuencia, en lo relativo a la operación monofásica, las armónicas apenas se notan y no constituyen problema.

### **I.3.2.3.-ARMONICAS EN TRANSFORMADORES CONECTADOS EN RED.**

#### **I.3.2.3.1.-ARMONICAS EN TRANSFORMADORES CONECTADOS EN DELTA O MALLA**

Cuando se conectan tres transformadores monofásicos conectados en delta, se observa un voltaje debido a las armónicas antes de cerrar la malla. En transformadores trifásicos, la segunda fase, la fase B es desplazada  $120^\circ$  con respecto a la fase de referencia, digamos la fase A. La armónica de la fase B esta desplazada  $3 \times 120^\circ$  ó  $360^\circ$  con respecto a la fase A de referencia. Igualmente la tercera armónica de la tercera fase (fase C) esta desplazada  $3 \times 240^\circ$  ó  $720^\circ$  con respecto a la fase A de referencia. Así, es obvio que todas las armónicas que se generan están en fase entre si y en fase con sus fundamentales respectivas. Esto explica por que el voltaje de malla que se mide no es cero antes de cerrar dicha malla.

Pero cuando se cierra la malla, o se conecta un resistor entre sus terminales abiertas, la malla cerrada sirve como "trampa" para las corrientes armónicas. Todas las corrientes impares que se generan por la corriente de excitación del transformador se suman entre si y forman corrientes de circulación alrededor de la delta, como lo hacen las corrientes fundamentales normales de fase de la delta. Si bien es cierto que la corriente adicional circulante que crean las armónicas se suman a las perdidas óhmicas de potencia de los transformadores. La conexión en delta o malla tiene la ventaja, en los sistemas delta - estrella, de mantener el neutro en el centro geométrico de los voltaje de fase y de línea de la estrella del secundario.

#### **I.3.2.3.2.-ARMONICAS EN TRANSFORMADORES CONECTADOS EN ESTRELLA**

La conexión estrella - estrella presenta dos inconvenientes serios:

- Si la carga del transformador es desbalanceada, produce fuertes desbalances en los voltajes de fase del transformador.
- Existe un problema grave con los terceros armónicos de voltaje.

Si se aplica un sistema trifásico de tensiones a un transformador Y - Y , los voltajes de las diferentes fases estarán apartados  $120^\circ$  entre si. No obstante, los componentes de tercer armónico de las tres fases están en fase entre si, ya que hay tres ciclos de tercer armónico por cada ciclo de frecuencia fundamental. Siempre existirá un componente de tercer armónico en un transformador debido a la no linealidad del núcleo, y estos componentes se suman dando como resultado un componente mayor de voltaje de tercer armónico superpuesto al voltaje fundamental de 50 ó 60 Hz . Este tercer armónico de tensión puede llegar a ser mayor que el mismo voltaje fundamental.

En los transformadores conectados en estrella no aterrizada, se suman entre si las terceras armónicas y las armónicas de orden de múltiplos impares, que tienden a forzar al neutro para sacarlo de su centro geométrico. Esto ocasiona un desequilibrio de los voltajes secundarios, tanto de fase como de línea. Además como no hay trayectoria cerrada para la circulación de las armónicas tanto en el primario como en el secundario de un transformador conectado en estrella - estrella, las ondas de voltaje de salida también se distorsionan. Por este motivo, prácticamente nunca se usan conexiones en estrella sin aterrizar en sistemas de transmisión y distribución de potencia.

El neutro se mantiene en su centro geométrico si simplemente se conecta a tierra ya sea en el primario o en el secundario, o en ambos. Con ello se tiene un circuito cerrado para cualquier corriente desbalanceada, o corriente armónica al conductor neutro.

### **I.3.2.4.-ARMONICAS EN TRANSFORMADORES CON DEVANADO TERCARIOS**

La fabricación de grandes transformadores para sistemas de transmisión como de distribución de potencia con un tercer juego de devanados, aparte del primario y de secundario, a los que se les llama devanados terciarios. Estos devanados se emplean para suministrar potencia auxiliar para la subestación o para distribución local de potencia.

En algunas aplicaciones también se conectan ya sea capacitores síncronos o fijos de alto voltaje a través de la salida, conectada en delta, de las devanados terciarios tanto para la corrección del factor de potencia, como para la regulación o ambas cosas. Pero la ventaja principal del uso de transformadores con devanado terciario es que la conexión en delta suprime cualquier voltaje de armónicas que se puede generar en los primarios o secundarios conectados en estrella, de los transformadores de transmisión o distribución.

Los transformadores de devanado terciario se fabrican en la actualidad con capacidad de MVA o KVA. que llegan al 35% de la capacidad total del transformador, sea de transmisión o de distribución. El único tipo de transformador que no se fabrica con devanados terciarios es el polifásico tipo acorazado o de núcleo que emplea laminaciones en forma de E. En este diseño la suma de flujos trifásicos se suma y siempre da cero en la columna del centro. El resultado es que no se generan terceras armónicas debido al flujo del transformador, Ya que no se producen terceras armónicas en este tipo de transformador, puede incluso trabajarse como transformador estrella-estrella sin el empleo de devanados terciarios. Es necesario decir que cuando se conecta el primario o el secundario en delta, no se tienen problemas con armónicas o de desequilibrio, aun cuando se utilicen tres transformadores monofásicos.

### 1.3.2.5.-CORRIENTE DE IRRUPCION

Un problema que tiene que ver con la magnitud de voltaje es el de la corriente de irrupción al energizar un transformador.

Supóngase que al transformador se le aplica el voltaje:

$$V(t) = V_M \text{sen}(\omega.t + \theta) \quad \text{V} \quad (21)$$

en el momento de energizarlo. La magnitud máxima a que llegue el flujo al primer semiciclo de la tensión aplicada dependerá del ángulo de fase de la misma en el instante que se enérgizo el transformador.

Si el voltaje inicial es:

$$v(t) = V_M \text{sen}(\omega.t + 90^\circ) = V_M \text{cos} \omega.t \quad \text{v} \quad (22)$$

y si el flujo inicial es cero, el flujo máximo durante el primer semiciclo será igual al flujo máximo del estado estacionario.

$$\phi_{\text{max}} = \frac{V_M}{\omega \cdot N_p} \quad \text{Wb} \quad (23)$$

y no causara problemas. Sin embargo, si ocurriera que el voltaje fuese

$$v(t) = V_M \text{sen} \omega.t \quad \text{v} \quad (24)$$

El flujo máximo durante el primer semiciclo será:

$$\phi = \frac{1}{N_p} \int_0^{\pi/\omega} (V_M \text{sen } \omega.t) \quad (25)$$

$$\phi = -\frac{V_M}{\omega.N_p} \cos \omega.t \Big|_0^{\pi/\omega} \quad (26)$$

$$\phi = -\frac{V_M}{\omega.N_p} [(-1) - (1)] \quad (27)$$

$$\phi_{\max} = -\frac{2V_M}{\omega.N_p} \quad \text{Wb} \quad (28)$$

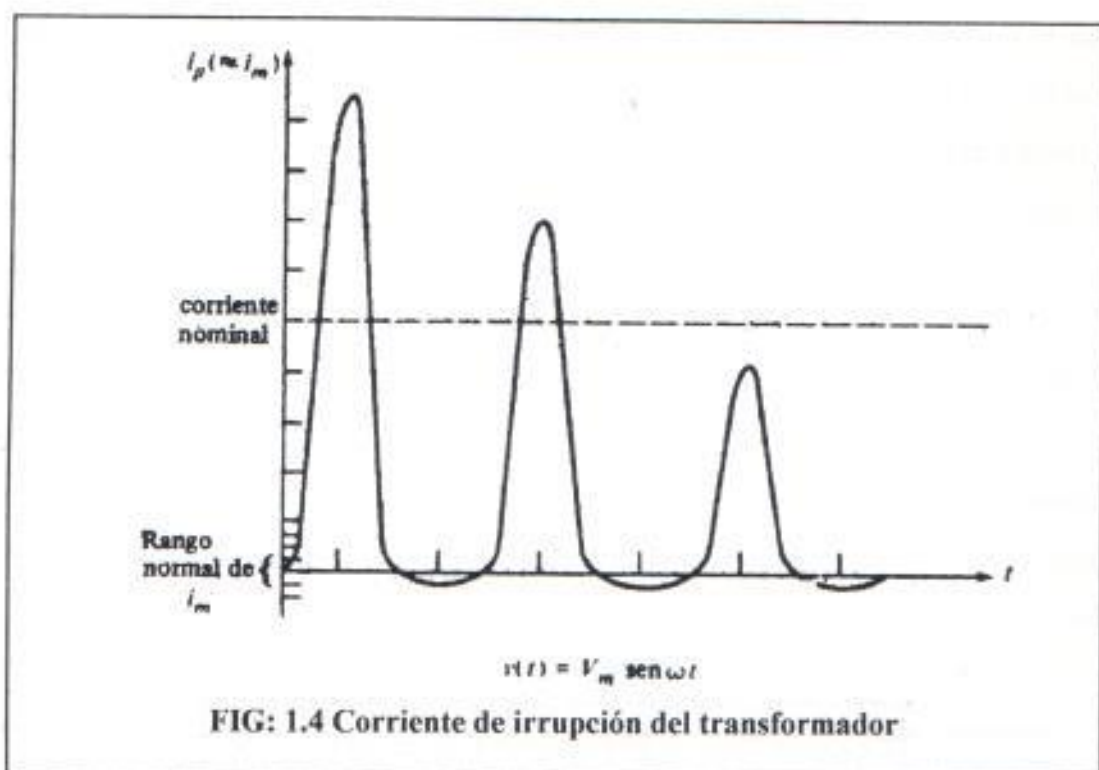
El cual es el doble del flujo normal de régimen permanente, si se analiza la curva de la fig. 1.1, puede concluirse que el doblar la magnitud máxima del flujo conlleva una enorme corriente magnetizante. De hecho durante parte del ciclo el transformador se comporta como un cortocircuito, consumiendo una corriente muy grande.

Para cualquier otro ángulo de voltaje aplicado entre  $90^\circ$ , que no causa problema, y  $0^\circ$ , que corresponde a la peor situación, se presentara alguna sobrecorriente. Puesto que no se ejerce control sobre el ángulo de fase del voltaje, Normalmente pueden presentarse corrientes desproporcionadas durante los primeros ciclos siguientes a la energización del transformador y tanto este como el sistema de potencia deben ser capaces de soportar tales corrientes.

Si un transformador es conmutado a estado apagado, este puede retener una densidad de flujo residual en el núcleo, de  $+B_r$  ó  $-B_r$  o bajo alguna circunstancia cero.

Cuando un transformador es re-energizado, la densidad de flujo puede elevar su valor máximo a  $2B_{\max}$  ó  $B_r + 2B_{\max}$  (casi tres veces el flujo de trabajo). Para transformadores diseñados normalmente, esto produce densidad de flujo máximo de entre 3.4 T ó 4.7 T. Cuando este nivel es comparado con la densidad del flujo saturado que para la sobre - excitación es 2.05 T, observamos que el núcleo de un

transformador tiene niveles extremos de saturación y producen excesivos amperios vueltas.



Este efecto da corriente de magnetización altas de 5 p.u. al 10 p.u. de la corriente normal de magnetización.

El decrecimiento con el tiempo de la corriente de irrupción, es principalmente una función de la resistencia de la bobina primaria. Para grandes transformadores estas corrientes de irrupción pueden permanecer durante muchos segundos, esto se debe a la baja resistencia presentada.

### 1.3.2.6.-NUCLEO DE LOS TRANSFORMADORES TRIFASICOS

Los transformadores trifásicos son alimentados por voltajes trifásicos balanceados, bajo condiciones ideales los flujos en cada una de las fases son desplazados  $120^\circ$  eléctricos y su valor resultante es igual a cero. Lo anterior sugiere la posibilidad de

conectar las tres piernas de un núcleo sin que exista un camino de retorno para el flujo.

Sumando dos flujos cualquiera se obtiene un flujo terciario de igual magnitud. Esto indica en la posibilidad de pensar en un número de edificaciones del núcleo. Si los flujos tienen una trayectoria en común, un flujo resultante puede surgir, permitiendo economía en la construcción y bajas pérdidas, este tipo de núcleo tiene bajo peso, pocas pérdidas y pequeños costos.

**Núcleo de tres piernas .-** En este tipo de núcleo los flujos están todos en fase actuando en la misma dirección.

El diseño de este núcleo permite una trayectoria para el flujo de tercera armónica que retorna a través del aire o el tanque del transformador, debido a la alta reluctancia de esta trayectoria se reduce el flujo de tercera armónica al valores muy bajos, alrededor del 10% de los que aparecen en núcleos de fase independiente, su densidad de flujo, y la onda de f.m.m permanecen sinusoidal bajo toda condición de carga. Pero la quinta y séptima componentes armónicas de la corriente magnetizante no sea mayor del 5% al 10%, produciendo una visible distorsión de voltaje, la cual no puede ser ignorada.

**Núcleo de cuatro y cinco piernas.-** Este tipo de núcleo son usados con el fin de reemplazar los núcleos de tres piernas - tres fases, con el propósito de reducir el peso o suministrar una fase de retorno de tercera armónica y proporcionar mayor capacidad de Kva. Estos tipos de núcleo presentan una desventaja esto es, la variación del flujo no resulta completamente sinusoidal en toda la trayectoria, si no que producen componentes armónicas adicionales en las tres fases,



### I.3.3.- MÁQUINAS ROTATIVAS

#### I.3.3.1.- GENERALIDADES

Un estator de diseño tan sencillo como el mostrado en la fig. 1.5, en que todas las espiras de cada fase están concentrados en un par de ranuras producen una distribución no sinusoidal de densidad de campo magnético cuya forma depende de la configuración del rotor que se monte en el interior del estator. Esta distribución no sinusoidal produce campos armónicos de voltaje y corriente en el estator. En resumen, la concentración de toda una fase en un solo par de ranuras es una manera ineficiente de utilizar la superficie del rotor.

Partiendo de este diseño sencillo, se han efectuado modificaciones en los estatores de las máquinas reales de c.a., que han servido para controlar los componentes armónicos en los voltajes de salida. Dos de estas modificaciones han sido las bobinas de paso fraccionario y la distribución de los devanados.

#### I.3.3.2.-DISTRIBUCION DE LA F.M.M. EN LAS BOBINAS

Bajo condiciones ideales la f.m.m. del entrehierro es uniforme y tiene un valor máximo de  $|I \cdot N|^{1/2}$ , donde  $I$  es la corriente r.m.s. por conductor y  $N$  es el número de conductores por ranura.

La representación en el dominio de la frecuencia de la distribución de f.m.m. rectangular es:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left[ \text{sen} \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} + \frac{1}{3} \text{sen} 3 \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} - \frac{1}{5} \text{sen} 5 \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} \right] \quad \text{Amp-vueltas} \quad (29)$$

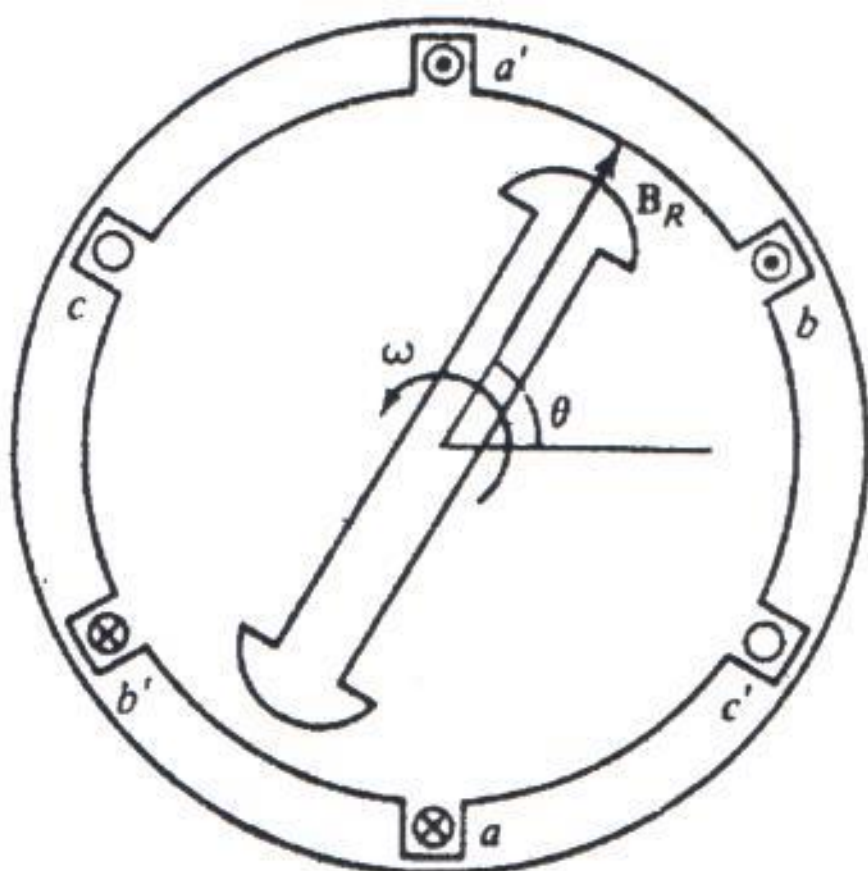
La distribución de f.m.m rectangular es reducida a una componente rectangular y sus armónicas. El valor de la amplitud de los enésimos armónicos son:  $1/n$  veces obtenidos en la onda fundamental. En la ranuras de los polos los enésimos f.m.m armónicos son  $1/n$  veces los pasos polares fundamentales.

En general para corriente alterna de frecuencia angular  $\omega = \pi f$ , la ecuación 29 deberá ser:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} \left[ \text{sen}(\omega.t) \sum \frac{1}{2} \text{sen} n \frac{2\pi.x}{\lambda} \right] \quad \text{para } n = \text{impar} \quad \text{Amp-vuel} \quad (30)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda

En la práctica, las bobinas son distribuidas a lo largo de una superficie, con  $g$  ranuras por polo y por fase, la f.m.m de las  $g$  bobinas son desplazadas unas a otras en el espacio.



**FIG:1.5** Producción de un sistema trifásico de voltaje a partir de tres bobinas separadas  $120^\circ$  entre sí.

Los valores de los desplazamientos angulares son diferentes para varias armónicas y también son diferentes los polos de ranuras.

Para una máquina de fase  $m$  el número de ranuras por polo es  $Q = m \cdot g$  y el ángulo eléctrico entre ranuras es  $\pi / Q$ .

El factor de distribución viene dado por

$$K_d = \frac{\text{f. m. m resultante}}{\sum \text{f. m. m de bobinas individuales}} \quad (31)$$

y la f.m.m en una fase de bobina polifásica es:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left[ g \cdot \text{sen}(\omega.t) \sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen} n \frac{2\pi.x}{\lambda} \right] \quad \text{para } n = \text{impar} \quad \text{Amp-vuel} \quad (32)$$

### 1.3.3.-BOBINAS TRIFASICAS

Las bobinas de una máquina de tres fases son desplazadas  $\pi/3$  en tiempo y espacio, la corriente por  $\pi/3$  en el tiempo. las correspondientes f.m.m. son:

$$F_1(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} g \cdot \text{sen}(\omega.t) \cdot \left[ \sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen} n \cdot n \frac{2\pi.x}{\lambda} \right] \quad \text{Amp-vuel} \quad (33)$$

$$F_2(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} g \cdot \text{sen}\left(\omega.t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \left[ \sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n \cdot n \frac{2\pi.x}{3} - \frac{2\pi.}{\lambda}\right) \right] \quad \text{Amp-vuel} \quad (34)$$

$$F_3(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} g \cdot \text{sen}\left(\omega.t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \left[ \sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n \cdot n \frac{2\pi.x}{3} - \frac{4\pi.}{\lambda}\right) \right] \quad \text{Amp-vuel} \quad (35)$$

La f.m.m total es  $F_t = F_1 + F_2 + F_3$ , para los enésimos armónicos es:

$$F_3(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left\{ g * \frac{K_{di}}{2n} \left[ \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{\lambda} - \omega \cdot t\right) - \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{\lambda} + \omega \cdot t\right) + \right. \right. \\ \left. \left. \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{\lambda} + \omega \cdot t - (n-1)\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{\lambda} + \omega \cdot t - (n+1)\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right\} \\ - \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{\lambda} + \omega \cdot t - (n-1)\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{\lambda} + \omega \cdot t - (n+1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad (36)$$

Para n impar  $n = 1, 3, 5, \dots$  etc.

Amp-vu

De esta ecuación se concluye que la f.m.m es una onda viajando en dirección positiva donde los armónicos triplen (3ra, 9na, 15ta, etc.) están ausentes, la quinta armónica es una onda que viaja en dirección negativa y la séptima es una onda que viaja en dirección positiva.

### L3.3.4.-ANCHO O PASO DE BOBINA.

Un paso polar es la distancia angular entre dos polos adyacentes .

Medido en grados mecánicos, el paso polar de una máquina es:

$$\rho_p = \frac{360}{p} \quad \text{grados mecánicos} \quad (37)$$

donde  $\rho_p$  es el paso polar en grados mecánicos y  $p$  es el número de polos de la máquina. Independiente del número de polos, un paso polar es siempre igual a  $180^\circ$  grados eléctricos.

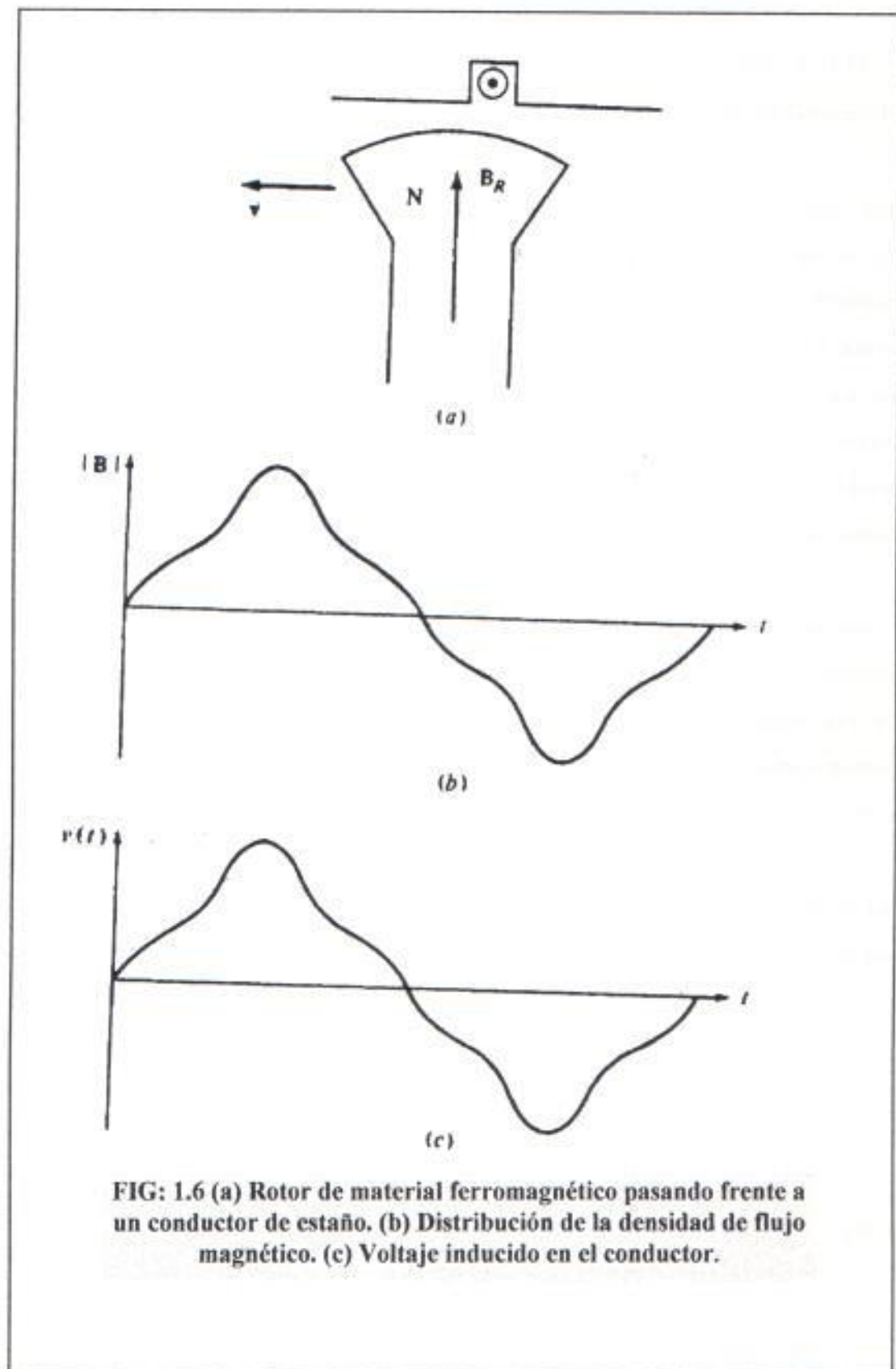
Si las bobinas del estator tienen el mismo ángulo que un paso polar , se denomina bobina de paso completo. Si se tiene un ángulo menor que el ángulo de paso polar se llaman bobinas de paso fraccionario.

Con frecuencia el ancho de una bobina de paso fraccionario se expresa mediante una fracción que indica la porción del paso polar que ella abarca. Por ejemplo, una bobina con  $5/6$ , ocupa cinco sextas partes de la distancia entre dos polos adyacentes. Como otra alternativa, el ancho de una bobina se puede dar en grados eléctricos.

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_r} * 180^\circ \quad \text{grados eléctricos} \quad (38)$$

donde  $\theta_m$  es el ángulo mecánico, en grados, cubiertos por la bobina, y  $\rho_r$  es el paso polar de la máquina dado en grados mecánicos, o sea:

$$\rho = \frac{\theta_m p}{2} \quad \text{grados mecánicos} \quad (39)$$



**FIG: 1.6** (a) Rotor de material ferromagnético pasando frente a un conductor de estaño. (b) Distribución de la densidad de flujo magnético. (c) Voltaje inducido en el conductor.

donde  $\theta_m$  es el ángulo mecánico, en grados, cubiertos por la bobina, y  $P$  es el número de polos de la máquina. la mayoría de los estatores reales tienen bobinas de paso fraccionario pues así se logran importantes ventajas.

Existe una buena razón para emplear devanados de paso fraccionario y ella tiene que ver con el efecto de la distribución no sinusoidal de densidad de flujo en las máquinas reales. Analizando la fig. 1.6, se muestra una máquina sincrónica de polos salientes cuyo rotor se mueve frente a la superficie del estator. Como la reluctancia de la trayectoria del campo magnético es mucho menor en el centro del polo que en sus extremos ( en el entrehierro es mas pequeño), el flujo se concentra en ese punto, haciendo que la densidad sea mayor ahí. en la figura esta dibujada la onda de voltaje inducido en el devanado. Este voltaje no es sinusoidal y tiene componentes armónicas de frecuencias altas.

La onda de voltaje resultante es simétrica con respecto al campo magnético del rotor, por lo tanto no tiene armónicos pares, pero si contiene todos los armónicos impares (tercero, quinto, séptimo, noveno,..etc.), los cuales deben ser eliminados con el diseño de la máquina. En general los armónicos de frecuencia altas tienen menor amplitud de tal manera que mas allá de un cierto limite ( por encima del noveno armónico más o menos ), se puede ignorar los efectos de los armónicos superiores.

Cuando las tres fases se conectan en estrella o delta, como resultado de dicha conexión se eliminan algunos armónicos de salida. El tercero es uno de ellos. Si las ondas fundamentales de voltaje de cada una de las tres fases están dadas por:

$$e_a = E_{M1} \text{sen } \omega.t \quad \text{v}$$

$$e_b = E_{M1} \text{sen}(\omega.t - 120^\circ) \quad \text{v}$$

$$e_c = E_{M1} \text{sen}(\omega.t - 240^\circ) \quad \text{v}$$

(V) (40)

entonces las componentes de terceros armónicos de esos voltajes serán:

$$\begin{aligned} e_a &= E_{M3} \operatorname{sen} 3\omega.t & \text{v} \\ e_b &= E_{M3} \operatorname{sen}(3\omega.t - 136^\circ) & \text{v} \\ e_c &= E_{M3} \operatorname{sen}(3\omega.t - 720^\circ) & \text{v} \end{aligned} \quad \text{(V)} \quad \text{(41)}$$

Es decir las componentes de terceros armónicos de voltaje son todas iguales y están en fase. Si la máquina sincrónica se conecta en estrella, el tercer armónico de voltaje entre cada dos terminales será cero (Aunque en cada fase existan componentes grandes de terceros armónicos de voltaje). Si la máquina se conecta en delta, las tres componentes de terceros armónicos se suman y hacen circular una corriente de tercer armónico por los devanados de la delta de la máquina. Estos terceros armónicos quedan aplicados a través de las impedancias internas de la máquina y nuevamente se tendrá un voltaje en terminales cuyo componentes de tercer armónico no es significativo.

Este calculo también es aplicado a los demás armónicos que sean múltiplos del tercero ( como el noveno armónico ). Estas frecuencias se llaman armónicos triplen y en las máquinas trifásicas se eliminan automáticamente.

Los armónicos que quedan son de frecuencia quinta, séptima, décima primera, décima tercera, etc. Como la influencia de los armónicos decrece a medida que aumenta la frecuencia, la mayor parte de la distorsión en la onda de salida se debe a los armónicos de orden quinto y séptimo, que con frecuencia se denominan armónicos deformadores. Si se encuentra una forma de anular estas componentes, entonces el voltaje de salida de la máquina sería una senoide pura de frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz).



### 1.3.3.4.1.-DEVANADO DE PASO FRACCIONARIO

Una forma de eliminar el contenido de armónicos es mediante el diseño del rotor para lograr una distribución de flujo aproximadamente sinusoidal. Aunque este procedimiento ayuda a disminuir el contenido de armónicas en la onda de voltaje, tampoco pueden eliminarlas todas. Un recurso adicional es utilizar devanados de paso fraccionario en el diseño de la máquina.

En un devanado de paso fraccionario, el ángulo eléctrico del armónico de orden  $n$  es igual a  $n$  veces el ángulo eléctrico de la componente de frecuencia fundamental, y esto es lo que se aprovecha para reducir los armónicos producidos por el estator de una máquina. En otras palabras si, para la frecuencia fundamental, el ancho de una bobina es 150 grados eléctricos, para la frecuencia del segundo armónico será de 300 grados, para la frecuencia del tercer armónico será 450 grados y así sucesivamente. Si  $\rho$  representa el ángulo eléctrico de una bobina a frecuencia fundamental y  $v$  el orden del armónico que esta utilizando, entonces la bobina tendrá  $v\rho$  grados eléctricos a la frecuencia de ese armónico. por lo tanto, el factor de paso podía expresarse por :

$$k_p = \text{sen} \frac{v\rho}{2} \quad (42)$$

Aquí, la consideración importante es que el factor de paso de un devanado es diferente según la frecuencia de cada armónico. Mediante una selección apropiada del factor de paso, es posible eliminar casi todos los componentes armónicos de frecuencias superiores en la salida de una máquina.

Los componentes de terceros y noveno armónico apenas se disminuyen un poco con este factor de paso, pero eso carece de importancia ya que de todas maneras ellas no aparecen en los terminales de la máquina. Entre los efectos de los armónicos triplen y el paso de la bobina se logra eliminar total o parcialmente los armónicos terceros,

quinto, séptimo y noveno quedando la frecuencia fundamental. Por lo tanto, con devanados de paso fraccionario se puede reducir drásticamente el contenido de armónicos en el voltaje de salida de una máquina, aunque también se disminuye ligeramente el valor pico de la onda fundamental.

En la fig. 1.7 están dibujados los valores en terminales de una máquina sincrónica para un devanado de paso completo y para un ancho de bobina  $p=150^\circ$ . Se puede observar que el devanado de paso fraccionario produce una forma de onda visiblemente mejor.

### 1.3.3.5.-ARMONICOS DE DIENTES DE RANURA

Aunque los devanados distribuidos presentan ventajas sobre los devanados concentrados en términos de la resistencia del estator, utilización, y facilidad de construcción, el uso de devanados distribuidos introduce un problema adicional en el diseño de las máquinas. La presencia continua de ranuras en la cara interior del estator produce variaciones en la reluctancia y el flujo en la superficie del estator. Estas variaciones producen componentes armónicas de voltaje llamados armónicas de diente o de ranura. La frecuencia de estos armónicos esta determinada por la distancia entre ranuras adyacentes y esta dada por:

$$V_{ran} = \frac{2MS}{P} \pm 1 \quad (43)$$

donde:

$V_{ran}$  = orden armónico

$S$  = número de ranuras en el estator

$M$  = un número entero

$P$  = número de polos de la máquina

El valor  $M = 1$  produce el armónico de ranura de menor frecuencia, que es el que mayores inconvenientes genera. Como estos armónicos dependen de la distancias entre ranuras adyacentes, distribuir los devanados o modificar el ancho de las bobinas no reduce sus efectos. Recuerde que una bobina empieza en una ranura y termina en otra; es decir su ancho es un múltiplo entero de la distancia que produce los armónicos de ranura, en primer lugar.

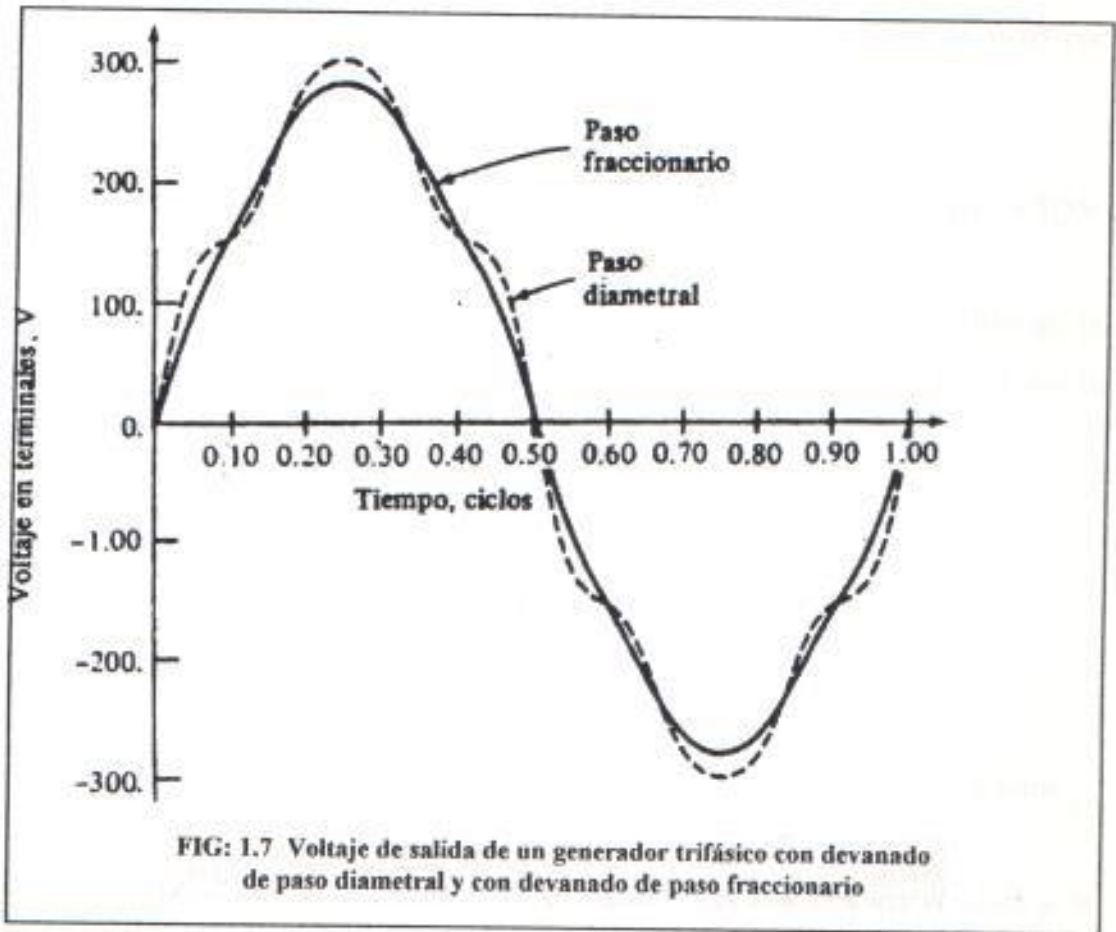
Los problemas que ocasionan los armónicos de ranura en las máquinas de corriente alterna son:

- Inducen armónicos en el voltaje de salida de los generadores de c.a.
- La interacción entre los armónicos de ranura del estator y del rotor producen pares parásitos en motores de inducción. Estos pares pueden afectar seriamente la forma de característica par-velocidad de la máquina.
- Producen vibraciones y ruido en la máquina.
- Incrementan las pérdidas en el núcleo al introducir voltajes y corrientes con componentes de alta frecuencia en los dientes del estator.

Los armónicos de ranura son especialmente problemáticos con motores de inducción, donde pueden introducir en el circuito magnético del rotor armónicos de una frecuencia tal que sus efectos refuercen el par de la máquina.

Para disminuir los armónicos de ranura, comúnmente se utilizan dos procedimientos que son: devanados fraccionarios y rotores con conductores inclinados.

Los devanados fraccionarios tienen un número no entero de ranuras por polo, particularmente en el rotor. Se puede construir un estator con  $2 \frac{1}{2}$  ranuras por polo.



El desbalance producido entre los polos adyacentes por los devanados fraccionarios ayuda a reducir los armónicos de orden quinto y séptimo y también los armónicos de ranura. Este procedimiento se puede utilizar para reducir armónicas en cualquier tipo de máquinas de c.a.

El otro procedimiento empleado para reducir las armónicas de ranura es más común y consiste en inclinar los conductores del rotor. Este se utiliza fundamentalmente en motores de inducción, donde los conductores se colocan ligeramente inclinados, de tal manera que cuando un extremo de un conductor se encuentre frente a una ranura del estator, el otro extremo se encuentre frente a una ranura vecina. Como los dos extremos del conductor del rotor están separados una ranura (distancia que, eléctricamente, corresponde a un ciclo completo del armónico de ranura de menor

frecuencia ), las componentes de voltaje debidas a las variaciones de flujo por armónicos de ranura, se anulan

### **I.3.3.6.-ARMONICAS PRODUCIDAS POR LOS MOTORES DE INDUCCION**

Las armónicas producidas por los motores de inducción resultan del análisis de la f.m.m y son dependientes de la frecuencia. Una armónica de orden  $n$  en la distribución de al f.m.m del rotor tiene,

- i ) Una longitud de onda  $\lambda/n$
- ii ) Viajan con una velocidad  $\pm (S^*f) \lambda/n$  con respecto al estator
- iii ) Viajan con una velocidad  $f^* \lambda (1-S) \pm (S^*f) * \lambda/n$  con respecto al rotor

Estas armónicas inducen una f.m.m en el estator con una frecuencia igual a la velocidad dividida por la longitud de la onda.

El signo positivo es tomado en esta expresión cuando la distribución de f.m.m armónica del rotor viaja en dirección positiva con respecto a la onda fundamental.

## **I.3.4.- CONVERTIDORES DE POTENCIA**

### **I.3.4.1.-COVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA**

Casi todo los circuitos electrónicos necesitan una fuente de alimentación de corriente continua; aquellos sistemas portátiles que necesitan baja potencia pueden emplearse baterías, sin embargo es alimentar un circuito a través de una fuente de alimentación, que constituye parte del equipo y convierte la onda alterna de las redes industriales de potencia en tensión continua.

Un rectificador es, en su aceptación general, un dispositivo que presenta una resistencia distinta al paso de la corriente eléctrica cuando se invierte la dirección de la corriente. Un rectificador puede considerarse como un dispositivo conmutador, y, por ende, es una discontinuidad de la red que trae como resultado una deformación de la corriente primaria en la fase y en la línea.

Los tipos de circuitos varían comenzando por la simple conexión monofásica de media onda, que se emplea en la carga de baterías, hasta los complejos circuitos múltiples, zigzag y bifurcados, empleados para producir corriente continua para tracción, transmisión de radio, electrólisis y otros procesos de alta tensión. Algunas de estas conexiones se caracterizan por el gran aprovechamiento de los aparatos; otras, por sus característica plana de regulación, etc.; mientras que otras son mas apropiadas para rectificadores de un solo ánodo ó utilizadas para rectificadores de alta tensión.

En los circuitos de gran potencia hay que considerar con gran cuidado las formas de onda y el rendimiento. En los circuitos de poca potencia, a menudo se sacrifica la forma de onda en pro de la sencillez y/o de economía.

Los convertidores de potencia introducen armónicas al sistema por imposición de cambios de ciclo de la impedancia del circuito que suministra potencia.

Debido al decrecimiento del costo e incremento en los niveles de potencia, el uso de estos dispositivos de cambio (diodos, tiristores y transistores), tienen un sin número de aplicaciones en la industria, establecimientos comerciales y casa.

Por su continuo desarrollo tecnológico continuaran incrementándose en el futuro. Esto son considerados como una fuente importante de armónicas en el sistema de distribución. estos dispositivos convertidores de potencia, semiconductores y generadores de armónicas son estudiados aquí.

[ Los convertidores de potencia tienen mucha mas inductancia en el lado d.c, que en el lado a.c. La corriente directa es razonablemente constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado d.c, y fuente de corriente armónica en el lado a.c. Bajo condición ideal el sistema a.c. tiene impedancia igual a cero e

inductancia de alisado infinita. Bajo esta condición, la corriente de la fase-p consiste en pulsos periódicos positivos rectangulares de ancho  $2\pi/p$  con respecto a la frecuencia suministrada.

En un perfecto sistema simétrico a.c, las corrientes resultantes son exactamente iguales en las tres fases; el análisis armónico de la forma de onda es realizado a continuación: Si el origen es tomado en el centro del pulso, la función  $F(x)$  es par, por ejemplo  $f(x) = f(-x)$  la serie de Fourier tiene solamente términos cosenos. Los coeficientes importantes con respecto a uno por unidad de la corriente d.c son:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-w/2}^{w/2} d(wt) = \frac{w}{2\pi} = \frac{1}{p} \quad (44)$$

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-w/2}^{w/2} \cos(nwt) d(wt) = \frac{2}{n\pi} \operatorname{sen} \frac{2\pi}{p} \quad (45)$$

La serie de Fourier, para los pulsos positivos son:

$$I_p = \left(\frac{2}{\pi}\right) * \left\{ \frac{w}{4} + \operatorname{sen} \frac{w}{2} \cos wt + \frac{1}{2} \operatorname{sen} \frac{2wt}{2} \cos 2wt \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \operatorname{sen} \frac{3wt}{2} \cos 3wt + \frac{1}{4} \operatorname{sen} \frac{4wt}{2} \cos 4wt \right\} \quad (46)$$

El convertidor ideal de dos trayectorias produce pulsos de corriente positivos y negativos en una fase-p. Aplicando las ecuaciones 44 y 45 el grupo de pulsos negativos se obtiene de la siguiente serie de Fourier:

$$I_N = \left(\frac{2}{\pi}\right) * \left\{ \frac{w}{4} + \operatorname{sen} \frac{w}{2} \cos wt - \frac{1}{2} \operatorname{sen} \frac{2wt}{2} \cos 2wt \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \operatorname{sen} \frac{3wt}{2} \cos 3wt - \frac{1}{4} \operatorname{sen} \frac{4wt}{2} \cos 4wt + \dots \right\} \quad (47)$$

La corriente de fase-p de las dos configuraciones convertidoras consiste el pulsos alternados positivos y negativos, la serie de Fourier total es obtenida sumando las ecuaciones 46 y 47. En esta ecuación la componente d.c y las armónicas de orden par son eliminadas

$$F = \left(\frac{4}{\pi}\right) * \left\{ \text{sen} \frac{w}{2} \cos wt + \frac{1}{3} \text{sen} \frac{3w}{2} \cos 3wt + \frac{1}{5} \text{sen} \frac{5w}{2} \cos 5wt + \dots \right\} \quad (48)$$

Si en la ecuación 48, reemplazamos  $w = \pi$  obtendremos la siguiente serie de Fourier en el dominio de la frecuencia.

$$F = \left(\frac{4}{\pi}\right) * \left\{ \cos wt - \frac{1}{3} \cos 3wt + \frac{1}{5} \cos 5wt - \frac{1}{7} \cos 7wt \dots \right\} \quad (49)$$

En esta función las armónicas de orden  $n+1 = 5, 9, \dots$  etc. son de secuencia positiva y las de orden  $n-1 = 3, 7, 11, \dots$  etc son de secuencia negativa.

### 1.3.4.2.-RELACION DE ARMONICOS EN CONVERTIDORES

#### Relación armónicos en convertidores de seis pulsos

En los rectificadores de seis pulsos (e inversores), la corriente en la fase "a" es obtenida substituyendo  $w = 2\pi/3$  en la ecuación 25 e insertando la corriente  $I_d$ , la representación en el dominio de la frecuencia es:

$$I_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} * I_d \left\{ \cos(wt) - \frac{1}{5} \cos(5wt) + \frac{1}{7} \cos(7wt) - \frac{1}{11} \cos(11wt) + \frac{1}{13} \cos(13wt) - \frac{1}{17} \cos(17wt) + \dots \right\} \quad (\text{Amp}) \quad (50)$$



Las siguientes conclusiones son hechas a partir de la ecuación 2

- 1.- La ausencia de la tercera armónica.
- 2.- La presencia de armónicas de orden  $6k+1$  para valores enteros de  $k$ .
- 3.- Las armónicas de orden  $6k+1$  son de secuencia positiva.
- 4.- Las armónicas de orden  $6k-1$  son de secuencia positiva.
- 5.- LA magnitud rms de la corriente fundamental es :

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{2 * \sqrt{3}}{\pi} \right) \quad (\text{Amp}) \quad (51)$$

$$I_b = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) * I_0 \quad (\text{Amp}) \quad (52)$$

- 6.- La magnitud rms de las  $n$ ésimas armónicas son:

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (\text{Amp}) \quad (53)$$

Si el primario o secundario del transformador del convertidor es conectado en delta la forma de la onda de corriente en el lado a.c consiste en la diferencia instantánea entre dos corrientes secundarias rectangulares desplazadas 120 grados en el tiempo. Cuando los transformadores son conectados en delta , el voltaje primario y secundario son iguales, En el caso de que los transformadores sean conectados en estrella-estrella, un factor  $\sqrt{3}$  es introducido en la relación de transformación y la serie de Fourier resultante en la fase "a" en el lado primario es:

$$I_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} * I_d \left\{ \cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) \right. \\ \left. - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) + \frac{1}{17} \cos(17\omega t) - \dots \right\} \quad (\text{Amp}) \quad (54)$$

Esta serie difiere de la conexión estrella-delta ó delta- estrella. por la secuencia de rotación de los armónicos de orden  $6k \pm 1$ , para los valores impares de  $k$ .

### Relación armónica en convertidores de 12 pulsos

La configuración convertidora de 12 pulsos consiste en dos grupos convertidores de 6 pulsos conectados en serie, alimentados por dos señales de transformadores trifásicos conectados en paralelo, con igual voltaje nominal y alternando sus fases 30 grados.

Manteniendo la operación de 12 pulsos, los dos grupos de seis tiristores operan por igual ángulo de control, y las corrientes están en fase una con otra. La corriente resultante a.c de la conexión transformadora estrella-estrella y delta-estrella es obtenida sumando las dos series de Fourier

$$(I_a)_{12} = 2 \frac{2\sqrt{3}}{\pi} * \left\{ \cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) \right. \\ \left. - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) - \dots \right\} \quad (\text{Amp}) \quad (55)$$

Esta serie contiene armónicas de orden  $12k + 1$ . La corriente armónica de orden  $6k \pm 1$  con  $k$  impar, por ejemplo, la quinta, séptima, décimo- novena, etc, circulara entre los transformadores convertidores pero no penetrara a la red a.c.

### Configuración convertidora de alto pulso

El incrementar el número de pulsos del convertidor es obtenido conectando dos transformadores en paralelo, con una fase alternada 30 grados, obteniendo una configuración de 12 pulsos, las propiedades adicionales de alternar transformadores en paralelo, proporciona la base para incrementar la configuración de los pulsos, por ejemplo, la operación de 24 pulsos es realizada por medio de cuatro transformadores, con fase alterna de 15 grados, la operación de 48 pulsos requiere ocho transformadores conectados en paralelo, con 7.5 grados de fase alternada. Aunque teóricamente es posible la configuración mayor a un número superior de 48 pulsos es relativamente injustificada, debido a los niveles prácticos de distorsión encontrados en el suministro de voltaje, el que tiene mucha influencia con los voltajes de cruce cero (conmutación), con la fase teórica alternada. Similarmente en el caso de las conexiones de 12 pulsos la fase alterna requiere de factores apropiados en la configuración del transformador en paralelo, el que es diseñado a voltaje nominal.

[La corriente armónica es relacionada al número de pulsos ( $p$ ), por la expresión general  $pk \pm 1$  y su magnitud decrece en relación inversa al orden armónico, Generalmente armónicas superiores a la cuadragésima novena, pueden ser despreciables cuando su magnitud es pequeña.]

### 1.3.4.3.-ARMONICAS EN LA LINEA DC.

Un convertidor de puente trifásico, genera en sus terminales de c.c tensiones armónicas de orden séptimas, décimo segunda, décimo octava , etc operando simétrica.

Cuando dos puentes convertidores están conectados en serie para funcionamiento de doce-pulsos, se duplican las tensiones totales de armónicas correspondientes al orden décima segunda, vigésima cuarta, etc mientras que la de orden séptima, décima octava, trigésima, etc se contrarrestan y desaparecen.

En el lado de c.c de un convertidor a.c/d.c de alta tensión normalmente se utiliza una reactancia serie de elevado valor . su misión principal no es de alisado sino para

limitar la rapidez de elevación de la corriente en el convertidor, de forma que el sistema de control tenga tiempo para actuar para reducir la corriente, no así, la reactancia c.c.

El efecto mas acentuado que tiene lugar cuando la estación convertidora alimenta directamente un cable largo de c.c, la frecuencia de resonancia entre la reactancia de c.c y la capacitancia del cable será relativamente baja del orden de 50c/s o menor, habrá una considerable atenuación de las armónicas principales de orden séptima, décima segunda, décimo octava etc, En general no es preciso un posterior filtrado en este caso.

Si la estación convertidora alimenta directamente una línea aérea de c.c relativamente larga, aun así esta conectada a un cable distante, puede ocurrir resonancia con alguna de las armónicas en algún punto de la línea no necesariamente próxima a la estación, Las líneas c.c tienen una resonancia tal que, para una cierta frecuencia armónica, la línea se comporta como una impedancia muy baja, la corriente armónica queda limitada por la reactancia de c.c probablemente a un valor aceptable.

Si la resonancia es tal que para una frecuencia armónica principal (de orden 6, 12, 18) la línea c.c es una impedancia muy elevada, entonces la reactancia de c.c. es ineficaz necesitándose un filtro sintonizado Shunt.

#### **1.3.4.4.-ARMONICAS DE VOLTAJE DIRECTO**

Para la configuración en puente trifásico el orden de los voltajes armónicos en el lado d.c. es  $h = 6k$ . El intervalo de repetición del a onda Es  $\pi/3$  y este contiene las res diferentes funciones con respecto al voltaje de cruce  $CI$ .

$$V_d = \sqrt{2} * V_c * \cos\left(wt + \frac{\pi}{6}\right) \quad \text{para: } 0 \leq wt \leq \alpha \quad (56a)$$

$$V_d = \sqrt{2} * V_c * \cos\left(wt + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2} \sqrt{2} \sin wt \quad (V) \quad (56b)$$

$$V_d = \sqrt{2} * V_c * \cos(wt) \quad \text{para: } \alpha \leq wt \leq \alpha + u \quad (56c)$$

Donde  $V_c$  es el voltaje conmutado rms "fase a fase". Por las ecuaciones 56a, 56b, 56c, la siguiente expresión es obtenida para la magnitud del voltaje armónico d.c.

$$V_n = \left\{ (n-1)^2 \cos^2\left[(n+1) \frac{u}{2}\right] + (n+1)^2 * \cos^2\left[(n-1) \frac{u}{2}\right] - 2(n-1)(n+1) * \left[(n+1) \frac{u}{2}\right] * \cos\left[(n-1) \frac{u}{2}\right] * \cos(2\alpha + u) \right\}^{1/2} \quad (V) \quad (57)$$

EL máximo voltaje rectificado promedio para el puente de seis pulsos es  $(3\sqrt{2} V_c) / \pi$  para  $\alpha = 0$  y  $u = 0$ , la ecuación se reduce a:

$$V_m = \frac{\sqrt{2} * V_{co}}{(n^2 - 1)} \approx \frac{\sqrt{2}}{n^2} \quad (V) \quad (58)$$

dando: 4.04% la 7ta, 0.99% la 12ava, 0.44% la 18ava armónica.

Generalmente como alfa aumenta, los armónicos también se incrementan y para  $\alpha = \pi/2$  y  $u = 0$

$$\frac{V_m}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2} * n}{(n^2 - 1)} \approx \frac{\sqrt{2}}{n} \quad (59)$$

Esta ecuación representa la máxima relación de armónica en el sistema, particularmente cuando se está considerando  $\alpha = 90$  grados y  $u$  probablemente muy pequeño. Si el convertidor implica dos puentes, uno con un transformador conectado en estrella-estrella ó delta-delta y el otro con un transformador estrella-delta, ó delta-estrella. Su voltaje respectivo debe estar 30 grados fuera de fase y así las armónicas estarán desfasadas 30 grados de la correspondiente frecuencia principal cada medio ciclo para la armónica séptima. Estas armónicas deberán estar en oposición de fase en los dos puentes. Similarmente para la décima segunda armónica 30° grados corresponden a un medio ciclo dando armónicas en fase, para la décimo octava armónica 30° grados corresponden a un medio ciclo, dando armónicas en oposición de fase y así sucesivamente.

La existencia de la impedancia del sistema es requerida para reducir el contenido de armónicos de la onda de corriente, Los efectos serán mayores si se producen en rectificadores controlados, si el ángulo de disparo es grande, los pulso de corriente del convertidor prácticamente no son afectados por la corriente del sistema a.c

### **1.3.4.5.-CONTENIDO ARMONICO EN LA CONMUTACION DE LOS CONVERTIDORES**

#### **1.3.4.5.1.-CONVERTIDORES CONMUTADOS LINEALES,**

Como su nombre lo indica, utilizan la fuente alimentadora a.c para la conmutación. Esto es el voltaje de la línea es usado para proporcionar el cambio negativo de un diodo o tiristor el cual retorna a la posición de apagado. Un convertidor conmutado linealmente no puede prever inversión hacia una carga estática, el usar el suministro a.c como un voltaje de conmutación lineal obliga al convertidor a operar a un solo factor de potencia en retardo.

Los convertidores conmutados linealmente son representados como fuentes de corriente armónica en el lado a.c.

Las armónicas producida por los convertidores conmutados lineal están relacionados con el número de pulsos. el número de pulsos, es el número de ciclos de rizado en el voltaje directo y por ciclos de voltaje alternativo.

Para el caso ideal de conmutación instantánea, las armónicas en el lado a.c y sus magnitudes son dadas por  $h = p \cdot k \pm 1$ , y la corriente por  $I_h = I_f/h$ , donde  $h$ = orden armónico,  $n$  = número entero,  $p$  = número de pulsos del convertidor.

EL convertidor mas común de tres fases es un dispositivo de seis pulsos, y tiene armónicas de orden  $6k \pm 1$ . Otras armónicas son producidas debido a un desbalance en el ángulo de disparo, pero este tipo de armónica son mucho más baja en magnitud.

Hay otro dos factores, además del número de pulsos y la corriente fundamental, que afectan la magnitud de las armónicas. esta son el ángulo de conmutación y el de adelanto.

El ángulo de conmutación es el aumento de tiempo que tomo la corriente transferida desde un elemento de conducción a otro. La conmutación nunca es instantánea, debido a la inducción del circuito alimentador del convertidor a.c/d.c.

Un convertidor de "p" pulsos, genera corriente armónica de orden  $h = pk \pm 1$  donde  $k = 1, 2, 3, \dots$  etc. El contenido armónico es obtenido por la relación  $I_h/I_o$ . Las mas severas condiciones de generación de armónicos existe cuando el ángulo de disparo es igual a cero, la potencia de salida  $P$  es igual a  $V_d \cdot I_d$ , el voltaje d.c deberá ser:

$$V_d = 3 \cdot V \frac{(1 + \cos u)}{\sqrt{2} \cdot \pi} = \frac{P}{I_d} \quad (\text{V}) \quad (60)$$

Esta expresión es conveniente, para la computación de la corriente armónica, como una función del convertidor. Donde:

$$I_h = 2I(u,0) \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot h \cdot V(1 - \cos^2 u)} \quad (\text{Amp}) \quad (61)$$

### 1.3.4.5.1.-CONVERTIDORES CONMUTADOS PROPIOS.

#### 1.3.4.5.2.-CONTENIDO ARMONICO DE LOS CONVERTIDORES CONMUTADOS PROPIOS

Los convertidores conmutados propios, difieren de los elementos conmutados lineales, en que ellos incorporan su propio medio de conmutación, ellos conmutan independientes del nivel de voltaje suministrado.

El contenido armónico de un convertidor conmutado propio es también diferente de los obtenido en los convertidores conmutados lineales.

En esta categoría, se incluyen los inversores usados en transformar la señal ac/dc. Las aplicaciones comúnmente usadas para estos dispositivos, son encontradas en celdas de combustible fotovoltaicas, en conjuntos convencionales y almacenadores de energía. Su utilización determina la corriente armónica inyectada a la red, conociendo especificaciones acerca de los parámetros de los convertidores, es ventajoso para nosotros conocer el espectro del voltaje armónico en el convertidor.

$$V_h = \frac{0.1 * V}{\sqrt{3}} \quad (\text{V}) \quad (62)$$

La cual debe dar

$$I_h = \frac{10 * S_r}{(\sqrt{3} * h * X_r)} \quad (\text{Amp}) \quad (63)$$

Donde:

$X_r$  % reactancia en corto circuito, del transformador convertidor en porcentaje de la base obtenida.

Por consiguiente  $I_h$  en por unidad es

$$I_b = \frac{10S_r}{h * S_B * X_r \%}$$



$$(p.u) \quad (64)$$

En conclusión podemos decir que los convertidores estáticos de potencia (rectificadores, inversos y otros dispositivos de conmutación) constituyen una fuente común de corriente armónica. Esto se debe al hecho de que se produce discontinuidad en la carga de la red que trae como resultado una deformación de la corriente primaria, en las fases y en las líneas. Esta distorsión de la forma de onda de corriente, es resultado de la conmutación producida por estos dispositivos. La forma de onda de la corriente primaria, puede descomponerse en una onda senoidal fundamental a la que se superponen una cantidad de armónicas de diferentes frecuencias magnitud y relación de fase.

Las corrientes armónicas son requeridas para aproximarse a una corriente directa por medio de algún equipo rectificador de fase controlada, produciendo una onda de salida esencialmente cuadrada. Las armónicas características de corriente asociadas comúnmente con convertidores estáticos de potencia cuyo número de pulsos es seis, son : quinta, séptima, undécima y decimotercera armónica. Una clásica corriente de forma de onda cuadrada, puede ser producida aumentando la corrientes armónica en fase, cuya magnitud es igual a la suma de la fundamental con un múltiplo de ella igual al recíproco del orden del armónico.

Si se considera la carga d.c. en un convertidor estático de potencia a ser relativamente constante en un corto periodo de tiempo -segundos ó minutos- podría considerarse que la corriente d.c. es constante.

Un convertidor estático de potencia, conmuta esta corriente constante d.c entre las fases de un sistema de potencia a.c. Por medio del análisis de Fourier, se puede mostrar que el sistema de potencia a.c tiene que suministrar corrientes armónicas de orden y magnitud de:

$$h = k p \pm 1 \quad (66)$$

$$I_h = I_1 / h \quad (\text{Amp}) \quad (67)$$

donde:

$h$  = Orden armónico

$k$  = Del análisis de Fourier, es un entero que puede ser 1,2,3...

$p$  = Número de pulsos del circuito rectificador.

$I_1$  = amplitud de la corriente fundamental.

$I_h$  = Amplitud de la corriente armónica.

La ecuación 67, proporciona valores teóricos de la corriente de armónica en por unidad de la corriente fundamental. Sin embargo la amplitud de las corrientes armónicas son una función del ángulo de retardo ( $\alpha$ ) y de la reactancia de conmutación ( $X_c$ ).

Teóricamente, los convertidores de 12 pulsos, no producen armónicas de quinto, séptimo, decimoséptimo y decimonoveno orden, pero debido al desbalance algunas veces se presentaran en 10 al 15% del equivalente de un convertidor de seis pulsos. Estos desbalances podrían ser causados por variaciones en voltaje ó impedancia de línea - línea en sistemas trifásicos, diferencia de razón de vueltas en los devanados de algún transformador, esto es debido al tipo de conexión que se realice, diferencias de los ángulo de disparo de los circuitos múltiples rectificadores, etc.

### **1.3.5.-EQUIPOS DE ARCO**

#### **1.3.5.1.-GENERALIDADES**

Los equipos de arco en bobinas y arcos caloríficos, generan armónicos debido a las características no-líneales de voltaje y corrientes. Los voltajes armónicos de principal interés en este caso son, el quinto, y séptimo. Niveles del 8% al comienzo de la fundición, 6% al final de la fundición y 2.5% durante el refinamiento, son medidos para el quinto voltaje armónico.

Una combinación de retardo en la inyección de arcos, y las características no lineales de voltaje y corriente, introducen armónicas al sistema de potencia por variación de la frecuencia fundamental.

En resumen, los cambios de voltaje por alteración de la longitud del arco producen extensiones de la frecuencia, en un rango aproximado de 0.1 Hz a 30 Hz cerca de cada armónica. Este aspecto es mas evidente durante la fundición causada por continuos movimientos de los fragmentos e interacción de fuerzas electromagnéticas del arco.

### **1.3.5.2.-HORNOS DE ARCO.**

En industria del acero, la operación de fundición utiliza hornos de hogar abierto o de oxígeno básico, y en las miniplantas, hornos de arco eléctrico.

En una miniplanta de fundición la materia prima es chatarra de acero la cual se funde y se refina para producir acero sin procesar y productos del acero, El acero se funde en un arco eléctrico en el que la corriente pasa de un electrodo a través de un arco hacia la carga de chatarra, y luego de la carga a otro electrodo,

Los dos tipos de horno de arco que hay en uso común son 1) el horno trifásico y 2) el horno monofásico,

Existen 3 distintas etapas en la operación de un horno eléctrico. La primera de estas etapas el arco eléctrico es formado esto se debe a que se baja el electrodo dentro del vaso de carga (e.j. dentro de la chatarra de acero en el vaso).

La segunda etapa es la de fundición en la cual se aplica un arco de calentamiento a la superficie del vaso de carga, la corriente circula en el vaso de carga resultando un calentamiento del tipo  $I^2R$ , en esta etapa las corrientes van a ser muy altas y la forma de onda de las corrientes van a ser muy erráticas debido a que los caminos de la corriente cambian constantemente y de una manera muy rápida.

Virtualmente todos los hornos a.c son de tres fases. El voltaje típico aplicado esta en el orden de 1 a 25Kv este voltaje se desarrolla desde transformador del horno que

esta especialmente diseñado para mantener corrientes pulsantes altas. La corriente que circula por el electrodo esta normalmente en el rango de 1 a 4 KA, pero pueden ocurrir corrientes momentáneas mucho mas altas particularmente durante el encendido.

Desde el punto de vista de la forma de onda del lado de alta del transformador. Uno primero observa una fluctuación rápida y cambios erráticos. Altas frecuencias son asociadas con picos y ceros rápidos de la frecuencia, el tiempo de la forma de onda aparece errático pero una inspección cuidadosa indica unos componentes de la frecuencia fundamental. La transformada de Fourier de la corriente demuestra componentes debajo y sobre la frecuencia fundamental.

En los hornos d.c el rectificador de alimentación pueden ser unidades de 6 a 12 pulsos, con el de 12 pulsos favorece a los hornos de alta potencia. La compuerta de control del SCR del rectificador ofrece un control muy atractivo de la potencia activa y reactiva de la alimentación, aqui también consideramos la ventaja que el impacto armónico de los hornos d.c se concentran en los armónicos  $(6n \pm 1)W_0$  para  $n = 1, 2, 3, \dots$  y la filtración es mucho mas efectiva y de menor costo, en ninguno de ellos habrá componentes de frecuencia en la alimentación menores a la frecuencia fundamental.

### 1.3.5.3.-LAMPARAS FLUORESCENTES

Cuando se aplica un voltaje determinado a los terminales de la lampara que se encuentran en sus extremos, la corriente produce un arco al circular entre los electrodos a través del gas de relleno ( vapor de mercurio). Esta descarga produce alguna radiación visible principalmente ultravioleta que excita el recubrimiento de fósforo para emitir luz.

EL uso de elementos electrónicos de estado sólido en lugar de componentes magnéticos convencionales pueden aumentar la eficacia de lamparas porque estas operan a mayor frecuencia y pueden reducir la entrada de energía eléctrica.

Tanto los reactores electrónicos como los electromagnéticos generan armónicas en la corriente de línea. Para tipos electrónicos, la escala de corriente armónica generadas es de menos 10% a más del 100%, algunos generan menos corriente armónica que los reactores magnéticos. Las mediciones informadas de lámparas fluorescentes compactas y dispositivos de diodos para el uso de receptáculos de lámparas incandescentes muestran factores de potencia entre 47 y 67% y distorsión armónica total de 100%.

La intensificación de equipo electrónico para procesamiento de datos aumentó la atención dada al contenido de armónicos de sistemas de energía eléctrica. Se sabe que los reactores de lámparas fluorescentes contribuyen a la distorsión armónica total (THD), y desde hace tiempo se ha reconocido que las lámparas fluorescentes producen armónicas que elevan la corriente del conductor neutro del sistema de distribución de energía eléctrica trifásica de cuatro hilos, de conexión en estrella, aun cuando las cargas de fase se encuentren razonablemente balanceadas. Existen algunos circuitos viejos donde se utilizan neutros reducidos para cargas de iluminación fluorescente, Sin embargo desde hace tiempo se ha recomendado conductores neutros a 100% de capacidad para circuitos ramales que dan servicio a cargas formadas por más de la mitad de alumbrado fluorescente. En efecto se especifican cables con hilo neutro unitario extra grandes, cables que proporcionan un neutro separado para cada fase, transformadores para mejorar cargas armónicas etcétera.

El impacto de las lámparas fluorescentes en un sistema de distribución a.c., es principalmente al alto contenido del tercer armónico, que aparece como corriente de secuencia cero en el neutro de los sistemas trifásicos, por esta razón los bancos de capacitores localizados en subestaciones, que tienen un alto porcentaje de su demanda debido a las lámparas fluorescentes deben ser chequeados para evitar una resonancia del tercer armónico. Para subestaciones a las cuales la carga de lámparas fluorescentes excede el 10% el total de los KVA nominales, resonancias cercanas al tercer armónico pueden dar un voltaje alto de tercer armónico de magnitud

inaceptable. La operación práctica es desintonizar el circuito moviendo la frecuencia resonante debajo del tercer armónico. También la distribución uniforme de las cargas fluorescentes sobre varias alimentadoras puede ayudar, es prudente separar eléctricamente los capacitores de derivación de las alimentadoras que tienen un alto porcentaje de cargas fluorescentes, otra posibilidad es conectar los capacitores de derivación a subestaciones en una configuración no aterrizada, e.j. delta, algunos diseños aseguran que la carga sea servida por lo menos de una conexión de transformadores no aterrizada, la última puede ser la causa de que corrientes del tercer armónico aparezcan como voltajes del tercer armónico.

## CAPITULO II

### SISTEMAS DE POTENCIA BAJO CONDICIONES NO SINUSOIDALES

#### 2.1.-INTRODUCCION

El análisis de las señales armónicas en los sistemas eléctricos de potencia ciertamente no es un tópico moderno, antiguamente la inyección de armónicas al sistema eléctrico solo consideraba a los circuitos rectificadores y los transformadores saturados como fuente de las señales armónicas. Actualmente gracias a una serie de estudios realizados sobre armónicas, se conoce que cualquier carga no lineal produce armónicos es decir, es una verdadera fuente de corriente armónica.

En los sistemas eléctricos de potencia A.C, las corrientes armónicas fluirán por el camino de menor impedancia. Estas armónicas se dividirán de acuerdo a la razón de impedancia de ambas ramas. (fig 2.1). Normalmente la fuente de potencia es el camino de baja impedancia, por lo tanto la mayoría de las corrientes armónicas fluirán hacia ella, sin embargo si existen instalaciones de capacitores de potencia, un problema podría ocurrir cuando la reactancia capacitiva de los capacitores de potencia es igual a la reactancia inductiva equivalente del sistema.

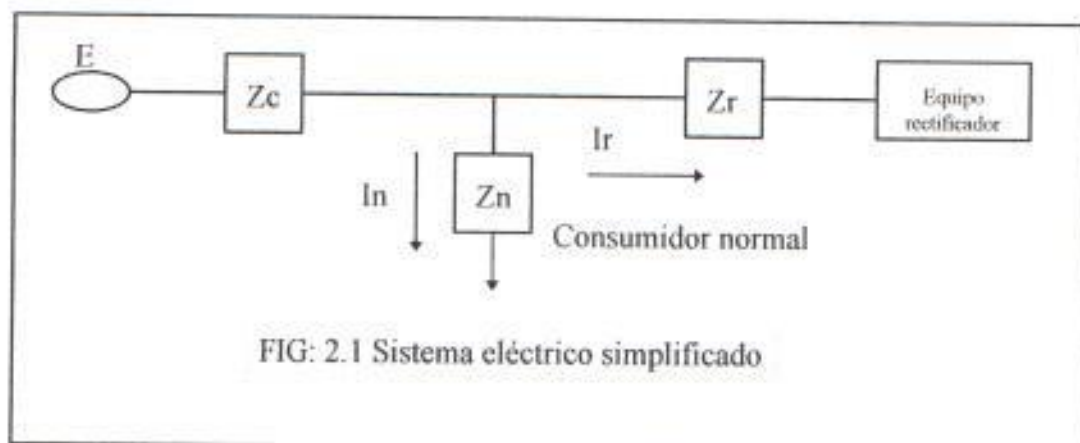
La resonancia en paralelo produce una alta impedancia al flujo de corriente cuya frecuencia corresponde a la frecuencia de resonancia. La resonancia en serie produce en cambio un circuito de baja impedancia. La condición de resonancia paralelo puede causar oscilaciones de corriente que son excitadas por la corriente de resonancia en paralelo, Estas corrientes que fluyen a través de impedancias producen voltajes armónicos, produciendo entonces formas de onda de voltaje distorsionado.

Hay que tener presente el acoplamiento inductivo entre las líneas de transmisión de potencia A.C y las líneas telefónicas (verdaderos circuitos abiertos). Este acoplamiento induce voltajes armónicos en los sistemas telefónicos, en los cuales se

producen altos niveles de ruido, haciendo prácticamente imposible entender los mensajes telefónicos.

Los sobrevoltajes producidas por las señales armónicas en los sistemas de potencia, pueden producir daños a los bancos de condensadores utilizados ya sea para mejorar el factor de potencia en la barra que se encuentran conectados ó como trampa de estas señales armónicas. Estos sobrevoltajes provocan un incremento de temperatura en el dieléctrico, resultando así una disminución de la vida útil de estos equipos.

Dependiendo de el nivel de armónicos, la influencia de estas señales en la exactitud de los instrumentos de medición de energía activa ó reactiva y factor de potencia, es prácticamente despreciable.



o Cuando existen condiciones de resonancia, ahí es verdad cuando los instrumentos de medición son realmente afectados debido a la producción de sobrevoltajes por la presencia de estas señales armónicas.

Los dispositivos tales como voltímetros y relés de sobrecorriente, que funcionan mediante disco de inducción, solo ven circulando la corriente fundamental pero debido a las fases desbalanceadas que son producto de la distorsión armónica, puede producir lo operación errónea de estos dispositivos.

Cuando un banco de transformadores es energizado, una elevada corriente de excitación se produce, el valor de esta corriente puede ser muchas veces la magnitud de la corriente a plena carga. Si un capacitor esta en serie con el transformador



cuando ocurre la energización, una condición de resonancia puede ocurrir, la cual produce que persista una elevada corriente. esta condición es conocida como ferorrresonancia.

Las corrientes armónicas pueden ocasionar un excesivo calentamiento en las máquinas rotativas. Las corrientes armónicas de secuencia de fase positiva y negativa, ambas causan calentamiento adicional en el rotor sólido de las grandes máquinas sincrónicas.

## **2.2.-EFECTO DE LOS ARMONICOS SOBRE LOS EQUIPOS.**

### **2.2.1.-CAPACITORES**

Los bancos de capacitores en la subestaciones son los componentes dominantes en las respuestas armónicas y transientes del sistema de distribución. La respuesta armónica del sistema de distribución esta dominada por la inductancia y capacitancia paralela

L.C, incluyendo circuitos del banco capacitor de la subestación y la reactancia equivalente de la fuente.

El punto resonante paralelo creado por este circuito LC, tiende a producir armónicas de orden bajo, por ejemplo, la tercera y quinta son causadas en su mayoría por los bancos de capacitores. Cuando hay suficiente generación armónica provenientes de transformadores de distribución, convertidores conmutados lineales y equipos de arco, en alimentadoras o cercanos a estos puntos, las armónicas de la onda de voltaje se incrementan.

Tres especificaciones para la operación de estado estable en capacitores de potencia tipo Shunt son como sigue:

- 1) Operación continua en 133% de la potencia reactiva nominal.
- 2) Operación continua hasta 110% del voltaje terminal nominal
- 3) Operación continua en 180% en la corriente rms nominal.

Cada una de estas limitaciones puede ser tratada separadamente, para determinar un máximo nivel de voltaje armónico.

Limitación 1) 135% de la potencia reactiva nominal, si el voltaje fundamental es 1.0 p.u, los KVA permisibles debido a los armónicos son :

$$KVAR_h = 0.35 \text{ p.u}$$

donde:

$KVAR_h$  = Kilo var armónico

Para una componente armónica el voltaje máximo es:

$$V_h(\text{max}) = (0.35/h)^{1/2} \text{ p.u}$$

Donde:

$V_h$  = voltaje armónico máximo.

$h$  = orden armónico.

Por ejemplo el máximo voltaje de la quinta armónica, asumiendo solamente este componente es:

$$V_5(\text{max}) = (0.35/5)^{1/2} \text{ p.u} = 0.26 \text{ p.u}$$

Para mas de una componente armónica la siguiente formula es usada para determinar si la limitación uno es satisfecha o no.

$$\sum h V_h^2 \leq 0.35$$

Limitación 2) 110% del voltaje terminal nominal.

Los niveles marinos determinados por esta limitación dependen del 110% el voltaje máximo nominal. Si este es voltaje rms, como la normalización lo indica.

El voltaje armónico máximo puede ser calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\left( V_1^2 + \sum V_h^2 \right)^{1/2} \leq 1.10 \quad \text{p. u.}$$

$$V_h = (1.10^2 - 1^2)^{1/2} = 0.46 \quad \text{p. u.}$$

Limitación 3) 180% de la corriente terminal nominal.

Los niveles armónicos máximos determinados por esta limitación dependen del 180% de la corriente máxima nominal, Si esta es una corriente rms, como la normalización lo indica.

La corriente armónica máxima puede ser calculada a partir de la siguiente expresión:

$$\left( I_1^2 + \sum I_h^2 \right)^{1/2} \leq 1.80 \quad \text{p. u.}$$

Donde:

$I_1$  = corriente fundamental

$I_h$  = corriente armónica.

El efecto de los componentes armónicos sobre los bancos de capacitores es causa de incremento en las pérdidas eléctricas, y producen calentamiento en los capacitores.

Estas son calculadas a continuación :

$$L = \sum_{n=2}^{\infty} C(\tan \delta) n^2 w_n^2 V_n^2 \quad (\text{W}) \quad (68)$$

Donde:

L = Incremento de las pérdidas.

n = Orden armónico

C = Capacitancia.

(  $\tan \delta$  ) = Factor de perdidas

$\omega n = 2\pi f$  frecuencia de tiempo de los enésimos armónicos.

$V_n$  = voltaje rms de los enésimos armónicos

Dado el voltaje y corriente armónica en la barra del capacitor, las perdidas son fácilmente calculadas.

Los efectos capacitivos en el sistema de potencia, son divididos en tres distintos modelos.

- a) Capacitores localizados cercanos generan distorsión en los equipos.
- b) Capacitores localizados distantes producen mala operación en algunas fuentes armónicas específicas.
- c) Cuando una pequeña carga de capacitores no distribuidas es conectada a un sistema de distribución para corregir el factor de potencia, produce distorsión de voltaje sobre alimentadoras.

### 2.2.2.-TRANSFORMADORES

Efecto de los terceros armónicos.

La influencia de los terceros armónicos en transformadores puede ser clasificada como sigue:

- a) Sobrecalentamiento de los devanados del transformador y en la carga.

En la práctica esta condición ocurre muy rara vez debido a las consideraciones de diseño del fabricante. Los bancos transformadores trifásicos formados por unidades monofásica, después que ha sido probado con el cuarto-terminal sobre el lado primario y entre el neutro del lado del generador (conexión que permite la circulación de la tercera armónica) produce un incremento del 20% mas alto que cuando el neutro es desconectado, por supuesto que este valor varia de acuerdo a las consideraciones del diseño y los valores de impedancia del circuito primario.

Bajo ciertas condiciones de carga, las componentes de terceros armónicos en los voltaje de fase de los transformadores trifásicos tipo Shell ó bancos de transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella, puede ser amplificado por capacitancia de la línea a tierra. esto ocurre cuando el neutro del lado de alta tensión es aterrizado de forma que los terceros armónicos pueden circular a través de los devanados de los transformadores, retornando a tierra a través del cuarto terminal y de las capacitancias línea a tierra.

Esta amplificación de voltaje de terceros armónicos ocurre solamente cuando la capacitancia del circuito es pequeña comparada con la inductancia, caso en el cual corriente de tercera armónica adelanta al voltaje casi en 90 grados por lo que supone en fase con el componente de tercer armónico, del flujo magnético del núcleo.

Dicho componente del flujo llega a intensificarse, el cual en suma produce un incremento en el voltaje de tercer armónico, por lo tanto incrementa la corriente de terceros armónicos capacitivas. Este proceso continua hasta que el núcleo es saturado, y los voltajes inducidos son mayores con valores picos muy altos, los que se han encontrados en la práctica a son del orden de tres veces las perdidas del hierro, incrementando estas perdidas. En condiciones normales muchos transformadores han fallado por esta causa.

Este fenómeno también ocurre en transformadores trifásicos tipo - núcleo, en consideración de la relativa ausencia de terceros armónicos.

#### b) Esfuerzos en la aislación .

En la práctica, los voltajes de terceros armónicos procedentes de transformadores monofásicos conectados en estrella, con neutro aislado, producen voltajes de terceros armónicos que pueden llegar a una magnitud del 60% de la onda de voltaje fundamental, ello es una medida del esfuerzo adicional sobre los devanados a tierra del transformador de distribución, pero su influencia es considerable en los transformadores de potencia.

### Conexión estrella - Estrella.

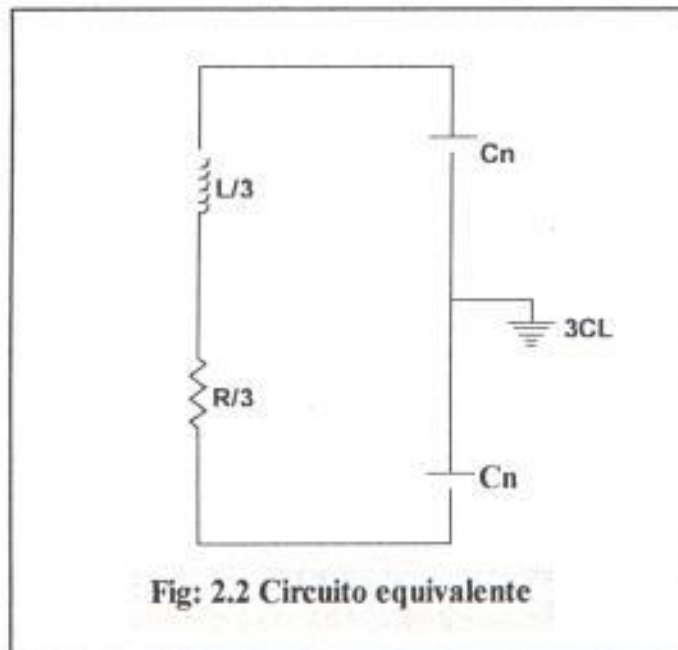
Bajo ciertas condiciones de operación normal la conexión - estrella en transformadores trifásicos tipo Shell ó grupo de transformadores de unidades monofásica, pueden producir un severos calentamiento en el circuito magnético, condición que se obtiene cuando el neutro del banco en el lado secundario es aterrizado y se tiene un cierto valor de capacitancia de línea.

#### 1.- Neutro aislado.

Con el neutro aislado sobre ambos lados, no puede fluir ninguna corriente de tercera armónica, si el flujo magnético y el voltaje inducido podrán tener componentes de terceros armónicos.

Este componente podría ser medido por medio de voltímetros eléctricos o electrostáticos entre neutro y tierra, el único problema que podría tener es un leve esfuerzo en el dialéctico de la aislación del transformador .

El circuito siguiente (fig 2.2), muestra el equivalente del transformador para la consideración de la presencia de voltaje neutro a tierra.



En donde L y R son la inductancia y resistencia respectiva de los devanados del transformador, CL representa la capacitancia equivalente de la línea a las cuales esta

conectado el transformador a tierra,  $C_N$  es la capacitancia neutro a tierra. Por comparación  $C_N$  es pequeña con respecto a  $C_L$ , por lo que el voltaje aplicado en su totalidad aparece a través de esta capacitancia.

El voltaje a través de la inductancia es el voltaje de terceros armónicos inducido o generado en el lado secundario. el neutro es aterrizado y conectado a una línea de transmisión de distribución. Si la línea es aérea o aterrizada tendríamos cierto valor de capacitancia a tierra. En este caso tendremos lo siguiente:

- 1) Con el neutro aislado, ninguna corriente puede fluir en consideración de la capacitancia neutro a tierra relativamente pequeña.
- 2) Con el neutro aterrizado, existe un camino por donde puede fluir la corriente vía devanado del transformador y capacitancia línea a tierra.

Esta corriente en el lado secundario es la que va a influir en la eliminación de los voltajes de los terceros armónicos en el sistema, al cual está conectado, pudiendo suceder varios casos tales como:

**a.- La corriente está en atraso con respecto al voltaje de terceros armónicos.**

Para el referido caso, los armónicos actuarán con la onda fundamental de corriente de magnetización, produciendo los amperios-vueltas, resultando en una reducción de los armónicos de la onda de flujo, y los componentes armónicos de la onda de voltaje inducido, por lo que no habrá corriente armónica en el secundario.

**b.- Corriente en adelante con respecto al voltaje.**

En este caso, los armónicos están en fase con la onda fundamental de excitación del primario, por lo que los amperios vuelta resultantes se intensifican ya que los voltajes inducidos son también intensificados. Los voltajes de terceros armónicos reaccionan sobre el circuito secundario, para producir corrientes de terceros armónicos altos, lo que incrementa el flujo de terceros armónicos y otra vez los voltajes de terceros armónicos. Este proceso continúa hasta que se produce la

saturación del circuito magnético, en vista de la condición del primario esta corriente solo circulara a través del secundario.

### **c.- Corriente y voltaje en fase aproximada.**

Esta es la condición de resonancia produciéndose voltajes excesivamente altos desde cada línea a tierra. Si los componentes L y C son de valores altos, el núcleo el transformador podrá llegar a un grado de saturación mucho mas alto que en el caso anterior, llegando el transformador a estar sujeto a excesivos esfuerzos dieléctricos y térmicos. Esta condición aunque muy rara vez ocurre podría darse en sistemas de potencia que emplean transformadores conectados en estrella-estrella, con el neutro del secundario aterrizado, a menos que se haga algún acondicionamiento para la circulación de las corrientes de terceras armónicas, bajo estas condiciones, loa transformadores Shell o grupos monofásicos, no deberán ser conectados de esta manera, en transformadores trifásicos tipo núcleo, teóricamente tienen la misma desventaja, pero en tales transformadores la componente de terceros armónicas no excede el 4% de la fundamental, por lo que el peligro es proporcionalmente reducido, sin embargo cuando el transformador es conectado en línea de alta tensión un 5% es peligroso, con el neutro aterrizado, y por esto que es mejor evitar tal conexión si el punto neutro tiene que ser aterrizado.

### **2.2.3.-MÁQUINAS ROTATIVAS.**

Los efecto de los armónicos en máquinas rotativas sincrónicas son similares a los producidos en los motores de inducción. El efecto mas importante en las máquinas rotativas es la perdida del cobre, y este produce calentamiento en los sitios cerrados y cubiertos.

Los calentamientos en sitios cerrados, justifican el limite de distorsión del voltaje en un 10%. Se recomienda que la suma de los valores efectivos de todos los voltajes armónicos no podrán exceder del 5% del voltaje efectivo nominal.



Pruebas realizadas muestran que en estado estable los efectos del voltaje armónico el arranque y en el torque de operación, son insignificantes a un nivel superior del 10% al 20% del voltaje de operación. No así, torques oscilantes, debido a la interacción, entre la corriente armónica y el campo magnético resultante.

#### **Perdidas armónicas**

Las perdidas de campo producida por las armónicas de la onda de voltaje y/o corriente producen elevados calentamientos en las bobinas del estator y rotor.

Las perdidas por calentamiento del estator y rotor son grandes comparadas con las ocurridas debido a la resistencia d.c a causa de los efectos de Eddy y el deslizamiento. En el caso de motores de inducción las perdidas del flujo en ambas bobinas, del rotor y estator, a frecuencia altas producen perdidas del hierro.

El aumento de perdidas de potencia es el mas cerio efecto de las armónicas sobre la máquina a.c ya que la capacidad de la máquina depende de las perdidas, este efecto produce aumento en la temperatura y sobre calentamientos en el rotor.

#### **Torques armónicos.**

El circuito equivalente de una máquina de inducción puede ser obtenido para cada orden armónico. Las corrientes armónicas producen en el estator de una máquina a.c., acción de inducción motorizadora a deslizamientos positivos  $S_n$ . Esta acción da incrementos al torque el la misma dirección de rotación, ya que la velocidad del campo armónico, están en la misma dirección delas armónicas de secuencia positivas y las de secuencia negativas tienen efecto opositor.

#### **2.2.4.-EQUIPOS CONVERTIDORES.**

Elementos electrónicos tales como: rectificadores, inversores, ciclo convertidores son sensitivos al punto de cruzamiento cero de la onda de voltaje y estos son afectados por la distorsión armónica.

El efecto mas importante en los convertidores es el desplazamiento del punto neutro (conmutación). Las siguientes recomendaciones son una guía para la protección de los armónicos en los equipos electrónicos.

El efecto de distorsión del voltaje armónico no puede exceder del 10%. Cada voltaje armónico individual no podrá exceder del 50%, para la decimotercer armónica y este valor decrecen en un 20% a 5000 Hz (50Hz de la frecuencia fundamental).

Teóricamente, las armónicas afectan al control en el disparo de tiristores y de algunos equipos consumidores en varias formas como:

- a) Voltajes armónicos causan mala operación a través de todo el disparo de tiristores y causan el disparo del circuito de puerta en instantes que no es el requerido para el control del convertidor.
- b) Efectos resonantes en varios equipos causan un sobre voltaje en el sistema.

Los problemas descritos, podrán ser experimentados por otros consumidores, que estén conectados en alguna barra de 115 ó 11KV. Si los equipos convertidores no tiene problema con la mala operación de su equipo de control de tiristores, estos efectos probablemente interfieren con otros dispositivos colocados en diferentes barras remotas.

### 2.3.-LA GENERACION Y PROPAGACION DE LAS SEÑALES ARMONICAS.

Las corrientes de carga de una carga no lineal, es una señal no sinusoidal que puede ser desarrollada en series de Fourier:

$$i(t) = \sqrt{2} I^k \text{sen}(k\omega_o t + \phi_k) \quad (\text{Amp}) \quad (69)$$

donde:

$I^k$  = valor RMS de la corriente calculada al armónico de orden k

$\phi_k$  = ángulo de fase al armónico de orden k

Los componentes de Fourier de la corriente son, determinados en parte por los componentes de Fourier del voltaje de barra, así mismo esta corriente no sinusoidal provoca una forma de onda en la barra de tipo no sinusoidal, La solución de ambos componentes, voltaje y corriente es alternativa, y puede ser formulada de la siguiente manera:

- 1.- En todas las barras se debe cumplir las leyes de KIRCHHOFF.
- 2.- El termino " voltio amperios reactivos" ó "Q" es utilizado como una cantidad matemática, esta cantidad, no posee la propiedad de conservación de "P" ó " potencia activa", la diferencia o desajuste de potencia activa y voltioamperios reactivos en la barra es nulo.
- 3.- El desajuste de corriente en cada barra es cero.

Cuando se tiene una corriente de carga armónica muy baja, la distorsión producida sobre la forma de onda de voltaje y su influencia subsecuente en la corriente de carga puede ser ignorada.

Con respecto a la propagación de las señales armónicas desde al carga no lineal, dicha propagación es gobernada por la siguiente.

Equipo	Naturaleza del Daño debido a las tensiones Armónicas	Grados de Inmunidad o Niveles de Tensión admisibles
Máquinas Sincrónicas	Mayor nivel de calentamiento particularmente en los devanados amortiguadores	$\sqrt{\sum (V_h/h)^2} \leq 1.3$ a 2.4 % De acuerdo con el tamaño de la  Z  inversa de la máquina
Transformadores	- Mayor nivel de pérdidas - Riesgo de saturación en presencia de armónicos pares	$\sqrt{\sum (V_h)^2} \leq \frac{5\% \text{ a plena carga}}{10\% \text{ en vacío}}$ (cf. IEEE)
Máquinas Asincrónicas	- Mayor nivel de calentamiento - Torques Pulsantes	$\sqrt{\sum (V_h/h)^2} \leq 1.5$ a 3.5 % De acuerdo con el tamaño de la  Z  inversa de la máquina
Nodos	Mayores Niveles de Pérdidas Ohmicas y dieléctricas.	$\sqrt{\sum (V_h)^2} \leq 10\%$
Computadoras	Problemas operacionales por e.j. Torque pulsante en los motores de accionamiento de memoria.	$\sum (V_h) \leq 7\%$ $\sqrt{\sum (V_h)^2} \leq 5\%$ ( c.f. fabricantes)
Puentes Rectificadores	Disparo Intempestivo	$V_h \leq 5\%$ $\sqrt{\sum V_h^2} \leq 10\%$
Reles de Telecomando	Fallas en la precisión.	$V_3 < 7\%$ , $V_4 < 15\%$ $V_5 < 8\%$
Medidores de Energía a Inducción	Compromete la Calidad de la Precisión	Indeterminado
Capacitores de Potencia	- Mayor nivel de Calentamiento - Pérdida de vida útil	$\sum h.V_h^2 \leq 44\%$

TABLA 2.1 Efecto de las distorsiones armónicas

- 1.-Se deberá tener presente la distinción entre líneas corta y línea largas, a fin de obtener una mayor exactitud. Si uno adopta la limitación de banda 60-1380 hertz, es aproximadamente 10 Km.
- 2.-Impedancias paralelo en barras de carga, por ejemplo: reactores y capacitores paralelos, capacitores en las líneas, etc. Es importante considerar estos efectos para realizar el estudio del flujo de potencia armónico. Generalmente estas impedancias paralelo son capacitivas, su impedancia varía inversamente con el orden del armónico, es decir que al incrementar la frecuencia disminuye la impedancia.

#### 2.4.-RESONANCIA.

El tema resonancia es de especial importancia en el estudio de la calidad de la energía, debido a que problemas de la calidad de la energía relacionados a los armónicos pueden estar basados en la resonancia o condiciones cercanas a la resonancia. El término resonancia se define como una condición de operación en la cual la magnitud de la impedancia del circuito pasa por un extremo (e.j. un máximo o un mínimo). Por ejemplo un simple circuito L.C en serie tiene la siguiente impedancia.

$$Z(\omega) = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (\text{Ohm}) \quad (70)$$

La magnitud de esta función tiene un mínimo en  $|Z| = 0$ .

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (71)$$

Un extremo (máximo) ocurre también cuando  $\omega \rightarrow \infty$

La terminología resonancia en serie y paralelo se refiere a los valores extremos de la función impedancia, cuando la función impedancia pasa a través de un mínimo la resonancia en serie se lleva a cabo, cuando la función impedancia pasa a través de un máximo se dice que la resonancia en paralelo se lleva a cabo o ocurre.

TIPO	IMPEDANCIA RESONANTE	ADMITANCIA A RESONANTE	POLO/CERO DE IMPEDANCIA DE UN CIRCUITO L.C. SIMPLE	FRECUENCIA
SERIE	MINIMO	MAXIMO	CERO PARA CIRCUITOS L.C. SERIE	PARA CIRCUITOS L.C. SERIE $\sqrt{L.C}$
PARALELO	MAXIMO	MINIMO	POLO PARA CIRCUITO LC PARALELO	PARA CIRCUITO LC PARALELO $1/\sqrt{L.C}$

**TABLA 2.2 Resonancia en serie y paralelo**

La búsqueda de condiciones de resonancia se suma a la búsqueda de la exactitud de la función  $Z(\omega)$ , el tipo de estudio más usual involucra a la función  $Z(\omega)$  en el punto de driving en una barra, de cualquier forma es posible que ocurran condiciones de resonancia en las impedancias de transferencia. En cualquier caso los valores extremos de la función impedancia y de la frecuencia que causan estos extremos (la frecuencia resonante), pueden ser difíciles de encontrar o calcular. Un método es calcular la impedancia (e.j la impedancia del punto de driving) para un rango de frecuencias y simplemente buscar los valores para un máximo o un mínimo de  $|Z(\omega)|$ . Otro método es examinar la función impedancia de fase cuando el ángulo de fase pase a través de un cero (e.j cuando la impedancia es puramente real), una resonancia puede ocurrir.

La característica de frecuencia de una impedancia, es denominada ocasionalmente como una búsqueda de frecuencia.

La siguiente discusión está en el contexto de una función impedancia para la cual la frecuencia se permite que se barra a través de un amplio rango de valores. Las

frecuencias que causan resonancia son aquellas que causan valores extremos en la magnitud de la impedancia. De cualquier forma en algunos sistemas de potencia la frecuencia es fija y el parámetro que puede ser cambiado es la capacitancia, por e.j. la clasificación por tamaño de un capacitor en paralelo, el capacitor será escogido de un rango de valores. Los valores de  $C$  que causen un valor extremo de la impedancia del punto de driving de la barra en paralelo con el capacitor, son los valores de  $C$  que van a causar resonancia, así en vez de considerar un barrido de frecuencia  $|Z(\omega)|$ , uno considera a la impedancia como una función de  $C$ , y  $C$  es barrido sobre un rango de valores para examinar el punto de resonancia. Esta clase de estudio se denomina una búsqueda de capacitancia y la información obtenida es diferente al método de búsqueda de frecuencia descrito anteriormente.

El circuito  $RLC$  en serie simple descrito en la figura 2.3 será analizado para puntos de resonancia, en este la impedancia en serie es:

$$z(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (\text{Ohm}) \quad (72)$$

La magnitud de esta función es:

$$|z(\omega)| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (\text{Ohm}) \quad (73)$$

La magnitud y la fase están dibujadas en la fig. 2.4. Note que la fase es cero en la resonancia si  $R=0$  se obtendrá la característica mostrada en la fig 2.5. La fig. 2.6 muestra la función impedancia dibujada para una frecuencia fija ( en este caso  $\omega = \omega I$ ), en este diagrama  $C$  se permite que sea variante. En el método de búsqueda de capacitancia el rango de valores de la magnitud y de la fase son diferentes al método de búsqueda de la frecuencia. Esto es debido porque la frecuencia fija en el método

de búsqueda de capacitancia no puede ser una frecuencia resonante, y la magnitud y fase para un alto (bajo)  $C$  no corresponde a la magnitud y fase para un alto (bajo)  $w$ .

En el siguiente ejemplo se analiza la búsqueda de frecuencia y capacitancia para un circuito  $RLC$  paralelo simple (fig. 2.7)

- Los resultados son similares como aquellos como el caso de circuito en serie (ver fig. 2.8 y 2.9), el método de la búsqueda de capacitancia se hace para la frecuencia fija  $w_1$ , note que las características de capacitancia y frecuencia son diferentes en general. La característica de la fase cruza por cero en la resonancia en ambos casos. La red mostrada en la figura 2.10 va a ser estudiada. La barra 1 representa la conexión a un sistema externo y su impedancia equivalente es  $0.01 + j0.01h$  al armónico  $h$  a la frecuencia fundamental  $w_0$ , las impedancia de línea son mostradas en función de la frecuencia donde  $(hw_0)$  es la frecuencia de operación. Un capacitor en paralelo esta localizado en la barra 2. Se desea localizar un segundo capacitor en paralelo en la barra 3 y se desea buscar la capacitancia y la frecuencia para la impedancia del punto de driving para la barra 3.

La frecuencia buscada de la red como esta vista en la barra 3 se muestra en la fig. 2.11. Se nota una resonancia en  $4.55w_0$ , donde la magnitud de la impedancia se eleva sobre 18 veces la magnitud de la impedancia en la frecuencia fundamental ( $h = 1$ ). La característica de fase muestra una fase cero en el resonante, Para esta parte del estudio el capacitor esta fijo de tal forma que la impedancia en la frecuencia fundamental es  $-j1$ . La fig. 2.12 muestra la magnitud y fase para la barra 3 con el método de búsqueda de capacitancia a medida que el capacitor varia, en esta parte del estudio la frecuencia esta fija en la frecuencia fundamental ( $h = 1$ ).

La información contenida en estos gráficos es diferente, el método de la búsqueda de la frecuencia muestra que hay una resonancia entre el cuarto y el quinto armónico. El método de la búsqueda de capacitancia muestra la proximidad del diseño a la resonancia localizada a  $C = 20.2/w_0$ , de esta característica se denota que la impedancia en la barra 3 es insensible al valor del capacitor en paralelo (en la barra 3) cerca del valor propuesto de  $C = 1/w_0$ .



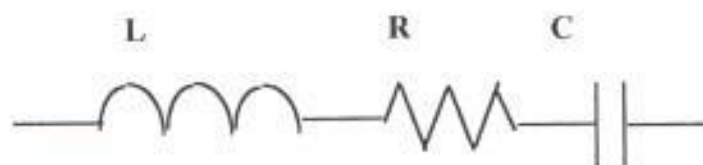


FIG: 2.3 Circuito RLC serie

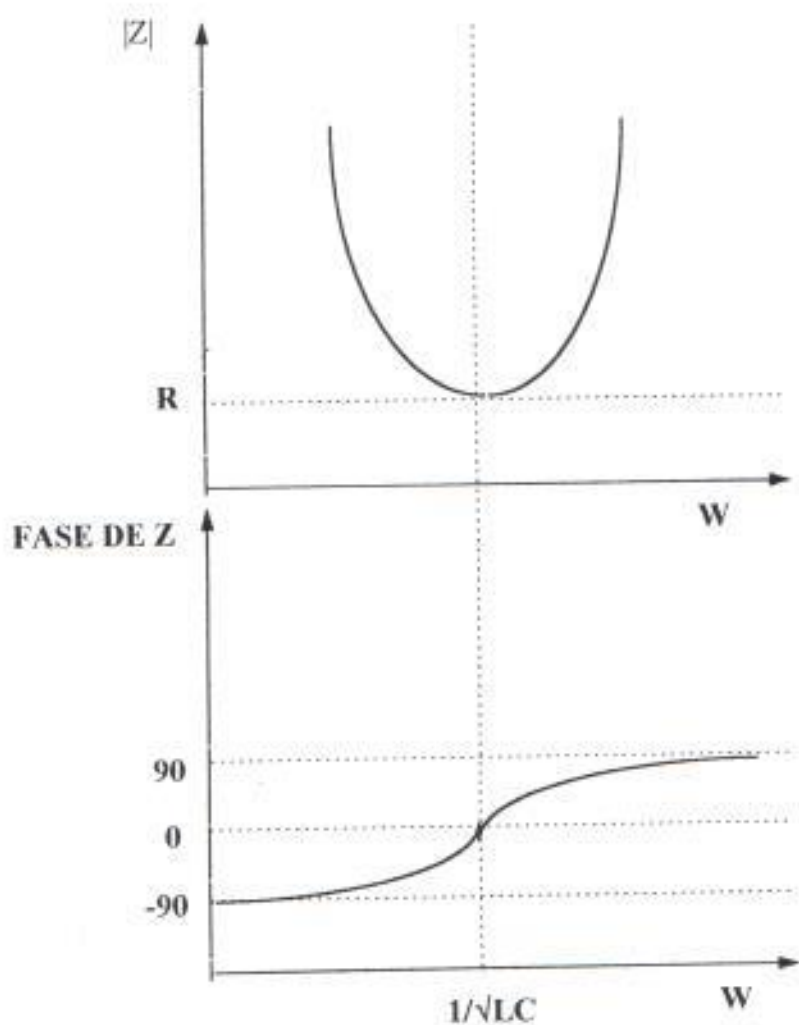
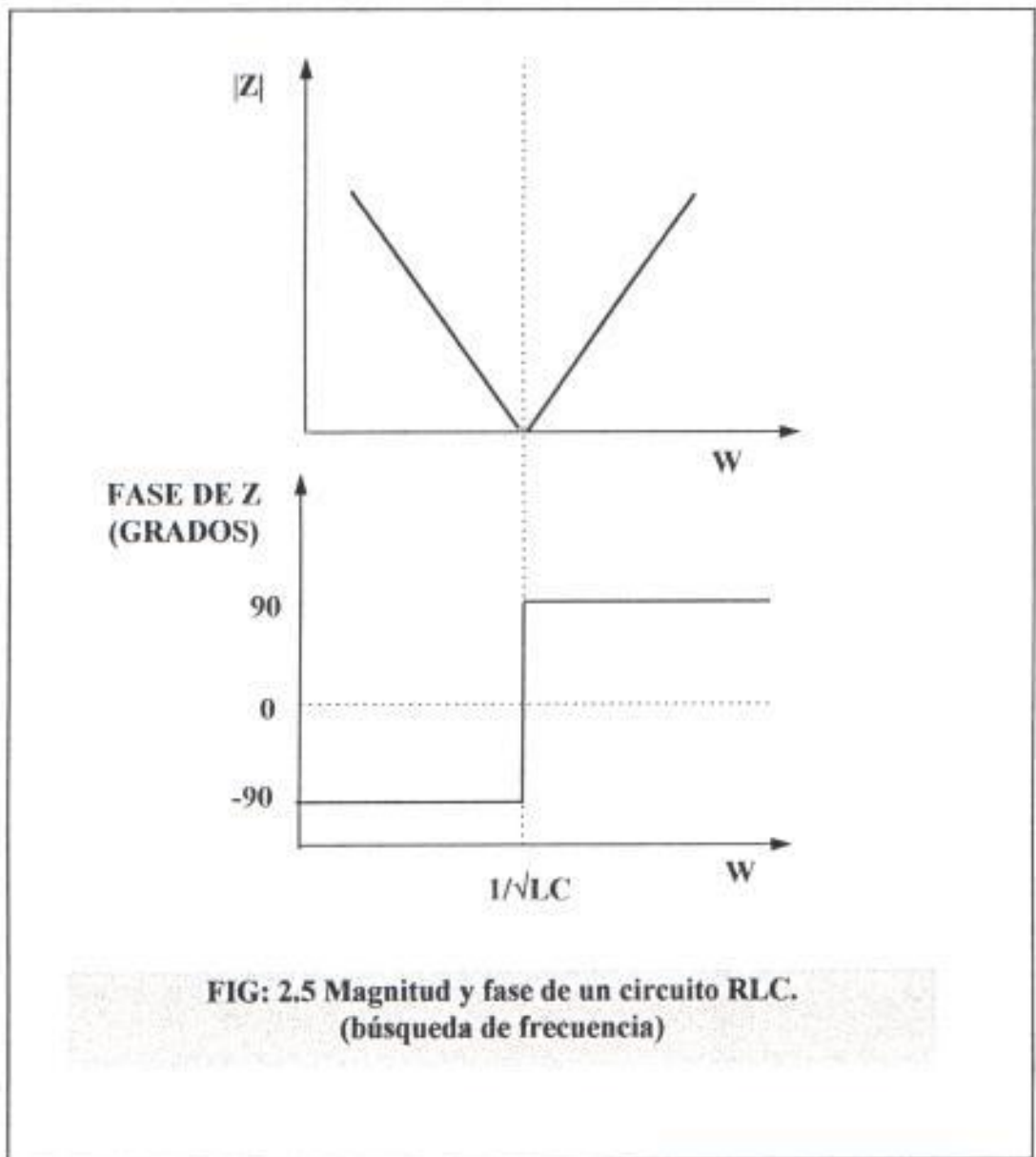


FIG: 2.4 Magnitud y fase de un circuito RLC (Búsqueda de frecuencia)

### Resonancia en transformadores

Supongamos que un transformador en una subestación alimenta una carga no lineal, un banco de capacitores y otras cargas. Dos tipos de resonancia armónica pueden ocurrir.



**FIG: 2.5 Magnitud y fase de un circuito RLC.  
(búsqueda de frecuencia)**

El primer tipo considerado el más común es la resonancia de primera especie involucrando al banco de capacitores y la reactancia de dispersión del transformador y la reactancia del sistema.

El armónico que probablemente sea el causante del problema de resonancia es calculado mediante la expresión:

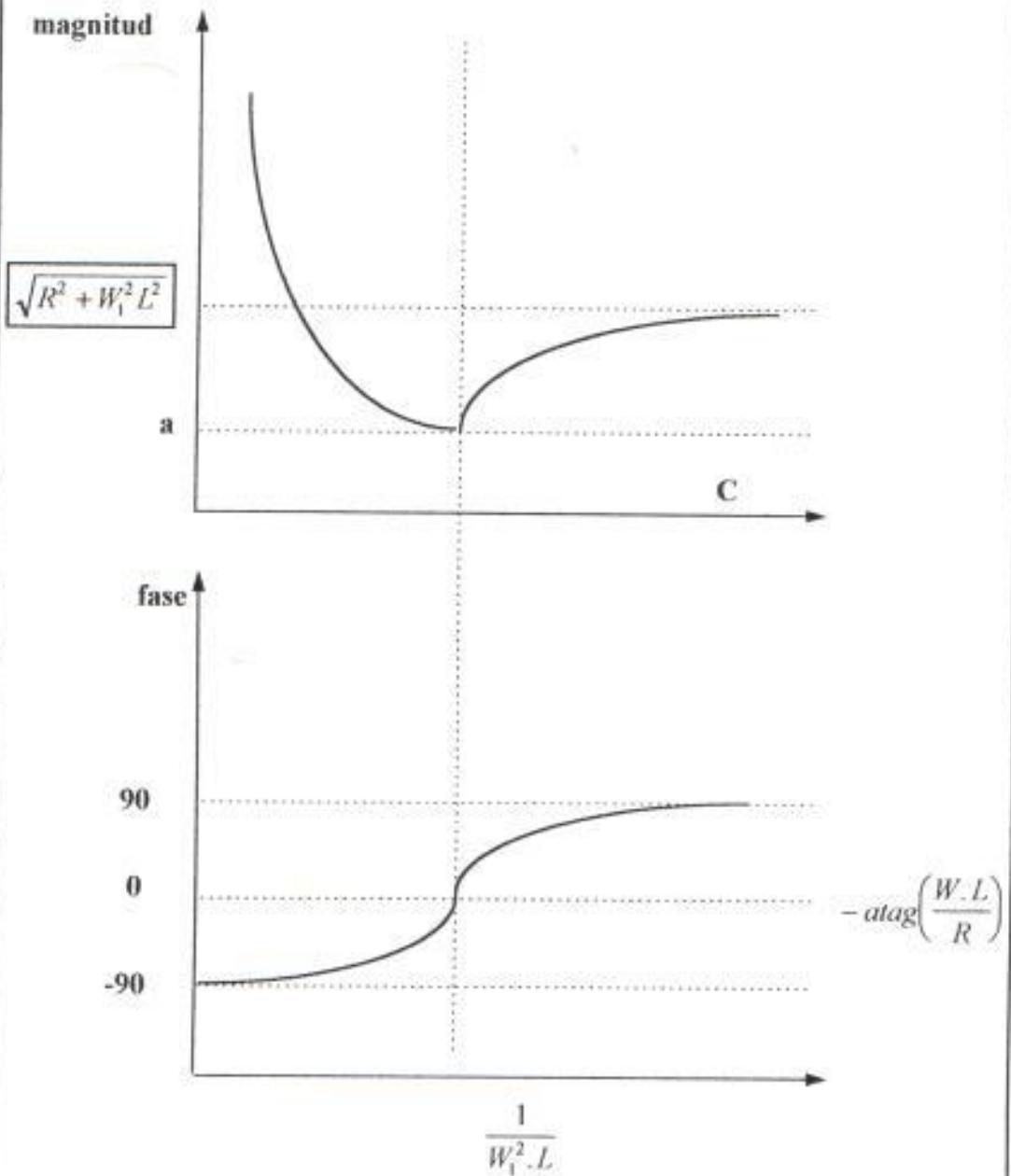
$$n = \sqrt{\frac{S_T S_K}{Q_c (S_T + z S_K)}} \quad (74)$$

donde  $S_T$  es la potencia trifásica del transformador;  $S_K$  el nivel de cortocircuito trifásico en el primario,  $Q_c$  la potencia del banco de capacitores y  $Z$  la impedancia del transformador en por unidad. En algunos casos el nivel de cortocircuito poco influye en los resultados.

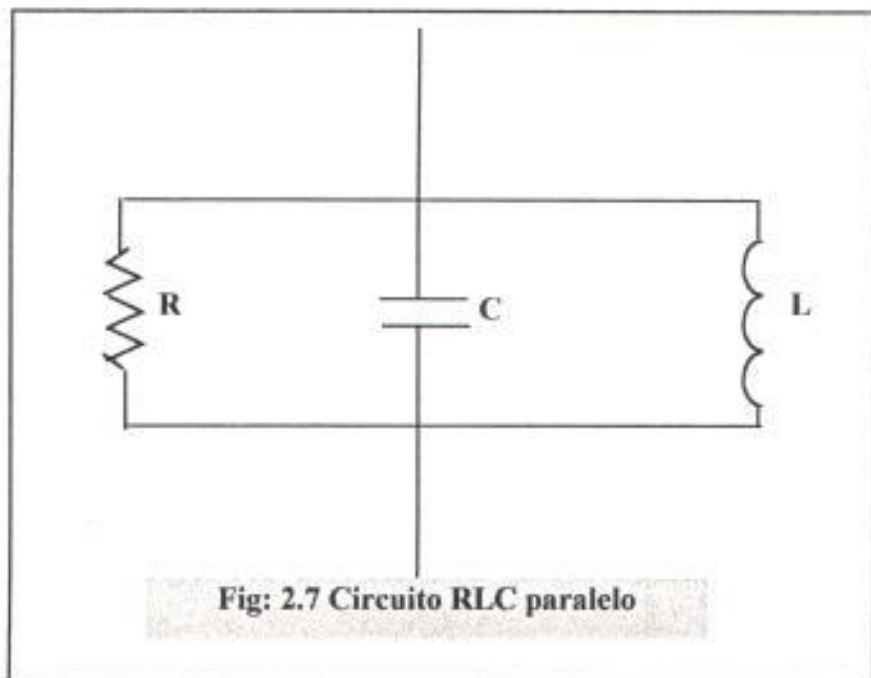
El segundo circuito resonante involucra a la reactancia de magnetización, a la reactancia de dispersión de el transformador y el banco de capacitores. Se trata de la llamada resonancia de "segunda especie" que es extinguida cuando

$$n = \sqrt{\frac{S_T I_m}{Q_c}} \quad (75)$$

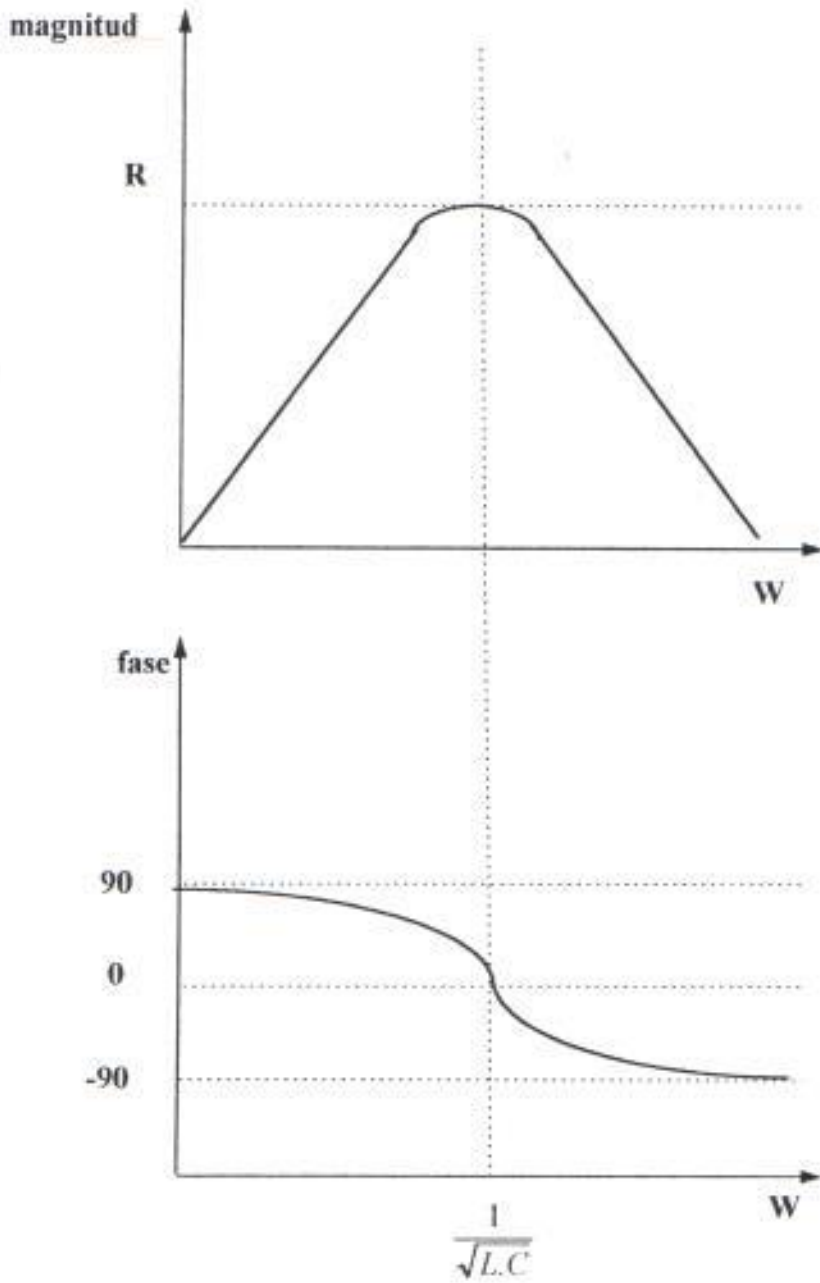
donde  $I_m$  es la corriente magnetizante del transformador en por unidad. este tipo de resonancia ocurre solamente para pequeños valores de  $Q_c$  e indica el menor valor seguro para un capacitor en el secundario.



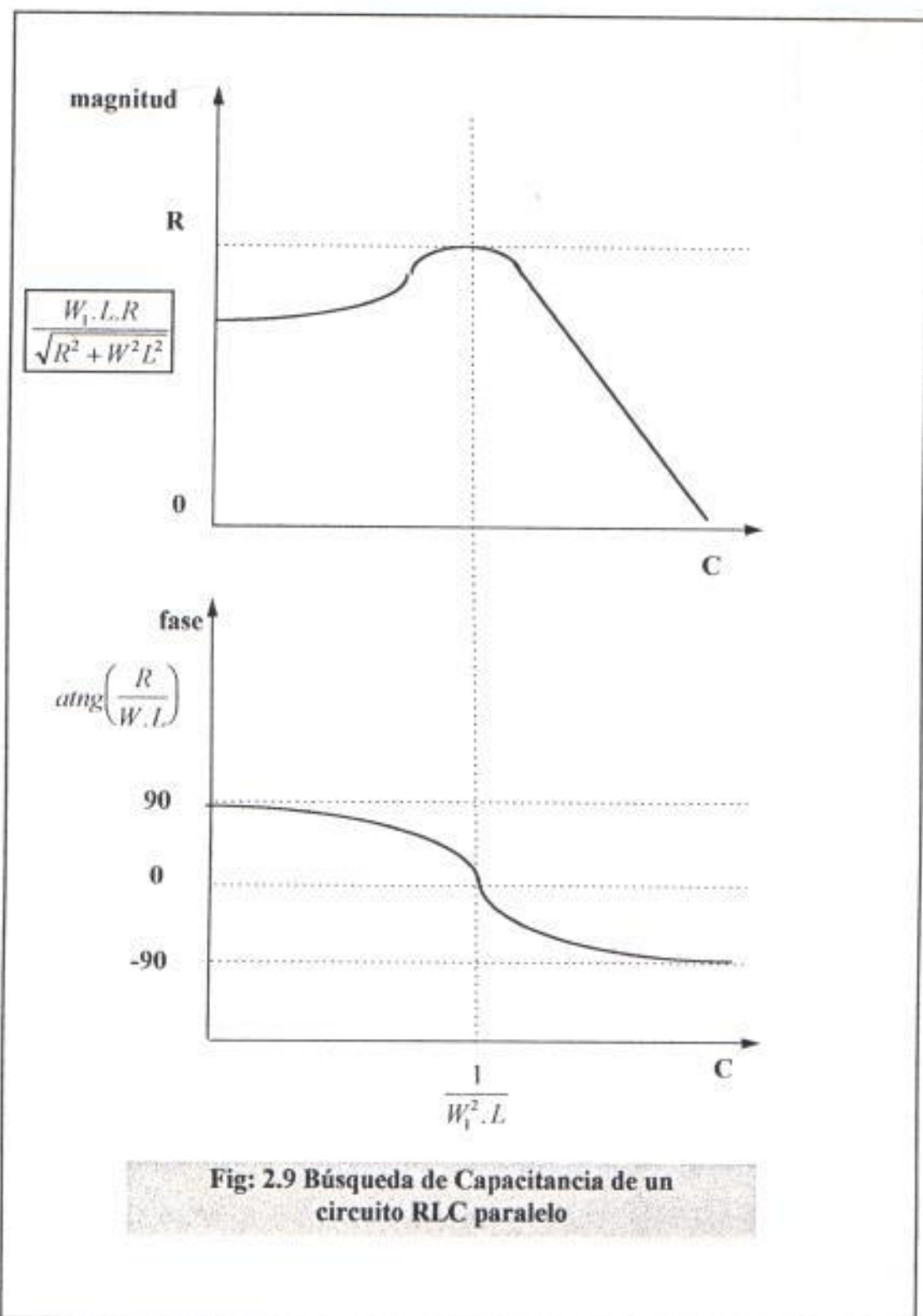
**Fig: 2.6 Magnitud y fase de un circuito RLC serie  
(Búsqueda de capacitancia)**



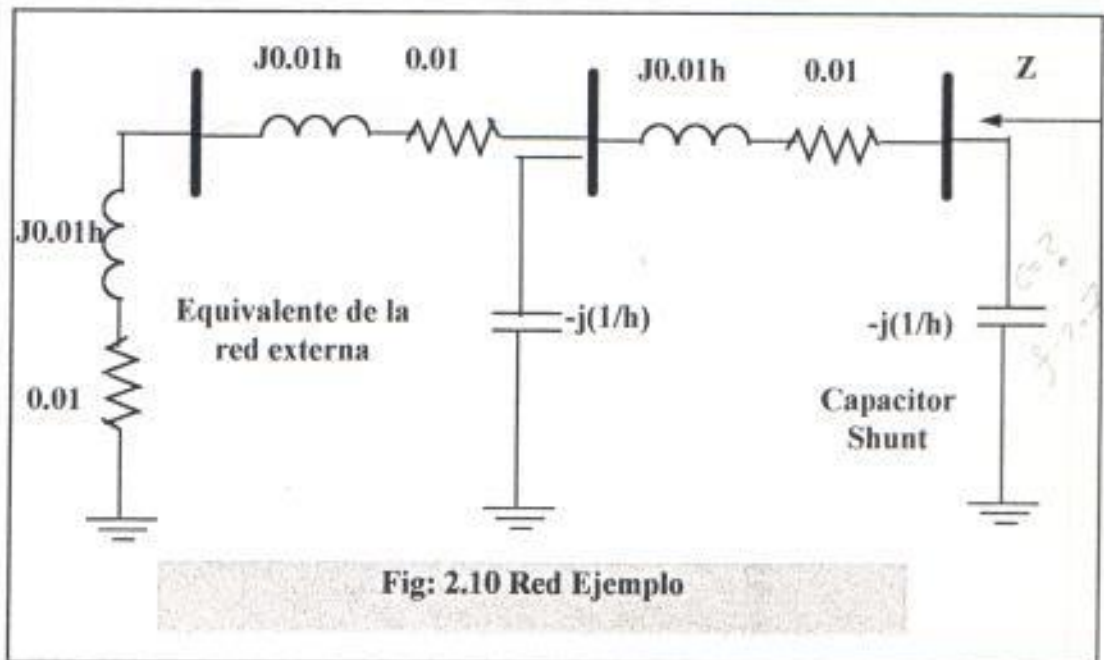
**Fig: 2.7 Circuito RLC paralelo**



**Fig: 2.8 Búsqueda de Frecuencia de un circuito RLC paralelo**



**Fig: 2.9** Búsqueda de Capacitancia de un circuito RLC paralelo

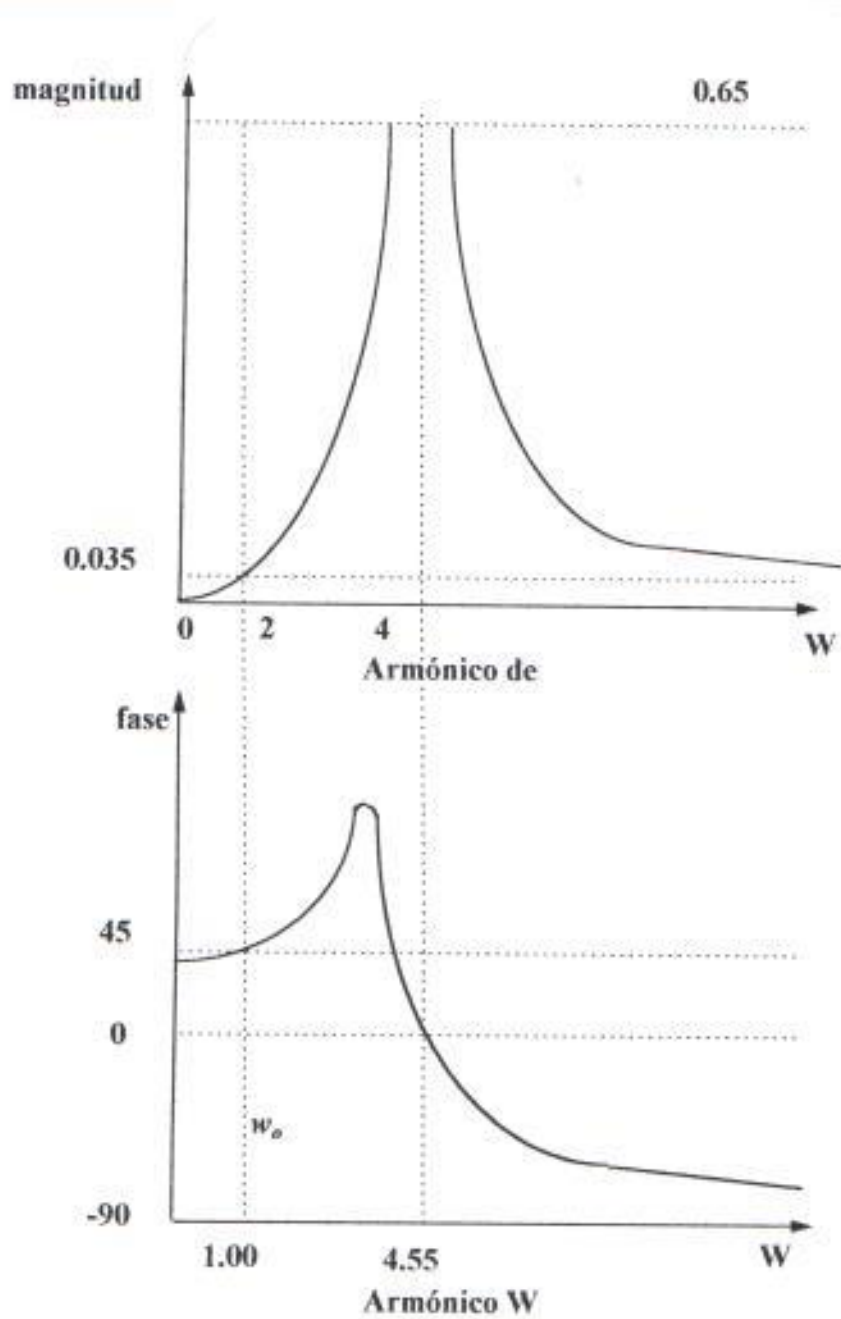


## 2.5.-ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA IMPEDANCIA - FRECUENCIA COMO UNA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD " Q "

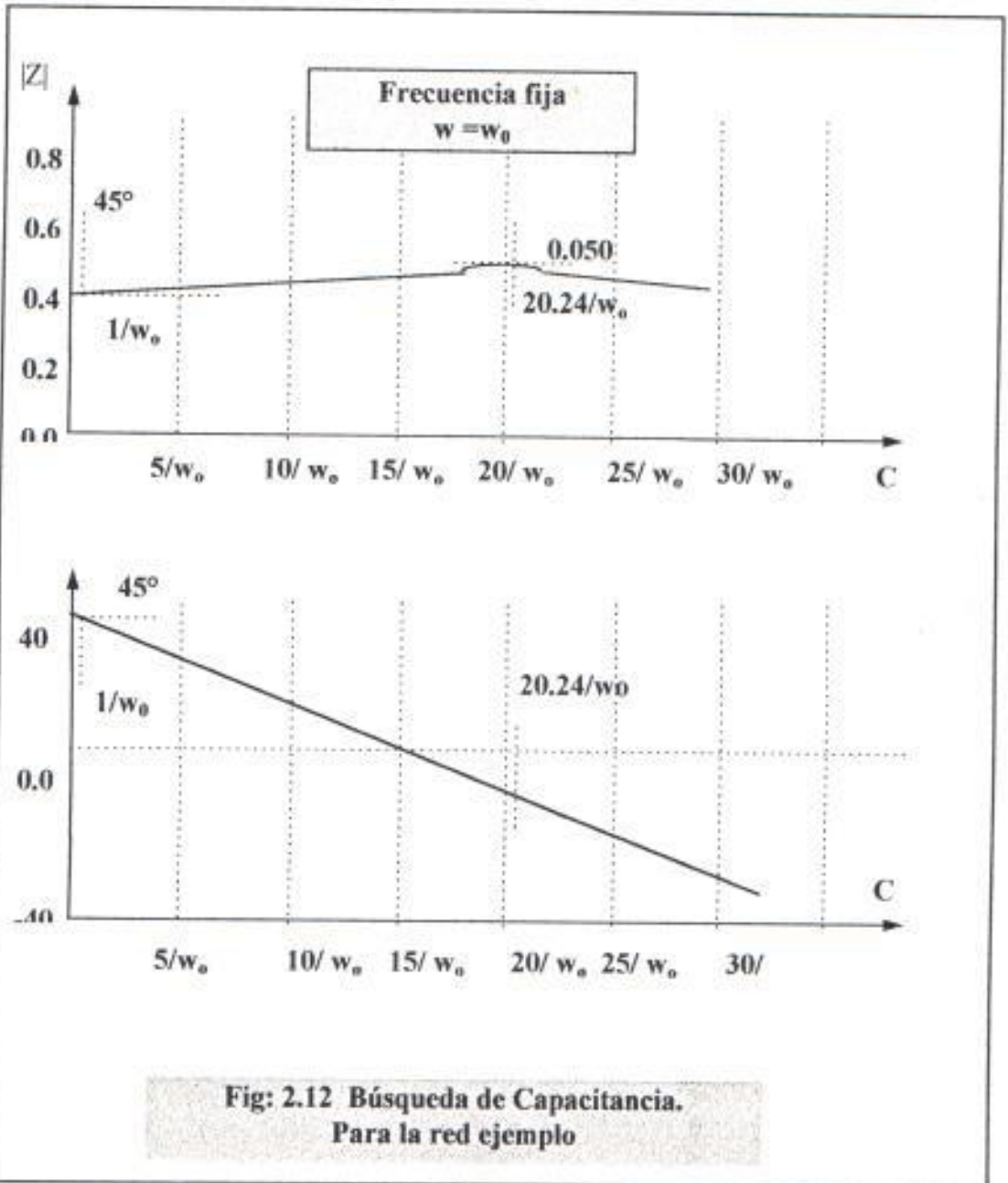
La condición de resonancia de una red se da cuando la impedancia de la red es puramente resistiva, luego se tendrá condición de resonancia cuando la tensión y la corriente en los terminales de entrada están en fase, produciéndose la respuesta de amplitud máxima.

La impedancia equivalente que ve la fuente armónica desde la barra a la cual está conectado, esta impedancia variará con la frecuencia, obteniéndose de esta manera una característica de impedancia equivalente vs frecuencia. Es necesario recordar que los equipos rectificadores, deberán considerarse como verdaderas fuentes de corriente. Esta característica, tiene un pico que depende exclusivamente del valor de la resistencia del reactor sintonizado a la frecuencia que se produce la condición resonante. El ancho de esta curva o la pendiente de sus lados depende también de los valores de los otros elementos. El ancho de esta curva, se la llama más cuidadosamente como ANCHO DE BANDA, será expresado en términos de otro parámetro muy importante, este parámetro es llamado "factor de calidad".





**Fig: 2.11 Búsqueda de Frecuencia  
para la red ejemplo**



Es necesario hacer notar de que la agudeza de la curva característica de un circuito resonante, esta determinado por la máxima cantidad de energía que puede almacenarse en el circuito, en comparación con la energía que se pierde durante un periodo completo de la respuesta, así pues, se puede definir "Q" como:

$$Q = 2\pi * \frac{\text{Maxima energía almacenada}}{\text{Energía total perdida en el periodo}} \quad (76)$$

Una relación muy útil para obtener el factor "Q" es:

$$Q = \frac{2\pi * f_o L}{R} = \frac{1}{2\pi * f_o CR} \quad (77)$$

La expresión 77 indica el método físico de obtener el factor de calidad como función de la reactancia inductiva y la resistencia ó la reactancia capacitiva y la resistencia, ambas a la frecuencias fundamental  $f_o$  (60 herz).

Los circuitos que poseen un elevado factor de calidad, tienen un ancho de banda menor, es decir poseen mayor selectividad de frecuencia o mayor calidad. Hay que tener mucho cuidado al realizar la selección de "Q". Una característica importante que merece ser destacada es de que al producirse resonancia paralelo, la impedancia equivalente tiene un valor elevado al flujo de la corriente cuya frecuencia corresponde al frecuencia de resonancia. La condición de resonancia paralelo puede producir la oscilación de elevadas corrientes que son excitadas por la corriente de frecuencia resonante. Estas corrientes fluyendo a través de las impedancias de los sistemas de potencia, producen elevados voltajes armónicos, los cuales sumados a los voltajes de frecuencia fundamental producen formas de onda de voltaje distorsionadas. Esta distorsión produce que las corrientes armónicas fluyan al resto del sistema.

La solución sería realizar un estudio de las características impedancia vs frecuencia, analizar la frecuencia a la cual se produce la condición de resonancia paralelo (elevada impedancia equivalente), Luego realizar un diseño de filtros previo con un factor de calidad nulo (ideal); a continuación realizar un nuevo estudio de la característica impedancia vs frecuencia y luego comenzar a variar el factor de calidad del reactor sintonizado o de todos los reactores sintonizados si acaso fue necesario utilizar varios filtros. En cada caso se analiza la característica de impedancia equivalente vs frecuencia. finalmente se selecciona la característica mas funcional.

## 2.6.-RESPUESTA DE UN SISTEMA REAL.

Una vez que se ha entendido todo el fenómeno referente a las señales armónicas en los sistemas de potencia, es necesario realizar un análisis del mismo para conocer como reaccionara el sistema de potencia a corrientes de diferentes frecuencias.

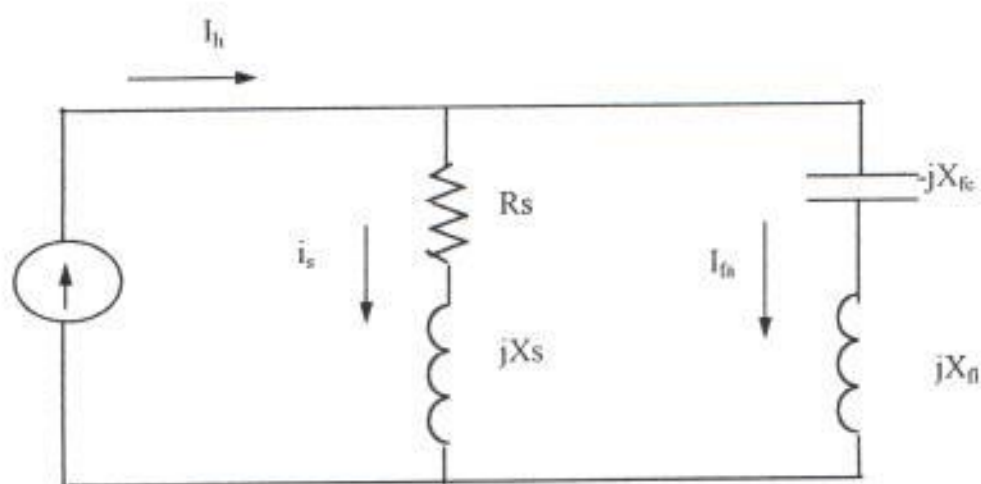
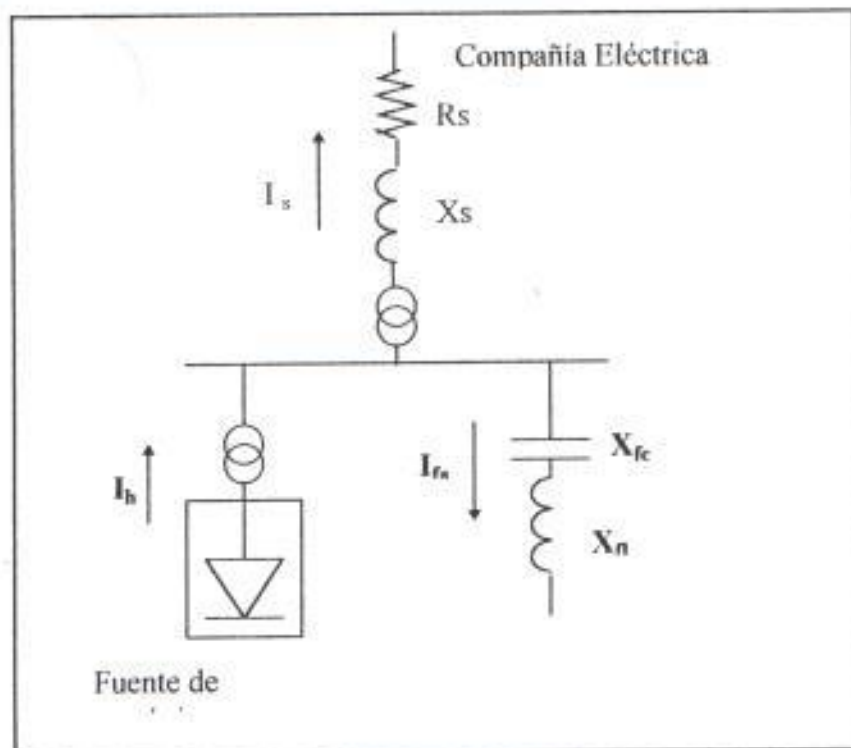
Para la mayoría de los sistemas industriales, el diagrama unifilar puede ser reducido al mostrado en la fig 2.13, el análisis se realizo, definiendo algunos términos básicos y ciertas relaciones de impedancia tales como:

**ZMAG** Es la impedancia equivalente que ve la fuente armónica conectada en la barra A. Se debe considerar a los rectificadores como fuentes de corriente generadoras de armónicas.

**ZANG** Es el ángulo de la impedancia ZMAG

$\delta_s$  Es la corriente en por unidad de la fundamental que fluye hacia el sistema.

$\delta_f$  Es la corriente en por unidad de la fundamental que fluye hacia el sistemas de filtros o al banco de capacitores.



**Fig: 2.13 Diagrama unifilar que contiene fuente de armónicos y su correspondiente circuito equivalente**

$$i_h = i_s + i_{fs}$$

$$i_s = \delta_s * i_h$$

$$i_{fs} = \delta_f * i_h$$

$$1 = \delta_s + \delta_f$$

$$\delta_s = \frac{Z_{fs}}{Z_s + Z_{fs}}$$

$$\delta_f = \frac{Z_s}{Z_s + Z_{fs}} \quad (78)$$

Si el factor de distribución  $\delta_s$  es grande una frecuencia armónica particular coincidente con una de las armónicas generadas por la fuente de armónicas, entonces la amplificación de la corriente armónica ocurrirá y las corrientes que fluyen hacia el capacitor y hacia el sistema (fuente), pueden ser excesivas. Cuando se tiene la condición de que  $Z_s + Z_{fs} \rightarrow 0$  a una misma frecuencia, el sistema está en resonancia a esa frecuencia. Es decir que para evitar esas condiciones se deberá tener un valor bajo de  $\delta_s$  a esas frecuencias.

En conclusión, la función de un reactor sintonizado es la de producir un escape a toda esa corriente elevada, haciéndose un conjunto con el capacitor, un cortocircuito virtual a esas frecuencias, comportándose como una verdadera trampa de señales armónicas.

Un ejemplo numérico mostrara, como estas relaciones dejan suficiente información para conocer la performance de un filtro sintonizado.

Los parámetros asumidos son:

Voltaje en la barra A = 13.8KV

MVA de cortocircuito del sistema = 476

MVAR del capacitor = 19.04

$X_s/R_s = 10$ .

Se debe tener presente el comportamiento de la reactancia inductiva, la cual es proporcional a la frecuencia, y la reactancia capacitiva la cual es inversamente proporcional a la frecuencia. Por lo tanto se tiene:

$$X_s = \frac{h(13.8)^2}{476} = 0.4h$$

$$X_c = \frac{(13.8)^2}{19.04h} = \frac{10}{h}$$

$$R_s = \frac{X_s}{10} = 0.04h$$

Además el factor de distribución  $\delta_f$  esta dado por :

$$\delta_f = \frac{0.04 + j0.4}{0.04 + j\left(0.4 - \frac{10}{h^2}\right)}$$

Los factores de distribución  $\delta_s$  y  $\delta_f$  son graficados y mostrados en la fig 2.14 para el caso de filtro no sintonizado. Se puede apreciar que la resonancia se produce en la quinta armónica, Luego es necesario eliminar esta condición instalando un reactor sintonizado a esta frecuencia. La reactancia de este reactor a la frecuencia fundamental es:

$$X_{R'} = \frac{X_{R'}}{S^2} = \frac{10}{25} = 0.4$$

Ahora el factor de distribución  $\delta_f$ , cambiara por existir la presencia del reactor, sintonizado a la frecuencia de 300 Hz., luego el factor de distribución  $\delta_f$  estará dado por:

$$\delta_f = \frac{0.04 + j0.4}{0.04 + j\left(0.8 - \frac{10}{h^2}\right)}$$

Para la obtención del factor de distribución  $\delta_f$ , se aplicara la expresión 78. Las gráficas de los factores de distribución  $\delta_s$  y  $\delta_f$  se muestran en la fig 2.15, en la cual se considera la instalación del reactor sintonizado a la quinta armónica.

Puede notarse en la fig 2.15 que a la quinta armónica el valor de  $\delta_f$  es igual a la unidad y el valor de  $\delta_s$  es igual a cero. Al instalar el reactor el cual se encuentra sintonizado a la quinta armónica, el valor del factor de distribución  $\delta_f$  tiene su valor máximo a un armónico de orden bajo, cercano a 3.54.

Además se puede apreciar claramente que la relación de los factores de distribución  $\delta_f/\delta_s$  se reduce a elevadas frecuencias al utilizar el reactor sintonizado, por este motivo a veces es necesario utilizar un filtro paso alto conectado en paralelo con el filtro sintonizado que se menciona anteriormente. Para sistemas grandes es necesario realizar un flujo de carga para ver si se han producido sobrevoltajes.



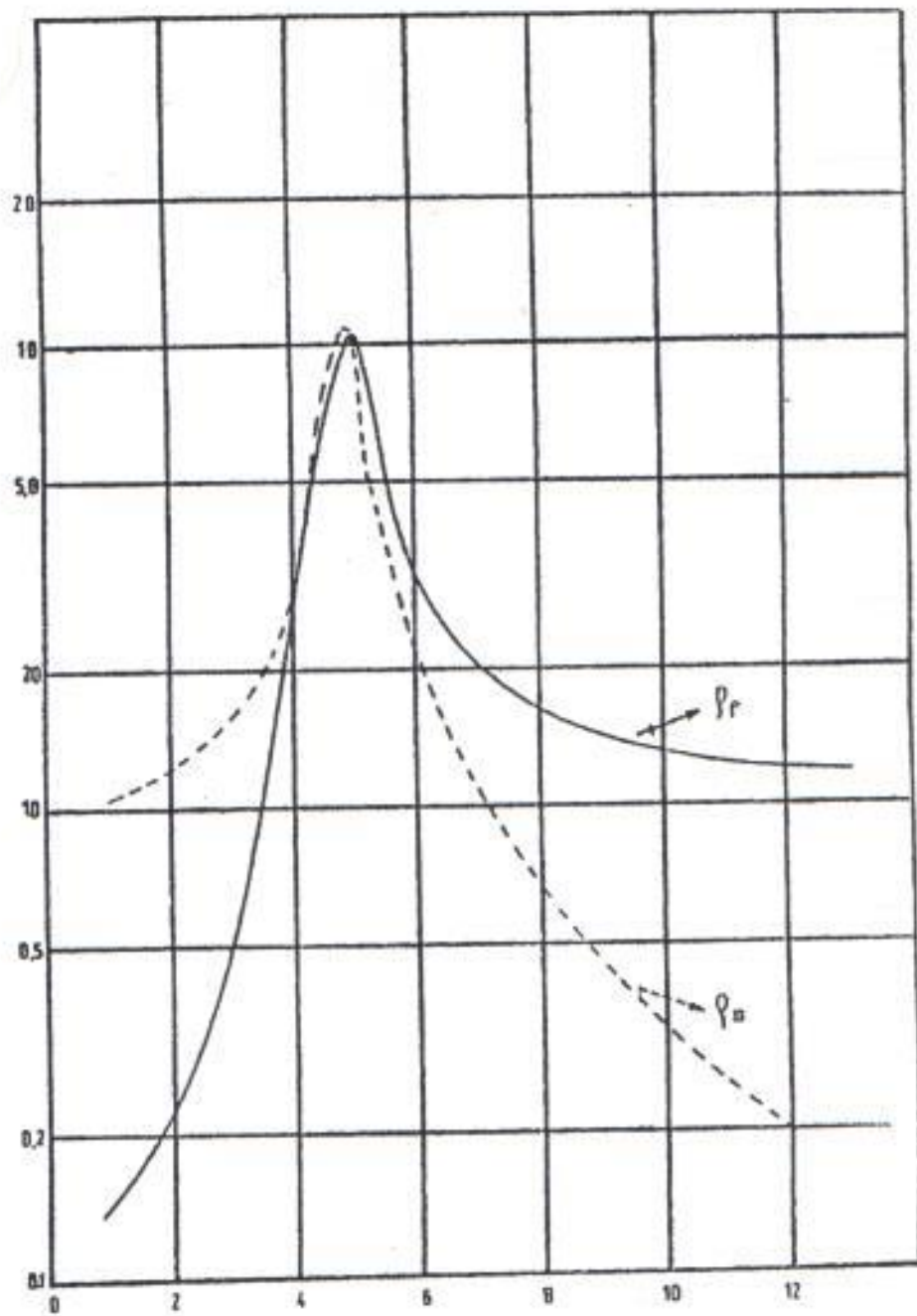


Fig: 2.14 Factor de distribución de corriente armónica versus el orden armónico (Sin el reactor sintonizado)

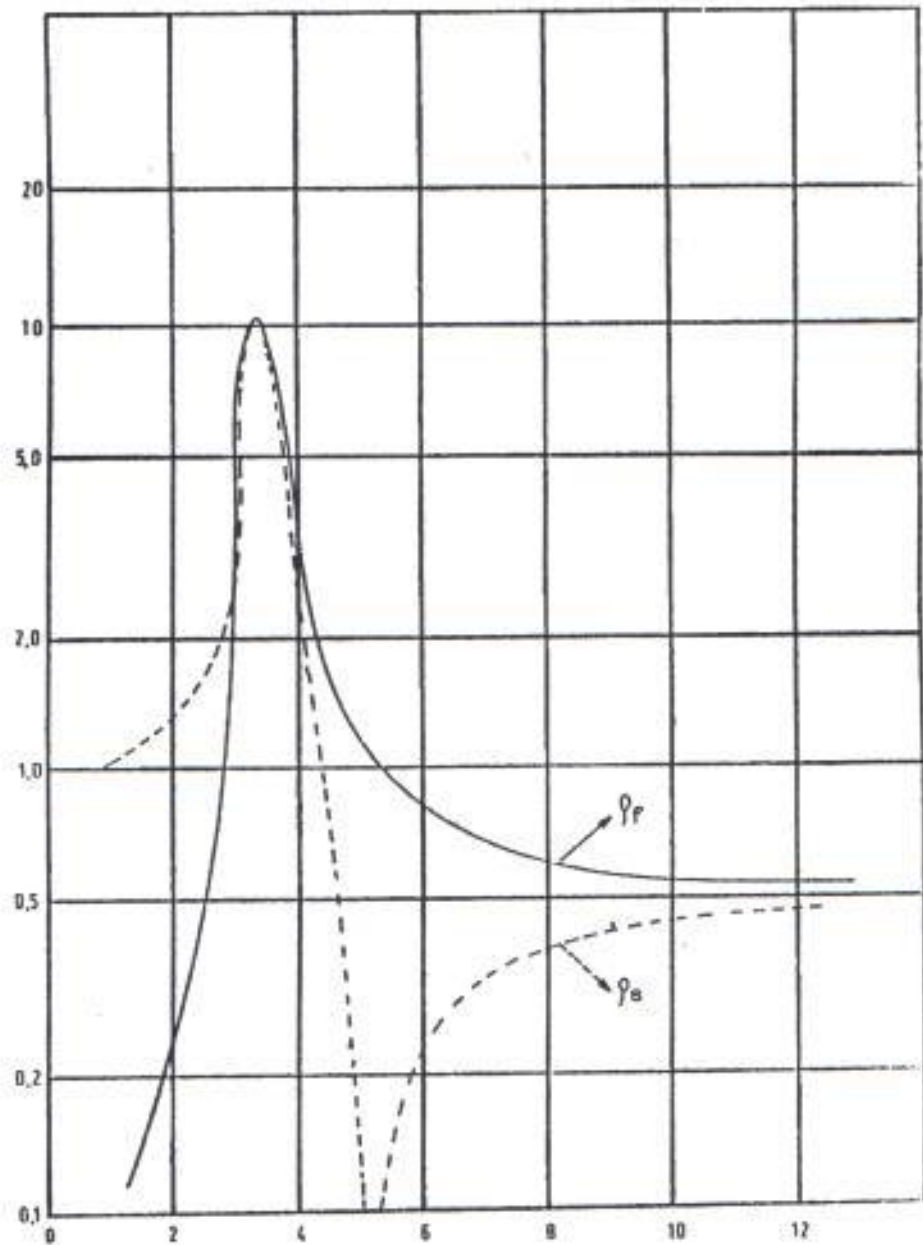


Fig: 2.15 Factor de distribución de corriente armónico versus orden armónico.(Con el reactor sintonizado)

## CAPITULO III

### MEDICIONES Y ESTANDARES PARA EL ANALISIS DE ARMONICOS

#### 3.1-INTRODUCCION

La proliferación de equipos causantes de perturbaciones es una preocupación creciente como sus efectos, llevan a la necesidad de establecer criterios y procedimientos que posibiliten la convivencia armoniosa entre los equipos perturbadores y equipos sensibles a las perturbaciones de tensión

Este capítulo establece criterio y procedimientos para la evaluación y control de las perturbaciones causadas por las cargas de comportamiento no-lineal que provocan distorsiones en la forma de las ondas de tensión y de corriente.

Estos criterios y procedimientos suministran elementos que permiten a las empresas de energía evaluar la calidad del servicio con respecto de los niveles de distorsiones armónicas, controlar las perturbaciones causadas por las cargas no lineales en operación y cuantificar el impacto de la instalación u ampliación de cargas generadoras de armónicos en el horizonte planeado, identificando la necesidad de medidas correctivas. Además de esto, posibilita a los consumidores adecuar sus equipos y sistemas de proceso al patrón de servicio garantizado por la empresa.

También estas recomendaciones pueden servir como orientación a los consumidores y a los fabricantes de los equipos electro- electrónicos, para que no sean producidos o utilizando dispositivos o procesos excesivamente causantes o excesivamente sensibles a las perturbaciones.

La base para estos criterios y procedimientos son los siguientes:

- 1.-Establecer un conjunto simple y coherente de recomendaciones de forma que su aplicación sea conveniente desde el punto de vista práctico.
- 2.-Limitar los efectos de las perturbaciones dentro de niveles aceptables, de forma

que garantiza a los usuarios el suministro de energía de calidad satisfactoria a sus necesidades.

- 3.-Establecer criterios y procedimiento que puedan ser aplicados en las etapas de planeamiento y de operación de las empresas eléctricas y consumidores en la evaluación de cargas especiales.

Es importante indicar que los criterios como los procedimientos de aplicación aquí recomendados son necesariamente basados en algunas hipótesis simplificadoras del modelaje del fenómeno. de esa forma no ha de garantizar que la aplicación de estas recomendaciones sea suficiente para evitar el surgimiento de algún problema.

Finalmente vale recalcar que estas recomendaciones deben ser utilizadas con flexibilidad y la decisión final sobre la limitación de las perturbaciones causadas por una carga especial es del ingeniero que realiza el estudio.

### 3.2.- DISTORSIONES ARMONICAS.

#### 3.2.1.-DISTORSION ARMONICA TOTAL (THD).

Para la rápida comprensión del concepto de distorsión armónica total, es necesario el conocer la definición de los siguientes términos:

**Tensión o corriente fundamental (V ó I).**- Valor eficaz de la corriente sinusoidal de 60 Hz de la onda distorsionada de tensión o corriente.

**Tensión o corriente armónica de orden h (Vh ó Ih).**- Valor eficaz de la componente sinusoidal de frecuencia ( $60h$  Hz) de la onda distorsionada de tensión o corriente.

En el estudio de la calidad de la Energía Eléctrica, cuando analizamos ondas periódicas de periodo  $T$  (que corresponden a la frecuencia fundamental  $\omega_0$  de  $2\pi/t$  rad/seg ó  $f_0$  de  $1/T$

Hz), la medida más comúnmente utilizada es la Distorsión Armónica Total (THD), que está definida en los términos de la amplitud de los armónicos  $V^{(n)}$  a una frecuencia  $n\omega_0$ .

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2}}{V^{(1)}} \quad (\%) \quad (79)$$

También podemos definir a la distorsión armónica total, como una medida de la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental.

Frecuentemente el THD es expresado en porcentaje. El THD, de ya sea la corriente o el voltaje pueden ser calculado. Para los voltajes trifásicos balanceados se utilizan los voltajes línea neutro en la forma indicada. En el caso desbalanceado habrá un THD para cada fase. El THD tiene la ventaja de ser fácilmente calculado, también tiene la ventaja que está en uso común como una medida rápida de los niveles de distorsión de la cantidad que está en estudio. La desventaja principal es que la información detallada del espectro total nunca es completa.

Ya que esta no es una regla firme, cual debe ser el valor de truncación de la serie infinita que es la definición del THD, Hay ciertas reglas a seguir ( conflictivas ): los estándares ANSI es conservativa y recomienda la truncación de la serie a 5 KHz. Los instrumentos convencionales más prácticos disponibles están limitados al rededor de 1.6 KHz debido a que las corrientes y los voltajes de los transformadores utilizados y debido a la limitación de palabras de la pantallas de los instrumentos.

• Las propiedades del THD están indexadas y sumarizadas como sigue:

- 1.- El THD es cero para la forma perfectamente sinusoidal de onda de voltaje o corriente.
- 2.- A medida que se incrementa la distorsión el THD se vuelve indefinidamente largo.
- 3.- Un valor comúnmente citado del 5%, es frecuentemente usado como la línea divisoria entre la distorsión alta y baja. De cualquier forma este valor debe ser

usado con suma precaución, ya que la distorsión armónica del 5% en los circuitos de transmisión y subtransmisión es usualmente demasiado alto.

4.- Cuando un valor armónico domina el espectro de frecuencias de una señal por encima de  $\omega_0$ , el THD se convierte en  $V^{(h)}/V^{(1)}$ , (donde h es el armónico dominante sobre la frecuencia fundamental).

### 3.22.- INDICE DE DISTORSION ( DIN ).

El índice de distorsión (DIN) es comúnmente utilizado en los estándares y especificaciones fuera de Norte América. La notación DIN (en Alemania), es también referida a los estándares y normas Alemanes.

Se define como:

$$DIN = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (V^{(i)})^2}} \quad (\%) \quad (80)$$

La relación entre el DIN y el THD se encuentra en lo siguiente.

$$DIN^2 = \frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2}{\sum_{i=1}^{\infty} (V^{(i)})^2} \quad (\%) \quad (81)$$

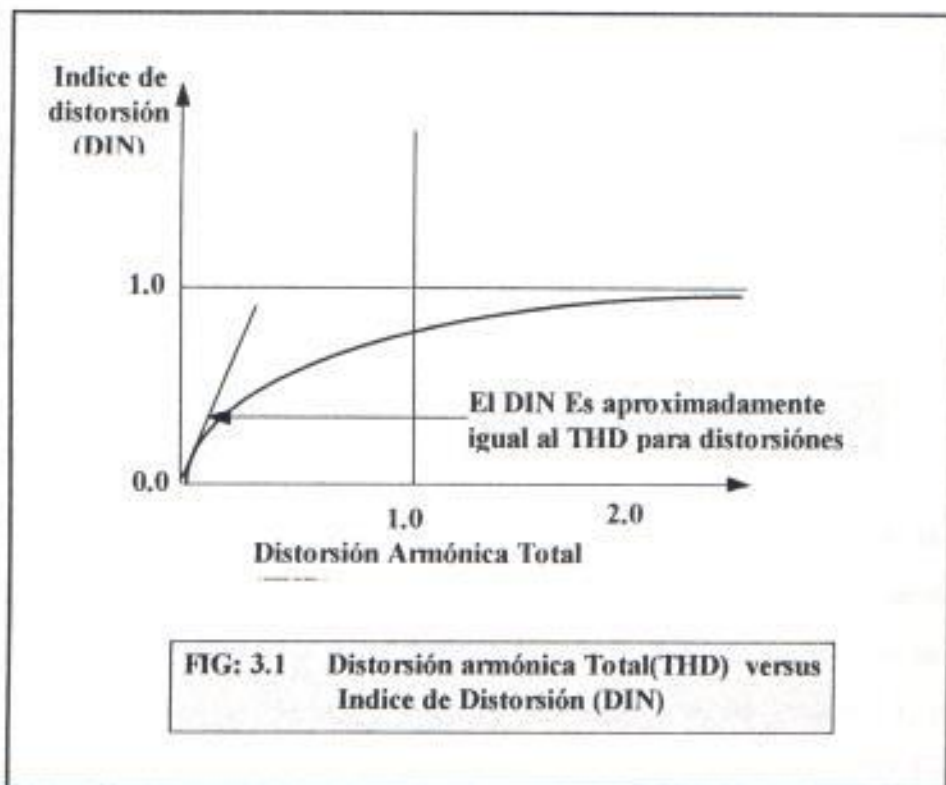
$$= \frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2}{(V^{(1)})^2 + \sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2} \quad (\%) \quad (82)$$

Note que el numerador de la expresión puede ser expresados en términos el THD,

$$DIN^2 = \frac{(V^{(1)})^2 \cdot THD}{(V^{(1)})^2 + \sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2} \quad (\%) \quad (83)$$

Que se convierte después de manipulaciones y sustituciones de la misma relación por el THD dentro del numerador en

$$DIN^2 = \frac{THD}{1 + THD^2} \quad (\%) \quad (84)$$



Donde se encuentran las relaciones deseadas

$$DIN = \frac{THD}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad THD = \frac{DIN}{\sqrt{1 - DIN^2}} \quad (\%) \quad (85)$$

Se concluye que el THD determina el DIN y viceversa, ninguno de los índices tiene

información adicional del espectro de la señal de frecuencia sobre el otro, la única ventaja del uno sobre el otro, es de preferencia personal. Por ejemplo el DIN se vuelve unitario para ondas altamente distorsionadas, mientras que el THD se vuelve infinito.

Algunos ingenieros encuentran estos niveles indicativos más significativos que otros para estas circunstancias. La fig 3.1 ilustra gráficamente la relación entre el DIN y el THD.

Para bajos niveles de distorsión armónica se puede aplicar la expansión de la serie de Taylor para la expresión de la forma  $\frac{1}{(1+\theta)}$  y  $\sqrt{1+\theta}$

$$DIN = THD \left( 1 - \frac{1}{2} THD \right) \quad (\%) \quad (86)$$

Se observa que para distorsiones totales pequeñas el DIN y el THD son aproximadamente iguales.

### 3.3.- INTERFERENCIA TELEFONICA

#### 3.3.1.- FACTOR DE INTERFERENCIA TELEFONICA.

El factor de interferencia telefónica (TIF) es una variación del THD, en donde la raíz de la sumatoria cuadrada es ponderado usando factores (pesos) que reflejan la respuesta del oído humano. Pruebas psicológicas y audiológicas han sido realizadas para evaluar la respuesta del oído humano. Estos han dado los pesos del TIF mostrados en la tabla 3.1; la tabla ha sido revisada algunas veces y los pesos mostrados son los valores de 1965. El TIF también incorpora un factor que refleja la forma en que la corriente de un circuito de potencia induce voltaje en un circuito de comunicaciones adyacente. En otras palabras la prueba realizada para obtener los pesos del TIF incluyen no solamente percepción auditiva humana, sino que también la efectividad de inducción entre circuitos adyacentes. El índice no modela acoplamiento de ninguna forma. Otra diferencia importante entre el TIF y el THD, es que el denominador de la ecuación 2.1,  $V^{(1)}$  está reemplazado por la raíz cuadrada media para el iésimo armónico de 60 Hz. El TIF se define como:



$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (w_i \cdot V^{(i)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (V^{(i)})^2}} \quad (\%) \quad (87)$$

La sumatoria infinita en esta serie esta truncada para uso práctico. La ANSI ESTANDAR 368 recomienda truncación a 5.0KHz., Una truncación mucho más baja siempre es realizada en la práctica real.

El denominador de esta definición se conoce como el valor rms de V(t). Una inspección de los pesos de TIF revela que la característica son más sensitiva en la banda de frecuencia de los 2400 a 2800 Hz. Los pesos para las frecuencias que se encuentran usualmente el la valoración de la calidad de la energía, son cerca de dos ordenes de magnitud más bajas que aquellas de las bandas citadas. por supuesto que las amplitud de las señales armónicas en un sistema de potencia abajo del onceavo armónico son usualmente cercanos al orden de magnitud más bajo que aquellas regularmente encontradas en la banda de frecuencia de los 2400 a 2800 Hz. Es útil saber sobre la aproximación 1/n, es una valoración esperada en los niveles de las señales armónicas. Ya que las series de expansión de Fourier para una onda cuadrada contiene coeficientes que se decrementa con una amplitud tal como 1/n donde n es el numero del armónico, y ya que algunos convertidores de corriente AC/DC aproximadamente se parecen a una onda cuadrada, la regla 1/n es usualmente empleada al contenido armónico de los convertidores de corriente. Por ejemplo un convertidor de corriente de 150 Amp a la frecuencia fundamental debe contener 30 Amp para el quinto armónico y 21.43 para el séptimo armónico para esta aproximación. Si otra información se conoce o se tiene datos experimentales o están disponibles, la regla 1/n no debe ser utilizada ya que frecuentemente es una aproximación. El TIF se utiliza frecuentemente para valorar de la interferencia de los circuitos distribución de potencia con circuitos de comunicación de audio. Ya que el acoplamiento mutuo es modelado en el TIF, este indice es especialmente útil para valorar el grado de interferencia en las comunicaciones debido a los circuitos de potencia. En algunos lugares los circuitos telefónicos son ahora modulado por códigos de pulsos, el TIF nos indicara el nivel de interferencia entre el circuito de

poder y el circuito PCM (modulación por código de pulso), de cualquier forma algunos circuitos telefónicos locales son de naturaleza analógica, y el TIF es útil para valorar la interferencia en dichos casos.

Si solamente el *i*ésimo armónico ( $w_0$ ) se presenta en adición a la frecuencia fundamental,

$$TIF_v^2 = w_1^2 + \frac{w_1^2 \cdot THD_v^2}{1 + THD_v^2}$$

$$TIF_v^2 = w_1^2 + \frac{w_1^2 \cdot THD_l^2}{1 + THD_l^2} \quad (88)$$

El TIF se aplica usualmente a las corrientes de línea, ya que la naturaleza de la inducción electromagnética se relaciona con la amplitud de la corriente de línea. En tal aplicación no hay diferencia entre la interferencia causada por la corriente de secuencia positiva o negativa de una línea de corriente, esto es debido a que el circuito de audio es de una sola fase y los circuitos de poder son de tres fases; por esta consideración el circuito de una sola fase no puede distinguir entre las secuencias de corrientes en el circuito de potencia. Este no es el caso para las corrientes de secuencia cero. La corriente de secuencia positiva en un circuito trifásico inducirá voltaje en un circuito telefónico monofásico adyacente, en un derecho de vía común como esta calculado por la superposición (adición) de tres voltajes, cada uno producido por una fase diferente. Así la corriente de la fase A para el circuito de distribución induce un voltaje en el circuito de comunicación, que esta a 120 grados fuera de fase con el voltaje producido por la corriente de la fase B, el mismo principio se aplica para los otros voltajes inducidos por otras corrientes de fase. El voltaje total inducido en el circuito de comunicación, es la suma fasorial y no la suma algebraica de los tres voltajes componentes. La misma observación exacta se hace para las corrientes de secuencia negativa en un circuito de potencia. De cualquier forma cuando uno analiza las corrientes armónicas que están en una secuencia cero, uno encuentra que para un circuito trifásico balanceado, las corrientes trifásicas en un circuito de distribución están todas en fase, en este caso el voltaje total inducido en el circuito de comunicación es la suma algebraica

simple de los voltajes inducidos, para las tres corrientes de fase individuales. La corriente  $I_a+I_b+I_c$  se denomina corriente residual y esta corriente es proporcional (o igual a, dependiendo de la definición de secuencia cero utilizada) la corriente de secuencia cero. Debido que el efecto aditivo de las corrientes de fase, en este caso se concluye que la entrada armónica debido a las corrientes armónicas debido a la secuencia cero es mayor que el impacto correspondiente (para una amplitud de corriente dada) de las corrientes de secuencia positiva y negativa. Por esta razón algunos estándares prácticos, recomendaciones y guías para los máximos valores de armónicas son menos tolerantes para las señales de secuencia cero. Esto es, circuitos frecuentemente pueden tolerar menor impacto de secuencia cero porque la las señales de las tres fases están en la fase y por lo tanto son aditivas. Tanto el TIF como el THD pueden ser modificados para reflejar esta consideración, si solo las señales de secuencia cero se utiliza en los cálculos de TIF o THD (en caso de sistemas trifásicos balanceados, esto significa que solo los múltiplos de tres de la frecuencia  $3hW_0$  son utilizados) el término residual se aplica para el TIF. Cuando las señales de secuencia positiva y negativa son utilizadas en las fórmulas de TIF o THD se aplica el término balanceado. Para las ecuaciones balanceadas de TIF (87) se utiliza con las señales de secuencia positiva en el numerador y todas las frecuencias aparecen en el denominador. Estos es que el denominador  $V_{rms}$ . Para los TIF residuales, el numerador contiene términos de secuencia cero pero el denominador se mantiene  $V_{rms}$ . Evidentemente.

$$\underline{TIF}^2 = TIF_{residual}^2 + TIF_{balanceado}^2$$

$$\underline{THD}^2 = THD_{residual}^2 + THD_{balanceado}^2 \quad (\%) \quad (89)$$

### 3.3.2.-PRODUCTO V.T y PRODUCTO LT

El índice THD no da información acerca de la amplitud del voltaje (o de la corriente) con el cual esta conectado. Por ejemplo Una señal de 5% de distorsión de voltaje, puede ser

una señal de alto o bajo voltaje. El THD no indica una información de amplitud, el "producto V.T" es un índice alternativo que incorpora la amplitud de voltaje.

$$V.T = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (w_i V^{(i)})^2} \quad (90)$$

En esta expresión, la coeficiente  $w_i$  son los pesos de TIF mostrados en la tabla 3.1 y  $V^{(i)}$  son los  $i$  componentes armónicos de los voltajes V línea a línea. El nombre del "producto V.T" se refiere al hecho que este índice es un producto del voltaje de barra y el peso de la influencia telefónica. El producto V.T da una medida de la interferencia del circuito de audio debido a la interferencia del voltaje de barra, ya que el voltaje de barra se pesa con los coeficientes TIF algunas veces la notación KV.T se utiliza, donde K demuestra que el índice debe ser multiplicado por 1000.

El producto I.T es una medida similar de la corriente de línea.

$$I.T = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (w_i I^{(i)})^2} \quad (91)$$

En esta expresión  $I^{(i)}$  denota la componente armónica  $i$  de la corriente de línea  $I$ , algunas veces la notación KI.T se utiliza donde K denota que el índice debe ser multiplicado por mil. La notación del producto I.T se debe al hecho de que este índice es un producto de la corriente de línea y los pesos de la influencia telefónica.

Note que la notación  $V_{rms}$  e  $I_{rms}$  se refiere a los valores rms de  $V(t)$  e  $I(t)$  respectivamente, algunas veces el producto V.T esta especificado para una frecuencia específica,  $V.T^{(i)}$  esta especificado a una frecuencia  $i\omega_0$ .

$$V.T^{(i)} = w_i V^{(i)} \quad (92)$$

Y estos productos individuales V.T se relacionan a los productos V.T como:

$$V.T = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V.T^{(i)})^2} \quad (93)$$

Esta sección concluye con una tabla (3.2) que ilustra líneas guías, recomendaciones prácticas y estándares para el TIF; THD y el "producto I.T. Los estándares en esta tabla se indican niveles típicos de los índices de las señales armónicas más comúnmente utilizados

Frecuencia Hz	Armónico de 60 Hz	Ponderación n de pesos C	TIF w <sub>i</sub>	Frecuencia Hz	Armónico de 60 Hz	Ponderación de pesos C	TIF w <sub>i</sub>
60	1	0.0017	0.5	1740	29	0.841	7320
120	2	0.0167	10.0	1800	30	0.841	7570
180	3	0.0333	30.0	1860	31	0.841	7820
240	4	0.0875	105	1920	32	0.841	8070
300	5	0.1500	225	1980	33	0.841	8330
360	6	0.222	400	2040	34	0.841	8580
420	7	0.310	650	2100	35	0.841	8830
480	8	0.396	950	2160	36	0.841	9080
540	9	0.489	1320	2220	37	0.841	9330
600	10	0.597	1790	2280	38	0.841	9560
660	11	0.685	2260	2340	39	0.841	9840
720	12	0.767	2760	2400	40	0.841	10090
780	13	0.860	3360	2460	41	0.841	10340
840	14	0.912	3830	2520	42	0.832	10480
900	15	0.967	4350	2580	43	0.822	10600
960	16	0.977	4690	2640	44	0.804	10610
1020	17	1000	5100	2700	45	0.776	10480
1080	18	1000	5400	2760	46	0.750	10350
1140	19	0.988	5630	2820	47	0.724	10210
1200	20	0.977	5860	2880	48	0.692	9960
1260	21	0.960	6050	2940	49	0.668	9820
1320	22	0.944	6230	3000	50	0.645	9670
1380	23	0.923	6350	3300	55	0.490	8090
1440	24	0.924	6650	3600	60	0.359	6460
1500	25	0.891	6680	3900	65	0.226	4400
1560	26	0.871	6790	4200	70	0.143	3000
1620	27	0.860	69700	4500	75	0.0812	1830
1680	28	0.840	7060	4990	83.3	0.0336	840

TABLA: 3.1 Coeficientes de Para Interferencia Telefónica (TIF) y Ponderación de Pesos C

### 3.3.3.- INDICE DE PONDERACION DE MENSAJES -C

El índice de ponderación de mensajes C, es muy similar al TIF excepto por los pesos  $C_i$  que son utilizados en vez de  $W_i$ . La ponderación de mensajes C para la corriente  $i(t)$ , que posee componentes armónicos  $I^{(1)}, I^{(2)}, I^{(3)} \dots$  es C

$$C = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (c_n \cdot I^{(n)})^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I^{(n)})^2}} \quad (94)$$

El índice de ponderación de mensajes C también puede ser aplicado al voltaje de barra. Los pesos de C-mensaje están tabulados en la tabla 3.1, como puede ser visto estos pesos esta relacionados con los pesos de TIF como sigue.

$$5. \text{if } C_i = w_i \quad (95)$$

Los pesos de mensajes C tabulados en la tabla 3.1 son pesos establecidos en 1965. En esencia los pesos de TIF cuentan con el hecho de que el acoplamiento mutuo entre los circuitos se incrementa linealmente con la frecuencia, mientras que los pesos de mensajes C están libres de esta consideración. Esto asegura que asumiendo que la inductancia mutua entre los circuitos adyacentes es esencialmente una frecuencia independiente si la inductancia mutua entre los circuitos n y m es  $M_{nm}$ , entonces la reactancia mutua es  $j\omega M_{nm}$ .

Bajo tal tipo de escenario, el voltaje inducido en el circuito m por la corriente del circuito n es  $i^{(n)} j\omega M_{nm}$ . Así el acoplamiento mutuo es lineal con respecto a la frecuencia. Estas asunciones no se aplica cuando la inductancia mutua no es una función de la frecuencia (ej. cuando hay un medio magnético entre los circuitos acoplados o cuando la corriente a tierra deben ser modeladas para tener respuestas completa)

Aplicación	Tipo de limite	Rango Aplicable al Equipo	Limite	Calidad Eléctrica
Convertidores Estáticos	Recomendación práctica IEEE 519-1964	2.4 - 69 Kv sobre 69 Kv	THD < 8 % THD < 1.5 %	Barra de Voltaje
Sistemas de Distribución	Recomendación práctica IEEE 519-1964	2.4 - 69 Kv sobre 69 Kv	THD < 5 % THD < 1.5 %	Barra de Voltaje
Sistemas de Distribución	Estándar (ANSI Std 386)	Improbable interferencia telefónica  Posible interferencia telefónica  Probable interferencia telefónica	IT < 10000  10000 < IT < 25000  IT > 25000	Corriente de línea
Sistema de subtransmisión	Valores típicos	60 - 69 KV  60 - 69 KV	Balanceda Residual  IT=1400 60 < IT < 800 VT=700 15 < VT < 30	Corriente de línea  Barra de Voltaje
Sistema de subtransmisión	Valores máximos típicos	60 - 69 KV  60 - 69 KV	Balanceda Residual  KIT=6 0.1 < KIT < 1 VT=700 50 < VT < 400	Corriente de línea Barra de Voltaje
Máquinas Sincrónicas	Estándar (ANSI Std C50.12-1982)	5 - 19.999 MVA 20MVA Y Sobre	Balanceda Residual  TIF < 100 TIF < 75 TIF < 70 TIF < 50	Corriente de carga
Generadores Sincrónicas	Estándar (ANSI Std 368)	Característica* de diseño del generador	5 < TIF < 10	Corriente del Generador
Máquinas Sincrónicas de rotor Cilíndrico	Estándar (ANSI Std C50.13-1977)	62.5 - 299 KVA 300 - 699 KVA 700 - 999 KVA 1000 - 4999 KVA 5000 - 19999 KVA 20000-99999 KVA 100000 Y superior	Balanceda Residual TIF < 350 TIF < 250 TIF < 150 TIF < 150 TIF < 100 TIF < 100 TIF < 75 TIF < 70 TIF < 50 TIF < 40 TIF < 30	Corriente de línea
Transformadores de Corriente	Manual de Distribución	110	IT < 66 para cada nivel de KVA	Corriente de línea

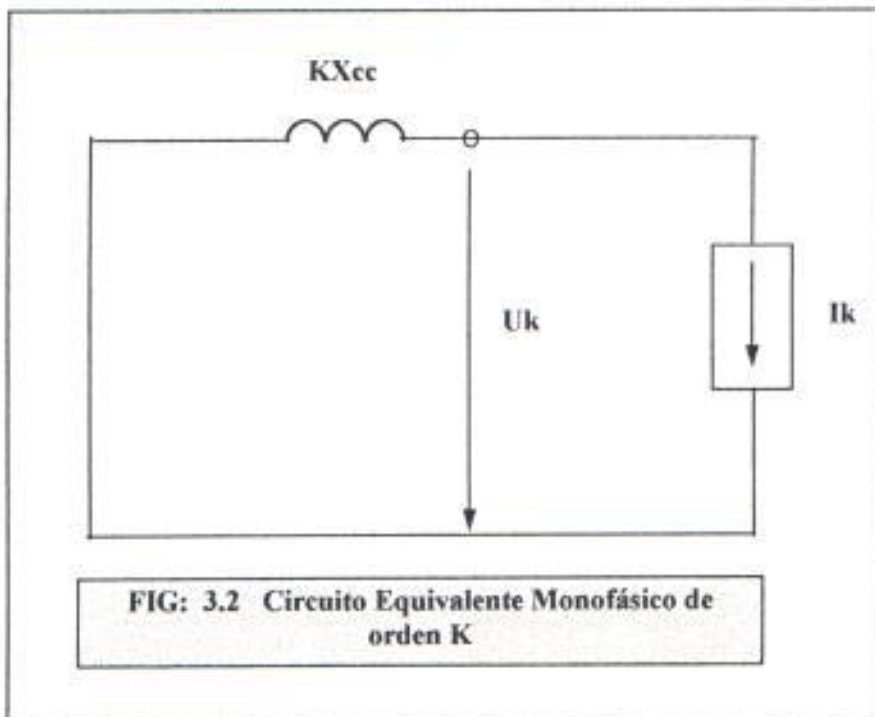
TABLA: 3. 2 Recomendaciones prácticas y límites estándares del THD, TIF, VT y VI

### 3.4.- LIMITES ADMISIBLES DE DISTORSION ARMONICA EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.

En el presente tiempo no existe una especificación uniforme sobre los limites admisibles del contenido de armónicas existente en los sistemas de potencia. El incremento en la industria del uso de dispositivos semiconductores cada vez se hace mayor, pudiendo producirse un difícil problema en el futuro, lo cual debe ser previsto ahora.

En la mayoría de las normas existentes, el requerimiento mas importante consiste en limitar la distorsión de tensión en el punto de conexión común (PCC) del convertidor con otros consumidores.

La primera estimación puede realizarse representando la impedancia de la red solo por la reactancia de cortocircuito  $X_{cc}$  y el convertidor por una fuente de intensidad independiente, calculado por el método convencional (fig.3.2), se observa la distorsión de tensión  $V_k$  dependerá de la potencia de cortocircuito de la red  $S_{cc}$  y de la potencia del convertidor  $P$ .





$$RCC = \frac{S_{cc}}{P(MVA)} \quad (96)$$

Suponiendo un ángulo de disparo nulo y conmutación instantánea en el convertidor se obtiene:

$$Vk = \frac{100}{R_{cc}} \quad (\%) \quad (97)$$

Esta expresión junto con el hecho de que en las redes eléctricas la potencia de cortocircuito aumenta con los niveles de tensión, permite relacionar las potencias de los convertidores con los niveles de tensión adecuados a los que debe conectarse

Las tablas 3.3 y 3.4 muestran las secuencias de las corrientes armónicas para el caso ideal y las características armónicas de los convertidores en función de el número de pulsos.

En los convertidores de potencia grandes, la distorsión de tensión en el punto de conexión común deben ser inferiores a los valores de la tabla 3.5.

Orden	Secuencia	Orden	Secuencia	Orden	Secuencia
1	Positiva	6	Cero	11	Negativa
2	Negativa	7	Positiva	12	Cero
3	Cero	8	Negativa	13	Positiva
4	Positiva	9	Cero	14	Negativa
5	Negativa	10	Positiva	15	Cero

**TABLA: 3. 3: SECUENCIA DE LAS CORRIENTES ARMONICAS EN EL CASO IDEAL.**

		Orden de Pulso						Amplitud regla 1/n	Amplitud típica
		6	12	18	24	30	36		
A R M O N I C O	5	-						20.00%	16.0%
	7	+						14.29%	8.2%
	11	-	-					9.09%	3.3%
	13	+	+					7.69%	2.4%
	17	-		-				5.88%	1.4%
	19	+		+				5.26%	1.1%
	23	-	-		-			4.35%	0.8%
	25	+	+		+			4.00%	0.6%
	29	-				-		3.45%	0.5%
	31	+				+		3.23%	0.4%
	35	-	-	-			-	2.86%	0.3%
	37	+	+	+			+	2.70%	0.3%
Orden de fase		3	6	9	12	15	18		
Separación de fase		120°	60°	40°	30°	24°	20°		

TABLA 3. 4: CARACTERISTICAS ARMONICAS DE CONVERTIDORES DE P-PULSOS

Voltaje en el PCC Kv	Distorsión Total de Voltaje Uk (%)	Distorsión Individual de Tensión Uk (%)	
		Impares	Pares
0.415	5	4	2
6.6/11	4	3	1.75
33/66	3	2	1
132	1.5	1	0.5

TABLA: 3. 5: VALORES LIMITES DE VOLTAJE (Recomendación Inglesa)

• Conociendo el tipo de sistema de C.A, es posible calcular la corriente y la tensión de armónicas en cualquier punto, así como la tensión y la corriente inducida en los circuitos de comunicación cercanos y en diversos puntos, teniendo en cuenta las sobretensiones, el exceso de calentamiento y la interferencia en los circuitos de comunicación, es preciso realizar algunos cambios en las especificaciones de los filtros si se usan. La parte dificultosa en el calculo es que las líneas aéreas o cables se comportan como simples reactancias a las frecuencias armónicas. Por desgracias hay también dificultades de tipo práctico, como son:

- a) Los parámetros de impedancia de las líneas no se conocen con nunca con precisión.
- b) La configuración de la mayor parte de los sistemas de C.A, cambia aun por cortos periodos de tiempo, a causa de maniobras en las líneas generadoras, cargas, etc
- c) Efectos sintonizadores, debido a los cambios en la frecuencia.

Cuando se usa un filtro paralelo para los armónicos, es posible diseñarlo, para una tensión máxima de armónica garantizada, solo en los terminales del convertidor, sin tener en cuenta los parámetros de impedancia del sistema AC. Pero normalmente es necesaria hacer una estimación de las corrientes armónicas en cualquier punto del sistema.

Los niveles armónicos de tensión se consideran aceptables del 1% al 2% según la definición CIF, o del 3% al 5%, según la definición IEC 84. El precio de los filtros de armónicos varían, aproximadamente, en razón de los niveles considerados aceptables

The British Electricity Council, presenta una documentación que es un documento en el cual indica las corrientes de las señales armónicas permisibles en los sistemas de potencia. Esta recomendación se muestra en la tabla 3.6. Otra recomendación es la máxima carga instalada en los convertidores tomando en cuenta la tabla 3.6, esta recomendación se observa en la tabla 3.7.

The "Commission Communautaire de Normalisation" recomienda que la distorsión de voltaje debe ser del 2% ó menor. Otros autores recomiendan una distorsión del 5% ó menos. La aplicación práctica para minimizar la interferencia del funcionamiento de los convertidores con otros equipos eléctricos es limitar el factor de distorsión de voltaje a un máximo de 4% al 5%, el criterio dependerá del ingeniero diseñado. Un buen diseño de un sistema de potencia, minimizara su interrupción y su operación errática.

Los filtros armónicos pueden reducir el flujo de corrientes armónicas al sistema de

potencia en forma apreciable, y pueden ser el medio más económico de control de estas indeseables corrientes armónicas, aparte de que sirven como proveedores de reactivos.

Es necesario analizar correctamente el funcionamiento del sistema de potencia al producirse la inyección de armónicas hacia el mismo, el problema posible es la inestabilidad. Se deberá observar la primera resonancia paralelo, revisar la región del cuarto armónico  $\pm 3.75\%$ , si hay problemas en esta región la capacitancia debe ser incrementada o disminuida. Es necesario realizar un flujo de potencia, pues al atenuar las armónicas, a veces se tiene que sacrificar el factor de potencia.

Voltaje en el PCC	CORRIENTES ARMONICAS (Amp)			
	Quinta	Séptima	Décima Primera	Décima Segunda
415 V	65	42.0	6.30	53.0
6.6 KV	9.7	6.30	10.0	8.50
11 KV	9.60	6.30	7.00	6.00
33/66 KV	4.80	3.20	3.50	3.00
132 KV	3.0	2.50	3.30	2.80

FIG: 3.6 CORRIENTE ARMONICA PERMISIBLE TOTAL (Recomendación Inglesa G.5/c)

Voltaje en el PCC	Número de Pulsos Efectivos	
	6-Pulsos	12-Pulsos
415 V	250 KW	750 KW
6.6 KV	600	1800
11 KV	1000	5000
33/66 KV	3000	7000
132 KV	-----	14000

TABLA: 3.7 MAXIMA CARGA EN LOS CONVERTIDORES CORRESPONDIENTES A LA CORRIENTE ARMONICA DE LA TABLA 3.6

### 3.4.1.- NORMA IEEE 519

La norma IEEE 519 es una práctica recomendada para la corrección del factor de potencia y para la limitación del impacto armónico en los convertidores de potencia AC/DC. (e.j. rectificadores e inversores).

Un aspecto fundamental e innovador es la división de responsabilidades de problema de armónicos entre los consumidores y la empresa de suministro de energía, Consecuentemente ella establece límites de distorsión de tensión en el punto de unión, que son responsabilidad de la concesionaria y límites de distorsión de corriente, en el punto de unión que son responsabilidad del consumidor, Como el problema de armónicos representa siempre características particulares, esa norma propone índices basados en un sistema supuestamente real que no siempre es encontrado en la práctica. De acuerdo con la norma los índices de calidad de armónicos deben tener significado físico, tener relación con la severidad de los efectos, deben ser simples y prácticos. En tanto como la norma estuvo basado en un sistema ideal, la simple observación de los índices establecidos no es una garantía de la prevención del problema. En realidad los límites establecidos por la norma deben ser encarados como un primer indicativo a seguir. Excepciones son posibles, más bien deben ser basadas en cuidadosos estudios.

La esencia de la práctica recomendada esta relacionada con la calidad de la energía eléctrica en una barra A.C, esta contenida en dos tablas. La primera (tabla 3.8), es un límite máximo recomendado en la corriente armónica en el punto donde el convertidor estático de potencia (o cualquier otra carga no lineal) esta conectado a la empresa de suministro de energía eléctrica. Este punto se denomina "punto de acoplamiento común" (PCC) y el PCC esta indicado en la fig 3.3 .°Los límites recomendados varían en función del porte del consumidor (carga). Esta variación fue expresada en función de la relación de la corriente de cortocircuito en el punto de acople común y la corriente de demanda máxima del consumidor, es importante observar que los límites de distorsión de corriente son normalizados con relación de

la corriente de demanda máxima. De esta forma la distorsión de corriente puede ser mayor a la corriente de carga pero inferior a la corriente de demanda máxima.

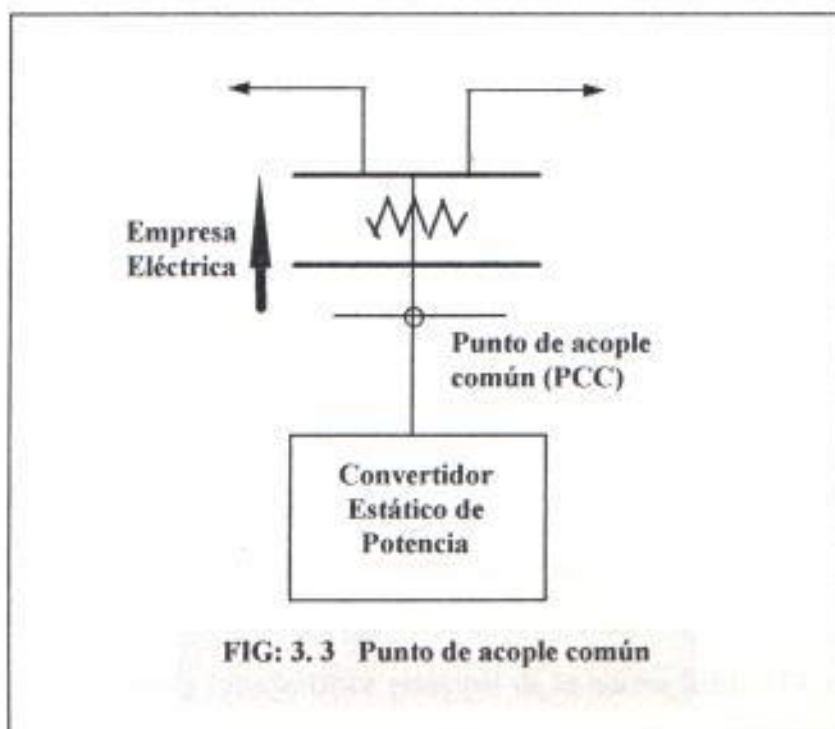


FIG: 3.3 Punto de acople común

Las tablas 3.8 y 3.9, las cuales son las principales características de esta norma, desde el punto de vista de los límites de señales armónicas en los sistemas de potencia. Los límites tabulados en la distorsión de corriente están divididos dentro de dos tipos: un límite de distorsión armónica en la banda de frecuencia, y una distorsión armónica total (THD), la limitación en la banda de frecuencia se calcula de la misma forma que el THD, excepto que el numerador contiene solo las amplitudes de las corrientes armónicas en la frecuencia de banda especificada. Los límites de corriente armónica dependen de la " rigidez " en la barra AC en el PCC. Esta rigidez es medida en términos de una razón de cortocircuito (SCR) la cual es definida como la división de la corriente de cortocircuito en la barra para la corriente fundamental en la barra.

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I^1}$$

(98)

La corriente de cortocircuito es fácilmente calculada de un estudio de cortocircuito o del calculo de:

$$I_{sc} = \frac{1}{|Z_{pcc}^+|} \quad (\text{Amp}) \quad (99)$$

Donde  $X_{PCC}$  es la reactancia de secuencia positiva en el PCC, vista desde adentro de la red. Esta reactancia es el equivalente Thevenin de la reactancia de la red externa, esta expresión debe ser expresada en por unidad ( p.u.). En la tabla 3.8 la distorsión armónica y los limites de THD en el PCC son más bajos para las barras más débiles (SCR pequeño) porque en tales barras el impacto de la distorsión armónica de la corriente, vendría a ser muy grande. En barras rígidas el SCR es alto y el impacto armónico de la corriente de carga en el voltaje de la barra vendría a ser bajo, de ahí que las barras de un gran SCR, los limites de distorsión armónica se vuelven mayores.

La tabla 3.9 es la segunda característica principal de la norma IEEE 519, esta tabla pone limites recomendados para la distorsión armónica de voltaje en las barras PCC, esta demuestra los limites recomendados en la distorsión de los voltajes armónicos para cada armónico y los limites en la distorsión armónica total. La distorsión armónica para un solo armónico se escribe en la tabla como una fracción de la amplitud de la frecuencia fundamental. La tabla esta dividida en rango de diferentes voltajes de transmisión y distribución, para la tabla 3.9 una recomendación adicional se hace en el documento IEEE 519 de que los sistemas de alto voltaje DC pueden tener asta un 2% de distorsión armónica total el los terminales HVDC, si es que la red DC puede atenuar los armónicos prioritariamente o alcanzar una barra de carga.

Los limites aplicados son el 3% para cada armónico individual y el 5% para la distorsión total de tensión. Estos valores son definidos como los valores máximos aceptables en el peor de los caso de operación normal con duración superior a una hora. Valores de distorsión armónica total de tensión 50% mayores son aceptables en condiciones anormales de operación de corta duración como partida de equipamientos y/o maniobras del sistema. Este problema es importante porque el

problema de armónicos es un problema de régimen permanente.

Es interesante conjeturar asta donde la responsabilidad recae, para el respaldo de las normas recomendadas. Ciertamente el control de la corriente de carga puede ser solamente responsabilidad del consumidor o del comprador, así la responsabilidad para el cumplimiento de la norma de la tabla 3.8 es del usuario. Similarmente la compañía de suministro de energía o compañía cogeneradora, tienen la responsabilidad de mantener la onda de voltaje (tabla 3.9).

$\frac{I_{ac}}{I^1}$	ORDEN ARMONICO				Distorsión armónica Total
	< 11	11 - 22	23 - 35	> 35	
< 20	4.0	1.5	1.0	0.5	5.0
20 -49.9	7.0	2.5	1.5	0.8	8.0
50 -99.9	10.0	4.0	2.0	1.2	12.0
100-999	12.0	5.0	2.5	1.5	15.0
>1000	15.0	8.0	4.0	1.8	20.0

TABLA: 3. 8: DISTORSION ARMONICA DE CORRIENTE EN %

	2.3 - 68.9 KV	69 - 138 KV	> 138 KV
Valor para armónicos individuales	3.0	1.5	1.0
Distorsión Armónica Total	5.0	2.5	1.5

TABLA: 3. 9 DISTORSION ARMONICA DE VOLTAJE EN EL PCC

La situación no es tan simple como anunciar como enunciar que la corriente debe ser mantenida por el usuario y el voltaje por la compañía de suministro de energía. Es posible que un problema de distorsión armónica ambiental exista a lo largo del sistema de potencia, este puede ser causado por alguna carga distante o por alguna



condición resonante no planeada. En este caso un usuario puede tener una carga puramente resistiva y la corriente de carga puede estar distorsionada, porque el voltaje de barra puede estar distorsionado. En algunos casos puede ser algo dificultoso de determinar el último punto de responsabilidad, más allá, si el cumplimiento no ocurre " que recursos pueden tener las varias partes"

La respuesta a esta pregunta recae parcialmente en el hecho de que la documentación de la norma IEEE 519, es solamente una práctica recomendada, seguramente el documento representa el consenso colectivo de los ingenieros, compañías de servicio, el gobierno y los usuarios como un modo recomendado de operación. Si algunas de las partes no se une a la recomendación podría haber recurso legal si es que ocurren daños, afortunadamente la situación rara vez alcanza este escenario ya que la función de la compañía y de la comisión de servicios públicos (gobierno) es resolver o mejorar los problemas llevando al usuario y a la compañía proveedora a un acuerdo

### 3.4.2.- LIMITES DE DISTORSION ARMONICA BRASILEÑOS

#### 3.4.2.1.- DEFINICIONES Y CONCEPTOS.

En la siguiente parte de este capítulo van a ser utilizados los conceptos y definiciones descritas a continuación.

**Niveles de Compatibilidad.-** Valores de tensión armónica y distorsión armónica total especificados para el sistema y que aseguran la operación correcta para la mayoría de los dispositivos y equipos existentes en la red eléctrica, promoviendo la coordinación entre los equipos causadores y aquellos susceptibles a las distorsiones armónicas.

En las tensiones más bajas, los niveles de compatibilidad están relacionados directamente con la sensibilidad de los equipos. Para las tensiones más altas, estos

limites no están en general asociados a la susceptibilidad de los equipos, sirviendo principalmente como un medio de coordinación entre los diferentes niveles de tensión de el sistema, de modo de garantizar el cumplimiento de los limites de distorsión en baja tensión.

**Punto de Entrega o Punto de Acople Común.-** Punto de conexión entre el sistema eléctrico de la empresa suministradora de energía y las instalaciones de utilización de energía del consumidor.

**Límites Globales.-** Valores máximos establecidos para las tensiones armónicas y distorsión armónica total en cualquier barra del sistema eléctrico, causada por la operación conjunta de todos los consumidores y equipos de la propia empresa suministradora de energía . Sirven como una garantía de la calidad de tensión suministrada a los consumidores.

Los limites globales deben ser entendidos como los niveles de compatibilidad de el sistema y deben servir para orientar no solamente a la empresa suministradora y usuarios, sino también a los fabricantes de equipo eléctrico en general, en el sentido de producir equipos con sensibilidad compatible con estos niveles.

**Niveles de Saturación.-** Valores tensión armónica y distorsión armónica total expresado en porcentaje de los limites globales. Representa las distorsiones preexistentes en determinadas barras e incorporar un nuevo criterio para permitir la evolución del sistema con la instalación de nuevas cargas especiales.

**Límites por Consumidor .-** Una evaluación exacta de los limites especiales de distorsión armónica.

De modo de simplificar y viabilizar esa evaluación, estableciendo el limite por consumidor, como aquellos valores máximos admisibles para las tensiones armónicas y distorsiones armónicas total provocadas en el sistema eléctrico de la

empresa suministradora de energía por un único consumidor.

Estos niveles por consumidor son derivados de los límites globales, considerando un nivel de saturación existente en la barra de conexión de la nueva carga especial.

En la definición de este límite, debemos llevar a consideración que para cada orden armónico  $h$ , la tensión armónica resultante en cualquier punto de un sistema y obtenida de la combinación vectorial de las tensiones armónicas provocada por diferentes fuentes. Algunos de estos efectos pueden ser representados por una ecuación general del tipo:

$$V_{hr} = (V_{h_1^a} + V_{h_2^a} + V_{h_3^a} + \dots)^{1/a} \quad (V) \quad (100)$$

Donde:

$V_{hr}$ .- Tensión armónica resultante (armónico de orden  $h$ )

$V_{hi}$ .- tensión armónica de orden  $h$ , provocada por la fuente  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )

$a = 1$  para  $h < 7$

$a = 1.4$  para  $8 < h < 13$

$a = 2$  para  $h > 14$

### 3.4.2.2.- LÍMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE

Los límites aquí establecidos son aplicables a la conexión de consumidores causantes de distorsión armónica en redes de transmisión y subtransmisión (con tensiones iguales o superiores a 13.8 KV), también como a los equipos especiales de las empresas suministradora de energía.

Estos límites no deben ser aplicados a fenómenos transitorios que resulten en inyección de corrientes armónicas, como ocurre en la energización de transformadores.

**Límites de tensión.**- La tabla 3.10 representa los límites globales para las tensiones armónicas individuales y para la distorsión armónica total. THD. Estos niveles deben ser entendidos como niveles de compatibilidad y no deben ser excedidos en ningún punto del sistema eléctrico

V < 69 KV				V > 69 KV			
Impares		Pares		Impares		Pares	
Orden	Valor (%)	Orden	Valor (%)	Orden	Valor (%)	Orden	Valor (%)
3, 5, 7	5 %	2, 4, 6	2 %	3, 5, 7	2 %	2, 4, 6	1 %
9, 11, 13	3 %			9, 11, 13	1.5 %		
15 a 25	2 %	> 8	1 %	15 a 25	1 %	> 8	0.5 %
> 27	1 %			> 27	0.5 %		
D = 6 %				D = 3 %			

**TABLA: 3. 10: Limite globales de tensión expresado en porcentaje de la tensión fundamental**

En la tabla 3.11 se presentan los limites por consumidor para las tensiones armónicas individuales y para la distorsión armónica total THD. Estos limites deben ser aplicados en el punto de entrega como parte de los criterios de conexión.

Los limites por consumidor fueron determinados a partir de los limites globales, considerando la existencia de un nivel de saturación igual al 70% de los limites globales y tomando en cuenta que las tensiones armónicas de orden h provenientes de diferentes fuentes se adicionan vectorialmente.

V < 69 KV				V > 69 KV			
Impares		Pares		Impares		Pares	
Orden	Valor (%)	Orden	Valor (%)	Orden	Valor (%)	Orden	Valor (%)
3 a 25	1.5 %	Todos	0.6 %	3 a 25	0.6 %	Todos	0.3 %
> 27	0.7 %			> 27	0.4 %		
D = 3 %				D = 1.5 %			

**TABLA:3. 11:Limites de tensión por consumidor expresado en porcentaje de la tensión Fundamental.**

### 3.4.2.3.- LIMITES DE DISTORSION DE CORRIENTES

La conexión de una carga no lineal esta condicionada al cumplimiento de los limites de corrientes armónicas inyectadas en el punto de entrega.

Estos límites de corrientes deben ser establecidos por la empresa suministradora de energía, con base de los estudios de penetración de armónicas en sus redes, de forma de evitar que los límites de tensión por consumidor (tabla 3.8) sean excedidos en los demás puntos del sistema.

### **3.4.2.3.-TOLERANCIA Y/O FLEXIBILIDAD.**

Los límites de tensión por consumidor y los límites de corriente pueden ser violados en algunos casos, a criterio de las empresa eléctricas, en base de un análisis técnico económico.

Valores de distorsión armónica total de tensión 50% mayores son aceptables en condiciones anormales de operación de corta duración como partida de equipamientos y/o maniobras del sistema. Este problema es importante porque el problema de armónicos es un problema de régimen permanente.

La violación de los límites globales de tensión solo deben ser aceptados con carácter temporal y en casos excepcionales, tales como indisponibilidad del equipo de filtrado o contingencias, en estos casos debe haber un monitoreo continua de los niveles de distorsión existentes en el sistema.

Por otro lado, en los casos que las tensiones armónicas o la distorsión armónica total preexistente en el punto de entrega, verificada a través de las mediciones fueran superiores a los niveles de saturación adoptados (70% de los límites globales), límites de tensión de los consumidores inferiores a los valores expresados en la tabla 3.11 pueden ser establecidos por la empresa distribuidora.

### **3.5.- LIMITES DE INTERFERENCIA TELEFONICA.**

Los criterios que han sido adoptados para el control de estas interferencias han sido los parámetros TIF e IT, definidos anteriormente. No en tanto estos parámetros sufren algunas críticas por no considerar en forma directa algunos factores.

El parámetro IT no parece adecuado como parámetro fijo, aplicable a cualquier instalación, pues los parámetros reales de interferencia dependen no solamente de las corrientes armónicas, más también de la resistividad de el "suelo", de la densidad de l circuito telefónico y del equilibrio de fases de las líneas de transmisión.

Adicionalmente, el parámetro IT considera el acoplamiento mutuo entre líneas de potencia y telefónica con variación proporcional a la frecuencia, mientras que en la realidad existe una fuerte saturación que depende de la separación de las líneas y del valor de la resistividad. Por ese motivo el parámetro IT, conforme fue definido, da importancia excesiva a los armónicos de orden más alto, lo que puede producir un error en la distribución de la filtración.

EL parámetro TIF, sufre las mismas críticas que el parámetro IT, pero es cuestionado principalmente por querer relacionar los niveles de tensión armónica con las interferencias telefónicas ( que son básicamente causados por la circulación de las corrientes armónicas en las líneas de transmisión).

Por esta razón no son recomendados valores límites para los parámetros TIF y TI, dejándose apenas la recomendación de que sean considerados como indicativos de posibilidades de ocurrencia de interferencia telefónica. Para dar una idea de los valores en uso de estos parámetros, la tabla 3.12 lista los que fueron utilizados en algunos proyectos y la tabla 3.13 muestra algunos valores orientativos para los parámetros I.T.

Proyecto	Criterio	
British Columbia	TIF < 50	
EEL River	TIF < 50	IT < 25 kA
Pacific Intertie	TIF < 15	
Nelson River	TIF < 25	IT < 50 kA
Italpu	TIF < 25	IT < 35 kA

TABLA: 3.12 Valores de TIF y TI utilizados en algunos Proyectos

IT	Descripción
Abajo de 10 KV	Interferencia Improbable
Entre 10 y 50 KV	Posible Interferencia
Sobre 50 KV	Probable Interferencia

TABLA: 3. 13: Valores Orientativos para el Parámetro IT

## CAPITULO IV

### CONTROL DE ARMONICO EN SISTEMAS ELECTRICOS.

#### 4.2.- MONITOREO DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA.

El monitoreo de la calidad de la energía en las primeras etapas de planeación de una planta o de la instalación de cargas sensibles, proporciona información sobre si existe o no problemas de calidad de la energía. El monitoreo puede consistir inicialmente en examinar los registros que tenga a mano la compañía de servicio eléctrico e la localidad. Estos pueden suministrar información sobre la regulación de voltaje, los niveles de distorsión armónica, las interrupciones prolongadas y las momentáneas y otros aspectos de las condiciones de estado estable y transitorias.

Las plantas que no pueden tolerar tiempos muertos por falta de energía, deben establecer un programa continuo de monitoreo de la calidad de la energía, aunando a la adición del equipo necesario para el acondicionamiento de la energía. Un programa de monitoreo de la calidad de la energía correctamente administrado, aumentara la oportunidad de detectar los cambios en el ambiente eléctrico antes de que causen problemas de operación en el equipo. El equipo de la energía proporciona protección si pasan desapercibidas algunas perturbaciones.

El registro preciso y detallado de los problemas de la operación de los equipos y del tiempo muerto no programado proporciona información esencial acerca de los problemas de calidad de energía. Estos registros ayudaran a analizar la salida del monitor de calidad de energía y a correlacionar los problemas del equipo con las perturbaciones eléctricas registradas. Los registros de tiempos muertos deben indicar cuales equipos tuvieron problemas, la fecha, al hora y la duración del problema; en que consistió el problema y las anotaciones pertinentes de cambios que se observan en las condiciones eléctricas o de otra índole antes o durante la falla.

Los registros de las compañías de servicios proporcionan información relativa a la



frecuencia de las interrupciones prolongadas. Los registros de las interrupciones momentáneas pueden ser vitales al determinar la necesidad de cierto acondicionamiento de la energía. Sin embargo, aun cuando parezcan confiables los registros de la compañía de servicio eléctrico público, esas condiciones pueden no continuar. Los incrementos de carga, la falla inesperada del equipo, las tempestades, los accidentes de vehículos y demás eventos que están fuera del control de la compañía habrán de afectar la calidad de la energía en el punto de entrega.

Los proveedores de equipos deben proporcionar las tolerancias establecida para el equipo que venden y las condiciones de operación esperadas en el punto de utilización deben estar dentro de estas tolerancias.

#### 4.3.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SISTEMAS ELECTRICOS.

El tiempo optimo para la planeación de la calidad de la energía es durante el diseño de construcción; los reajustes son a menudo costosos e imprácticos. El equipo de acondicionamiento de la energía puede requerir espacio de piso dedicado o de cuartos espaciales. Los generadores de emergencia requieran de tanque de combustibles que consideren condiciones ambientales especiales. Muchos equipos de acondicionamiento de la energía producen calor, el cual puede requerir acondicionamiento de aire o ventilación adicional. El equipo especial grande o pesado puede requerir rebosamiento en los pisos o de la planeación especial para su instalación o remoción.

Las cargas sensibles no deben energizarse de los mismos circuitos que las cargas inductivas grandes y de interrupción frecuentes, como las de elevadores, malacates, compresores de aire , etc. Sin embargo las cargas, las cargas continuas de motores ayudan a proporcionar cierto efecto de arrastre durante los atrasos de voltaje y las interrupciones momentáneas. Los campos magnéticos y la fuerza contraelectromotris de los motores proporcionan acción de generador en un plazo breve. Hasta las capiadoras de oficina y los refrigeradoras pueden afectar a las computadoras y otros

equipos sensibles. Un esquema de las diferentes maneras de resolver el alumbrado de un edificio se aprecia en la figure 4.1.

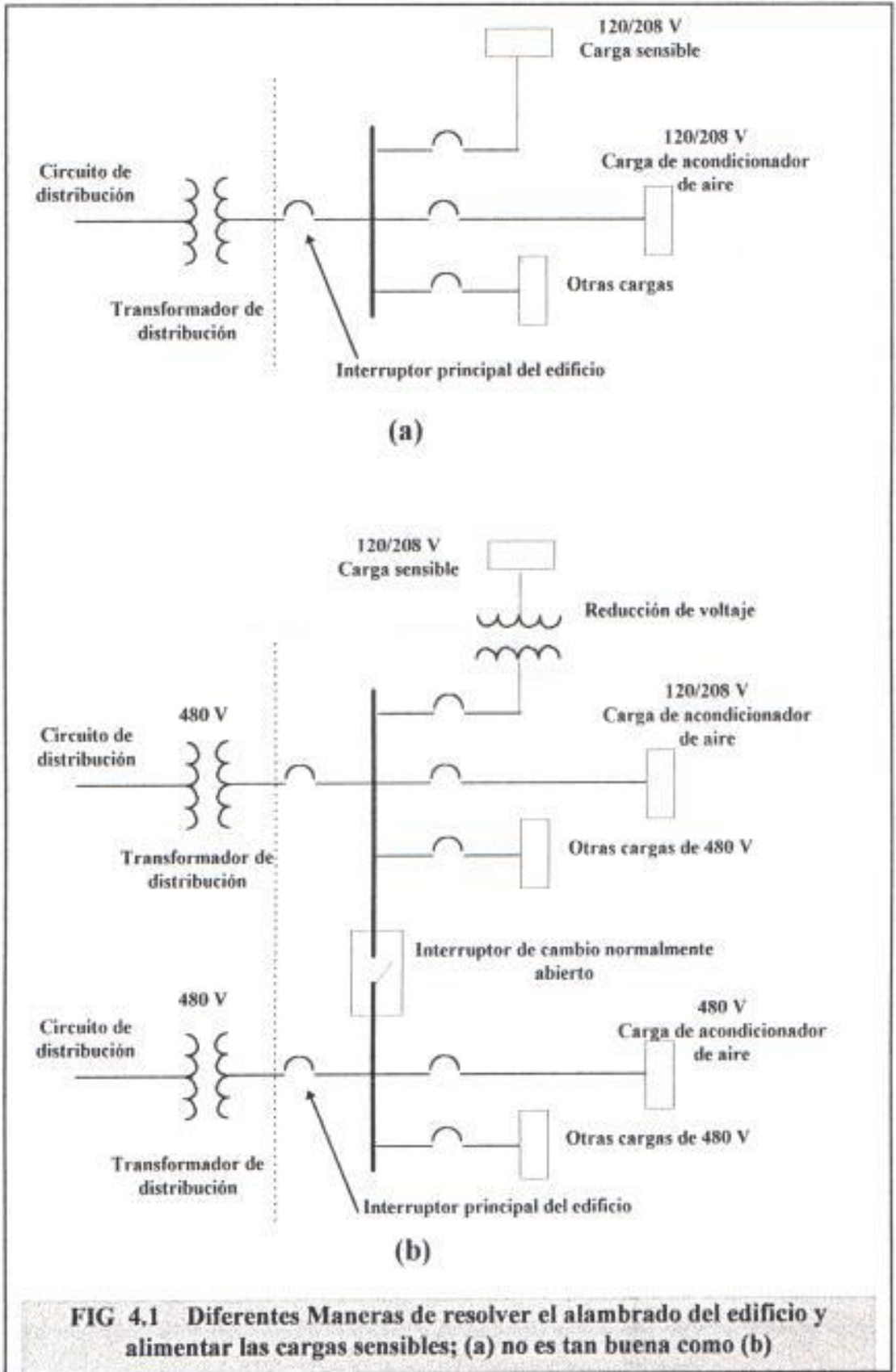
Algunas compañías de servicio imponen multas por factor de potencia bajo. Aplicando capacitores a las cargas inductivas del circuito se obtiene corriente reactiva en adelanto y se corrige el factor de potencia bajo. Sin embargo, los capacitores para corrección del factor de potencia en el ambiente eléctrico actual, puede causar más problemas de los que resuelve, excepto que sean aplicados correctamente.

Las conexiones de banco de capacitores para corrección del factor de potencia pueden crear sobrevoltajes que pueden afectar a los equipos sensibles. Un nuevo método para evitar este problema es la desconexión de los capacitores en el cruzamiento del voltaje cero de la curva senoidal de voltaje. Esto requiere un monitoreo sumamente sensible y de una capacidad de interrupción extremadamente rápida. Otro método es hacer la conexión y desconexión de capacitores en incremento, en vez de hacerlo como unidades únicas.

Otro problema que presentan los capacitores de corrección del factor de potencia es la proliferación de armónicas. La adición de capacitores puede ocasionar el corrimiento de la frecuencia resonante del sistema eléctrico a una frecuencia armónica dominante que pueda estar presente en los niveles altos. Estas condiciones resonantes pueden crear condiciones de sobrevoltaje y posible calentamiento de los bancos de capacitores o de otros equipos. La quemadura inexplicable de fusibles de un banco de capacitores puede ser síntoma de problema de armónicas.

Los criterios de conexión deben ser atendidos en las fases de planeación, pre-operacional y de operación. La verificación de las tensiones armónicas por el consumidor y el establecimiento de los límites de corrientes armónicas inyectadas en el punto de entrega deben ser realizadas por la empresa de suministro a través de estudio de penetración de armónicos.

En el caso que se juzgue conveniente, la empresa suministradora puede establecer pasos de aplicación de los criterios. La evaluación a través de simulación



**FIG 4.1** Diferentes Maneras de resolver el alambrado del edificio y alimentar las cargas sensibles; (a) no es tan buena como (b)

computacional, en que pese a las limitaciones del modelaje, esta es una herramienta útil que posibilita una verificación simultánea de varios puntos de la red.

Considerándose satisfactorio un análisis monofásica de el sistema, representando las variaciones de los parámetros de sus componentes con la frecuencia.

Los equipos causantes de las distorsiones armónicas son representados como fuentes ideales donde las corrientes (o tensiones) armónicas son tomadas como valores de régimen continuo, En el caso de cargas con comportamiento no constante, se deben tomar valores con baja probabilidad de ser excedidos en un ciclo de operación.

En la evaluación de una carga especial deben ser consideradas su influencia en todas las configuraciones previstas de el sistema, analizándose también el desempeño frente a otras configuraciones posibles de ocurrir en régimen normal de operación, bien como en las condiciones extremas máximas y mínimas. Los límites establecidos debe ser atendidos para todas esas hipótesis.

Atención especial se debe tomar en este estudio en el sentido de identificar problemas de resonancia localizadas y bien definidas en la red. Estos problemas ocurren normalmente en puntos próximos a los puntos donde existen banco de capacitores. Valores muy elevados de amplificación armónica ( relación entre la impedancia de transferencia y la impedancia propia de la barra donde ocurre la inyección de corriente armónica) pueden ocurrir también en puntos terminales de las líneas de transmisión largas.

Los procedimientos para la evaluación de las perturbaciones provocadas por una carga no lineal en las fases de planificación, pre-operacional y de operación son presentadas a continuación.

**Fase de planeamiento.-** Antes de realizar un estudio más detallado, son necesarias algunas informaciones sobre el comportamiento de la carga especial, tales como característica de la carga, potencia y régimen de trabajo. Esas informaciones deben ser suministradas por el consumidor o por el fabricante del equipo en una fase de negociación que antecede la asignatura del contrato de suministro.

Después de este paso la empresa de suministro debe evaluar la necesidad de realizar estudios de penetración de armónicos tratando de establecer los límites de las corrientes armónicas inyectadas por la carga especial en el punto de entrega, Este estudio sirve también para entregar al consumidor el comportamiento de la impedancia armónica de la red vista desde la barra donde será conectada la carga especial.

El consumidor debe suministrar las corrientes armónicas generadas por los equipos causantes de las distorsiones, las que serán consideradas en el estudio. En el caso en que no se cumplan los límites de tensión por consumidor o los límites de corriente inyectadas en el punto de entrega, el consumidor deberá instalar equipos de filtrado de modo de cumplir con los límites

En la aplicación de estos límites a una carga especial en fase de implantación, se debe buscar el cumplimiento de los límites por consumidor considerando los estudios de simulación apenas con solo su presencia en el sistema, o sea despreciando las distorsiones causadas por las demás cargas. En el caso que este no se cumplan los límites, posiblemente será necesario mejorar los dispositivos de atenuación y filtrado de aquella carga.

Después de que esta definida la configuración de las instalaciones de la carga especial la empresa deberá realizar estudios de penetración de armónicos para verificar se esas alteraciones topológicas no acarrear problemas para otros consumidores o para el sistema eléctrico. En caso afirmativo ella debe proponer y negociar medidas correctivas con el consumidor que se esta instalando.

Para permitir futuras evaluaciones de las instalaciones de la carga especial, la empresa debe mantener un historial de datos de el proyecto, de los equipos de filtrado y de las corrientes armónicas generadas por la carga especial que fueron consideradas en el estudio y servirán de base para su aprobación.

Definidas las medidas correctivas y la verificación de instalación, deben ser establecidos los procedimientos operativos en caso de emergencia del equipo de atenuación de los armónicos, bien como flexibilidades temporales de los criterios ,

Estos procedimientos deben ser parte de un acuerdo operacional entre la empresa suministradora y el consumidor elaborado por el área de operación de la empresa suministradora. En este acuerdo deben estar incluida las responsabilidades de la empresa en la corrección de los problemas que surgan "posteriormente", debido a cambios no previstos en la evolución del sistema. El consumidor debe ser identificado como responsable en el caso de que surgan problemas debido al cambio en las características de sus equipos causantes de distorsión armónica o del equipo de atenuación de las distorsiones.

Para facilitar los procedimientos de medición rutinaria de las distorsiones armónicas en las instalaciones de los consumidores con cargas especiales y en las subestaciones de la propia empresa deben ser realizada la instalación definitiva de transductores de tensión y de corriente específicos, dedicados a la mediciones de armónicos.

**Fase pre-operacional.-** Con información actualizada de el sistema, la empresa debe hacer un revisión de los estudios de penetración de armónicos con el objetivo de identificar los puntos críticos dela red para efecto de la medición de las tensiones armónicas.

Es recomendable que sean realizadas mediciones antes de la entrada en operación de la carga especial para fines de comparación. Para eso deben ser realizadas mediciones previas en los puntos críticos de la red identificados por los estudios.

Durante la fiscalización deben ser medidas, además las tensiones en los puntos críticos de la red, las corrientes armónicas generada por la carga especial y las corrientes armónicas inyectadas en el punto de entrega.

Las tensiones armónicas medidas deben ser comparadas con los limites globales definidos anteriormente. Las corrientes armónicas generadas por la carga especial deben ser comparadas con los valores suministrados por el consumidor u adoptados en los estudios de penetración de armónicos. Las corrientes armónicas inyectadas en el punto de entrega deben ser comparadas con los limites establecidos anteriormente por la empresa de suministro.

**Fase de operación.**- La verificación de los criterios a través de mediciones no es posible realizarlo en todos los puntos de la red . Pero ese problema puede ser controlado en parte por la observación de los puntos críticos de el sistema identificado por los estudios.

Periódicamente, o siempre que se juzgue necesario, en base en mediciones topológicas actualizadas y en las corrientes armónicas generadas por las cargas especiales existentes en la red, La empresa debe de realizar estudios de penetración de armónicas analizando e identificando los puntos criticas.

En estos puntos deben ser realizados mediciones de los niveles de tensión armónica que deben ser comparados con los limites globales, establecidos anteriormente, que garantizan el nivel de compatibilidad, En el caso de que se superen estos limites se debe proceder con una investigación de las causas, el que puede exigir estudios más detallados o mediciones más específicas en los puntos de conexión de las cargas especiales más significativas.

La empresa se debe reservar el derecho de exigir, siempre que juzgue necesario, la comprobación por los consumidores de la adecuación de sus equipos de filtrados y de las corrientes armónicas generada por sus equipos e inyectadas en el sistema eléctrico. Esa comprobación debe ser hecha a través de mediciones. de las cuales la empresa suministradora podrá participar. En caso de que se constate algún desvío. la empresa deberá exigir las debidas correcciones al consumidor.

Cabe a la empresa de suministro adoptar medidas de reducción de los niveles de distorsión armónica, en caso en que la violación de los limites globales no fueran atribuidos a un consumidor específico.

#### 4.4.- DISEÑO DE EQUIPO ELECTRICO Y ELECTRONICO.

Cualquier equipo electrónico o accionado por electricidad puede diseñarse y construirse para soportar los problemas que más puedan esperarse de calidad de la energía. Los fabricante de equipo deben tomar un decisión de negocios pare fabricar

sus productos de manera que soporten las situaciones que pueden esperarse normalmente. Si equipo tiene altos márgenes, el costo agregado puede reducir la competitividad del equipo del mercado. Algunos fabricantes ofrecen dispositivos protectores suplementarios a un costo adicional para el cliente. Otros, reconociendo la actual recientemente alerta de sus clientes, están comenzando a agregar ciertas características de mitigación por calidad de energía a sus productos, sacando modelos nuevos y mejorados.

Los siguientes cambios pueden no ser factibles para todas las situaciones. Toda las modificaciones de los equipos deben analizarse con el fabricante del mismo. Los cambios no autorizados que se hacen al equipo suelen llevar a la invalidez de la garantía de los mismos.

**Adición de capacitores a fuentes de CD.-** Las fuentes típicas de energía de CA a CD contiene un capacitor grande entre las terminales de salida de los rectificadores para el allanar el rizo en el voltaje de salida de CD. El capacitor resiste cambios bruscos de voltaje de duración breve y ayuda a mantener el voltaje de salida de CD. Un capacitor más grande proporciona mayor almacenamiento de energía y amplía la capacidad de arrastre de las fuentes de las fuentes de energía de CD.

**Aislamiento separador de las secciones de equipo sensible.-** Algunos equipos industriales controlados por microprocesadores utilizan las mismos circuitos para energizar el microprocesador y la máquina controlada por este. La separación del suministro de energía del microprocesador, del resto de la máquina hace más económico aplicar acondicionamientos de la energía solo al microprocesador y no a toda la máquina.

**Cambio de taps de los transformadores.-** Los problemas que se experimentan en la operación de algunos equipos, se deben en ocasiones a que se opera al equipo en intervalos bajo de voltaje recomendado o cerca de el. Una caída I.R en todo el



cableado del edificio o una especificación de voltaje incompatible de la máquina puede dar lugar a problemas de operación del equipo.

Muchos transformadores de distribución grandes tienen taps en el secundario. por lo general, por el incremento de unos cuantos puntos porcentuales por tap. El cambio de taps puede dar un voltaje de suministro ligeramente mayor y ayuda a compensar problemas de voltaje marginal. Debe tenerse precaución al hacer esto durante los periodos de carga baja, la caída interna de voltaje del transformador es más baja que a plena carga, lo cual hace posible tener condiciones de voltaje alto.

#### **4.5.- TECNICAS DE INVESTIGACION.**

La relación entre un mal funcionamiento del equipo y un evento de perturbación de energía es obvia si parpadean las lamparas o baja la intensidad de iluminación. Solo es necesario determinar si puede evitarse que se repita la perturbación o si se necesita acondicionamiento de la energía u otra acción. El problema de análisis nace cuando no existe correlación obvia entre el mal funcionamiento del equipo con cualquier otro evento identificable.

##### **4.5.1.- ESTUDIO DEL FLUJO DE POTENCIA DE ARMONICAS.**

Si un sistema de potencia se tiene flujo de señales armónicas, se van a producir distorsiones en la forma de la onda de voltaje, esto se debe a que se superponen los voltajes armónicos a la forma de onda del voltaje fundamental. Cuando se produce resonancia paralelo, el equipo rectificador que se encuentra conectado a la barra problema en estas condiciones, observa una impedancia elevada, es decir se producen oscilaciones de corriente entre la reactancia inductiva del sistema de potencia y la reactancia capacitiva de los capacitores utilizados para la compensación de reactivos.

La modificación de los problemas de flujo de potencia convencionales en la

frecuencia fundamental ( $f_0$ ), vincula el argumento de las expresiones de potencia que son mal utilizadas, con expresiones de corrientes armónicas también mal utilizadas. Para los propósitos de esta explicación, el tipo de barra que aparece en el estudio de potencia armónico de Newton Rapson (FPANR) puede ser limitada por cuatro tipos

- El termino barra lineal debe referirse a la barra de el sistema de potencia usual que no exhibe corrientes de línea distorsionada cuando el voltaje de barra es sinusoidal, ejemplo de barras lineales incluyen cargas convencionales (no rectificadores), y barras de generación convencional
- El termino barra no lineal debe ser utilizado para referirse a cargas o fuentes que causen corrientes de línea distorsionada aun si el voltaje de la fuente es sinusoidal. Ejemplo las barras no lineales son las barras donde los rectificadores, inversores y lamparas fluorescentes son conectadas

Los tipos de barras consideradas son :

1. Barras de oscilación.- Es una simple barra lineal de voltaje regulado.
2. Barras lineales PQ.- Estas son barras en las cuales a la frecuencia fundamental la potencia activa  $P$  y la reactiva son especificadas, usualmente son barras de carga.
3. Barras PQ no lineales.- Estas son barras en las cuales los convertidores y otros aparatos no lineales están conectados.
4. Barras PV lineales.- Estas son barras lineales usuales, en las cuales  $P$  y  $V$  están especificados en la frecuencia fundamental, estas son generalmente barras de generación.

Es importante explicar que variables van a ser consideradas como variables fijas. En el flujo de potencia convencional, las magnitudes del voltaje y el ángulo son utilizados como las variables fijas en las barra PQ, y los voltajes y los ángulos son utilizados en el las barras PV. Para el caso armónico esta lista de variables fijas debe ser expandida considerablemente, es necesario describir cada uno e las voltajes de

barras  $V(t)$  y la corriente de inyección  $I(t)$  en una forma de serie de Fourier completa. Debido a la conveniente relación entre el ángulo de fase de el voltaje de barra y la potencia activa potencia y la correlación entre la potencia reactiva y la magnitud de voltaje en el estudio de potencia convencional utilizamos a  $V$  y  $\delta$  como variables fijas.

La corriente a las secuencias armónicas en las barras PQ lineales es calculada y escrita a continuación:

$$I_{barra}^{(h)} = Y_{barra}^{(h)} \cdot V_{barra}^{(h)}$$

Y los voltajes armónicos en las barras están relacionados a la corriente armónica inyectada a las barras.

$$V_i^{(h)} = Z_i^{(h)} \cdot I_i^{(h)}$$

Unas características del el flujo de potencia armónico son las siguientes:

Las dimensiones de la matriz Jacobino en el caso armónico es mucho más grande que en el caso convencional, típicamente la matriz Jacobino es aproximadamente  $h$  más filas y columnas, donde  $h$  son los armónicos incluidos en el estudio.

Esto no es una limitación en  $h$  pero es oportuno estudiar tantos armónicos como sean posibles para poder reducir el tiempo y los requerimientos de memoria. De esta forma el estudio de solamente las características armónicas se hacen si tal limitación es permisible.

#### 4.6.-TECNICAS DE CANCELACION DE ARMONICAS

##### 4.6.1.-TRANSFORMADORES

##### 4.6.1.1.- TRANSFORMADORES CONECTADOS EN DELTA

Cuando se conectan tres transformadores monofásicos conectados en delta , se observa un voltaje debido a las armónicas antes de cerrar la malla. En transformadores trifásicos, la segunda fase, la fase B es desplazada  $120^\circ$  con respecto

a la fase de referencia, digamos la fase A. La armónica de la fase B esta desplazada  $3 \times 120^\circ$  ó  $360^\circ$  con respecto a la fase A de referencia. Igualmente la tercera armónica de la tercera fase (fase C) esta desplazada  $3 \times 240^\circ$  ó  $720^\circ$  con respecto a la fase A de referencia. Así, es obvio que todas las armónicas que se generan están en fase entre si y en fase con sus fundamentales respectivas. Esto explica por que el voltaje de malla que se mide no es cero antes de cerrar dicha malla.

Pero cuando se cierra la malla, o se conecta un resistor entre sus terminales abiertas, la malla cerrada sirve como "trampa" para las corrientes armónicas. Todas las corrientes impares que se generan por la corriente de excitación del transformador se suman entre si y forman corrientes de circulación alrededor de la delta, como lo hacen las corrientes fundamentales normales de fase de la delta. Si bien es cierto que la corriente adicional circulante que crean las armónicas se suman a las perdidas óhmicas de potencia de los transformadores. La conexión en delta o malla tiene la ventaja, en los sistemas delta - estrella, de mantener el neutro en el centro geométrico de los voltaje de fase y de línea de la estrella del secundario.

#### 4.6.1.2.- TRANSFORMADORES CONECTADOS EN ESTRELLA.

En los transformadores conectados en estrella no aterrizada, se suman entre si las terceras armónicas y las armónicas de orden de múltiplos impares, que tienden a forzar al neutro para sacarlo de su centro geométrico. Esto ocasiona un desequilibrio de los voltajes secundarios, tanto de fase como de línea. Además como no hay trayectoria cerrada para la circulación de las armónicas tanto en el primario como en el secundario de un transformador conectado en estrella - estrella, las ondas de voltaje de salida también se distorsionan. Por este motivo, prácticamente nunca se usan conexiones en estrella sin aterrizar en sistemas de transmisión y distribución de potencia. El neutro se mantiene en su centro geométrico si simplemente se conecta a tierra ya sea en el primario o en el secundario, o en ambos. Con ello se tiene un circuito cerrado para cualquier corriente desbalanceada, o corriente armónica al

conductor neutro

#### 4.6.1.3.-TRANSFORMADORES CON DEVANADO TERCARIOS

La ventaja principal del uso de transformadores con devanado terciario es que la conexión en delta suprime cualquier voltaje de armónicas que se puede generar en los primarios o secundarios conectados en estrella, de los transformadores de transmisión o distribución.

En caso de corrientes de carga desbalanceadas en el secundario, que se reflejan como corrientes desbalanceadas en el primario, se establece una mayor corriente de circulación en los devanados terciarios. Esto tiende a establecer los voltajes de fase tanto en el secundario como en el primario a sus magnitudes y ángulos normales de fase y con ello se disminuye los desequilibrios en el secundario y en el primario.

Los transformadores de devanado terciario se fabrican en la actualidad con capacidad de MVA o KVA. que llegan al 35% de la capacidad total del transformador, sea de transmisión o de distribución. El único tipo de transformador que no se fabrica con devanados terciarios es el polifásico tipo acorazado o de núcleo que emplea laminaciones en forma de E. En este diseño la suma de flujos trifásicos se suma y siempre da cero en la columna del centro. El resultado es que no se generan terceras armónicas debido al flujo del transformador, Ya que no se producen terceras armónicas en este tipo de transformador, puede incluso trabajarse como transformador estrella-estrella sin el empleo de devanados terciarios. Es necesario decir que cuando se conecta el primario o el secundario en delta, no se tienen problemas con armónicas o de desequilibrio, aun cuando se utilicen tres transformadores monofásicos.

## 4.6.2.- CONVERTIDORES.

### 4.6.2.1.- MULTIPLICACION DE FASES.

El termino multiplicación de fases se refiere a la práctica de usar altos ordenes de fase en los circuitos de potencia. La reducción de fase es un método para reducir el impacto armónico de los convertidores ( se analizo en el Capitulo I ). La progresión a un alto orden resulta en un bajo THD en la corriente del convertidor y altas frecuencias que deben ser filtradas. Estas altas frecuencias son fáciles de filtrar debido a que se requieren pequeñas capacitancias y inductancias en el filtro. También las altas frecuencias ocurren a una amplitud baja y esto reduce los requerimientos de filtración. La transformación de un convertidor de 6 pulsos a uno de 12 pulsos ilustra el concepto de la multiplicación de fases: en un convertidor de 6 pulsos, el voltaje trifásico es aplicado al puente Graetz. El numero resultante de pulsos observados en la corriente de la fuente es  $3 \times 2$  ó 6, De aquí el nombre de convertidor de 6 pulsos. En un convertidor de 12 pulsos se utilizan dos puentes Graetz: uno esta energizado a través de un transformador conectado en Y-Y, y el otro de un transformador conectado en Y-Delta. Los dos transformadores, producen, en efecto una potencia de 6 fases, ya que los voltajes aplicado a los puentes Graetz están en ángulos de fase de 0, 60, 120,180, 240, 300 grados. El orden de pulsos es  $6 \times 2$  ó 12. Las fases de ordenes mayores que se utilizan en la conexión de convertidores de 18 y 24 pulsos requieren un voltaje de 9 y 12 fases respectivamente. En general, el orden de pulso es:

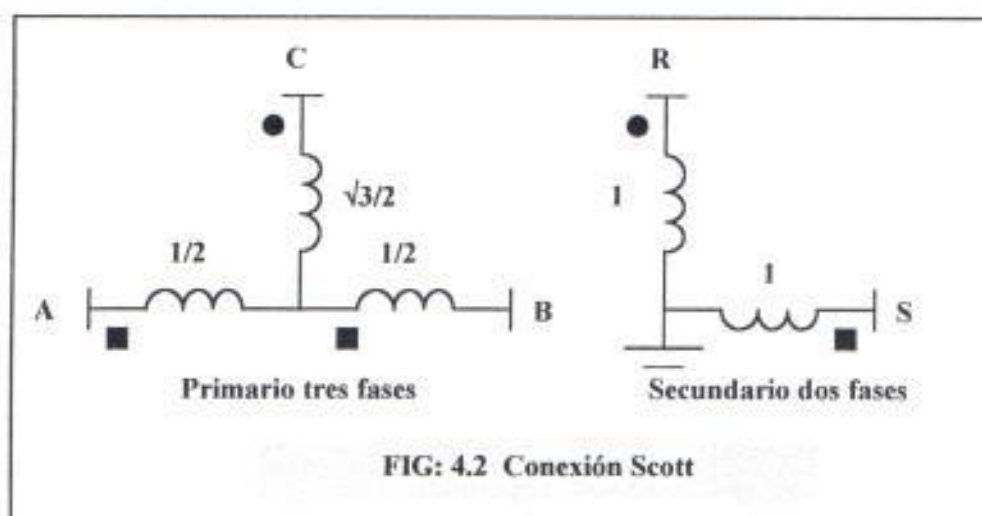
$$\text{Orden de Pulso} = 2 \times \text{Orden de fase.}$$

Hay dos dificultades al respecto de apelar a la multiplicación de fase para la solución de los problemas de calidad de energía: la primera es aquella del costo de generar un orden de fase mayor. Este es el costo de los transformadores de conexiones no estándares y el segundo es que no todo los problemas de calidad de energía son resueltos incrementando el orden de fase. El ejemplo de un convertidor es muy singular en que el impacto armónico de un convertidor es simétrico de fase a fase, la

cancelación de ciertas corrientes armónicas, ocurre debido a la relación simétrica de las fases

. En caso de un horno de arco por ejemplo, el arco en la fase uno no va a tener una fase relacionada con aquel de la fase dos ó en la tres. Así apelando a ordenes de fase mayores no van a ayudar al impacto armónico de la misma forma que el efecto de cancelación obtenida para los convertidores. Cualitativamente el uso de orden de fase mayores, tienden a distribuir la forma de onda irregulares en varias fases, aun en los casos como cargas de hornos de arco. Pero no se espera la cancelación de armónicas.

Existen algunos métodos que pueden ser utilizados, para hacer que la multiplicación de fase sea atractiva desde el punto de vista de costos. Uno de estos es el uso de conexiones de transformadores innovadoras para generar el orden de fase requerido. LA conexión Scott se utiliza para hacer fases en sistemas de tres y dos fases, El lado de tres fases de la conexión es energizada por un terminal de voltaje trifásico. El lado de dos fases es energizado por un voltaje de dos fases al terminal RS y el neutro.



El voltaje  $V_m$  adelanta al voltaje  $V_{sn}$  en 90 grados, Las razones de giro están mostradas en la fig 4.2. La conexión Scott puede ser modificada para obtener una potencia de 12 fases: los lados de dos fases de un transformador están conectados

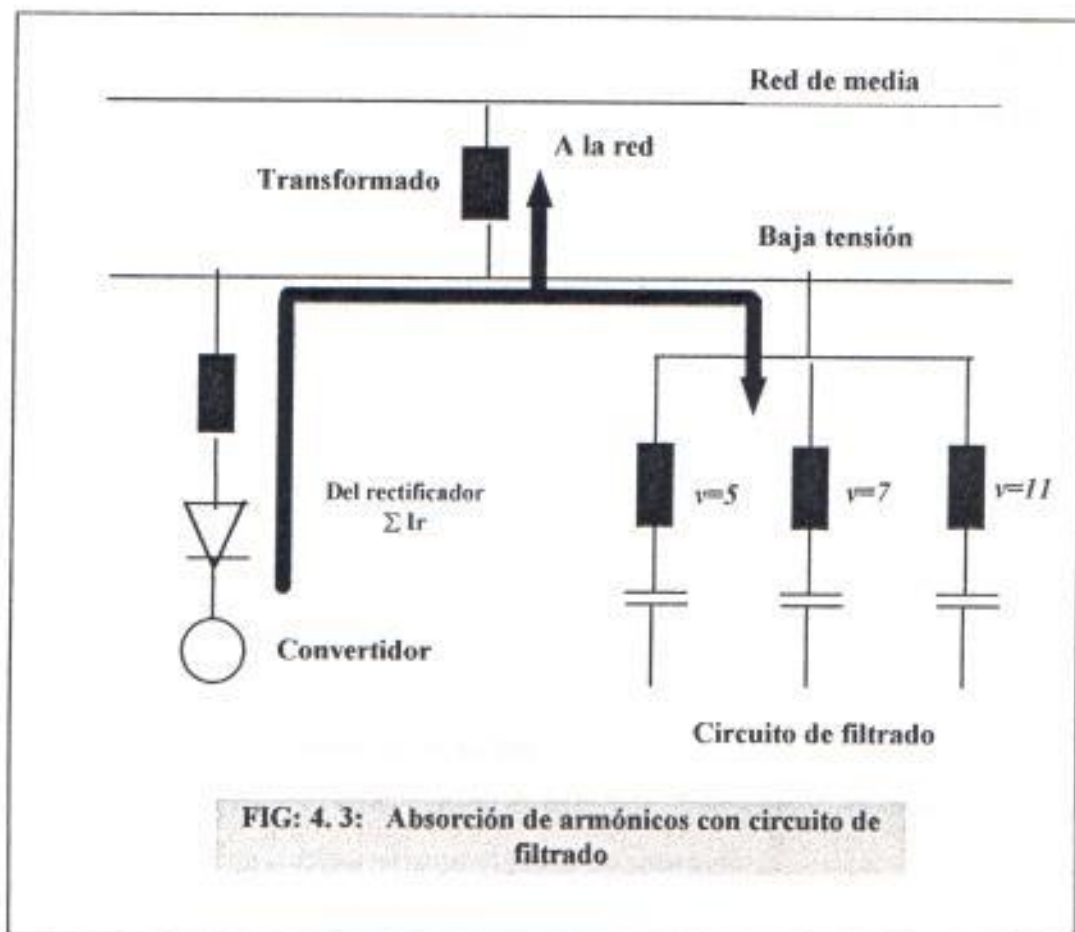
con los tap centrales de las bobinas de fase conectados en común a un neutro, de esta forma la conexión Scott es utilizada como interfase de un sistema de tres y cuatro fases. La conexión de tres transformadores Scott, esta energizada por barras en las cuales sus fases se han elevado por  $-60$ ,  $0$  y  $+60$  grados. El resultado es un sistema tres-cuatro fases en la cual una fase se ha elevado  $30^\circ$ . Esta es una fuente de 12 pulsos la que puede ser utilizada para operar tres puentes Graetz para un convertidor de 24 pulsos .

La alternativa de las conexiones zig-zag, es usualmente costosa debido a los costos de los transformadores requeridos.

#### **4.6.3.- FILTROS ARMONICOS.**

El efecto de las corrientes armónicas en la red de alimentación superpuesta puede se puede reducir a un niveles insignificantes conectando circuitos de filtrado directamente a la parte de baja tensión (fig 4.3). Dichos circuitos en resonancia que emplean reactancias en serie con los condensadores. Los circuitos en resonancia deben estar sintonizados de tal forma que presentan una impedancia para las corrientes armónicas individuales que se aproxime a cero y que sea muy reducida en comparación con la impedancia del sistema de suministro de energía. Las corrientes armónicas de los convertidores son absorbidas de esta forma en gran medida por los circuitos de filtrado, Solamente un pequeño resto entra en el sistema superpuesto de forma que el voltaje se distorsiona en menor grado y las interferencias con otras cargas se evitan en gran medida. Puestos que los circuitos de filtrado representan una carga capacitiva para la frecuencia básica del sistema tráfico toman además de las corrientes armónicas también una corriente capacitiva a la frecuencia de la corriente básica, como resultado contribuyen a compensar la potencia reactiva de los convertidores y de otras cargas del sistema. Pueden identificarse dos tipos de interferencia.





**FIG: 4. 3: Absorción de armónicos con circuito de filtrado**

El primero son las señales indeseables que pueden estar presente en una línea de energía eléctrica y que puede afectar adversamente el sistema en uso. El segundo de las señales indeseables que pueden regresar a la línea desde el sistema en uso, que producen señales de interferencia que son enviadas a otros aparatos o sistemas y ocasionan que estos no cumplan con diversas normas. El mismo filtro se usa para resolver ambos problemas en varios países, las normas usadas para este problema pueden variar de manera importante y requieren que el diseño comprenda bien estos problemas.

A los filtros de potencia se los puede clasificar según el propósito principal que se persiga, ya sea, mejorar la forma de onda de la energía o remover la interferencia electromagnética. En los filtros que se emplean para mejorar la forma de onda, por lo general se trata con frecuencias en la gama de audio. Los filtros para la interferencia electromagnética, por lo general, involucran frecuencias de 455 HZ o

superiores, aun cuando el acoplamiento a las líneas telefónicas a la interferencia con las comunicaciones de baja o muy alta frecuencia pueden ser un problema a frecuencias mucho menores.

Es esencial que los circuitos de filtrado sean proyectados para frecuencias crecientes. Se recomienda que se empleen para el quinto, séptimo, décimo primero y décimo tercero armónico. La potencia reactiva de los condensadores se divide como sigue: 50% para el quinto armónico, 25 % para el séptimo y 25 % para el décimo primero y décimo tercer armónico. En muchos casos es suficiente proveer circuitos de filtrado solamente para el quinto armónico.

Las corrientes armónicas del sistema de alimentación se pueden reducir entre un 70 y 90 %. EL dimensionamiento de los circuito de filtrado se han de basar en:

- 1.- Las corrientes armónicas de las cargas
- 2.- El nivel de armónicos de la tensión de la red de alimentación superpuesta.
- 3.- La reactancia de cortocircuito en el punto de conexión

Generalmente es suficiente dimensionar el filtro para las intensidades armónicas de los convertidores instalados. Los circuitos de filtrado también se pueden emplear a nivel de la distribución primaria particularmente si existen grandes cargas. Esto puede traer una gran ventaja económica.

El sistema de distribución industrial al cual baya a estar conectado el circuito de filtrado deberá estar en todo caso separado del sistema de distribución publico por un transformador propio.

Los filtros en los sistemas de potencia, son utilizados para reducir las armónicas, En realidad los tipos de filtro son dos:

- 1.- Filtros para el lado de corriente continua, aquellos, son relativamente sencillos y baratos.
- 2.- Filtros para el lado de corriente alterna, son más costosos y complicados.

#### 4.6.3.1.- CLASIFICACION DE LOS FILTROS IDEALES.

Se dice que un filtro ideal permite el paso (sin atenuación) de todas las frecuencias dentro de sus bandas de paso y bloquea (con atenuación infinita) todas las frecuencias de sus bandas de bloqueo. Se usan los siguientes tipos básicos de filtros:

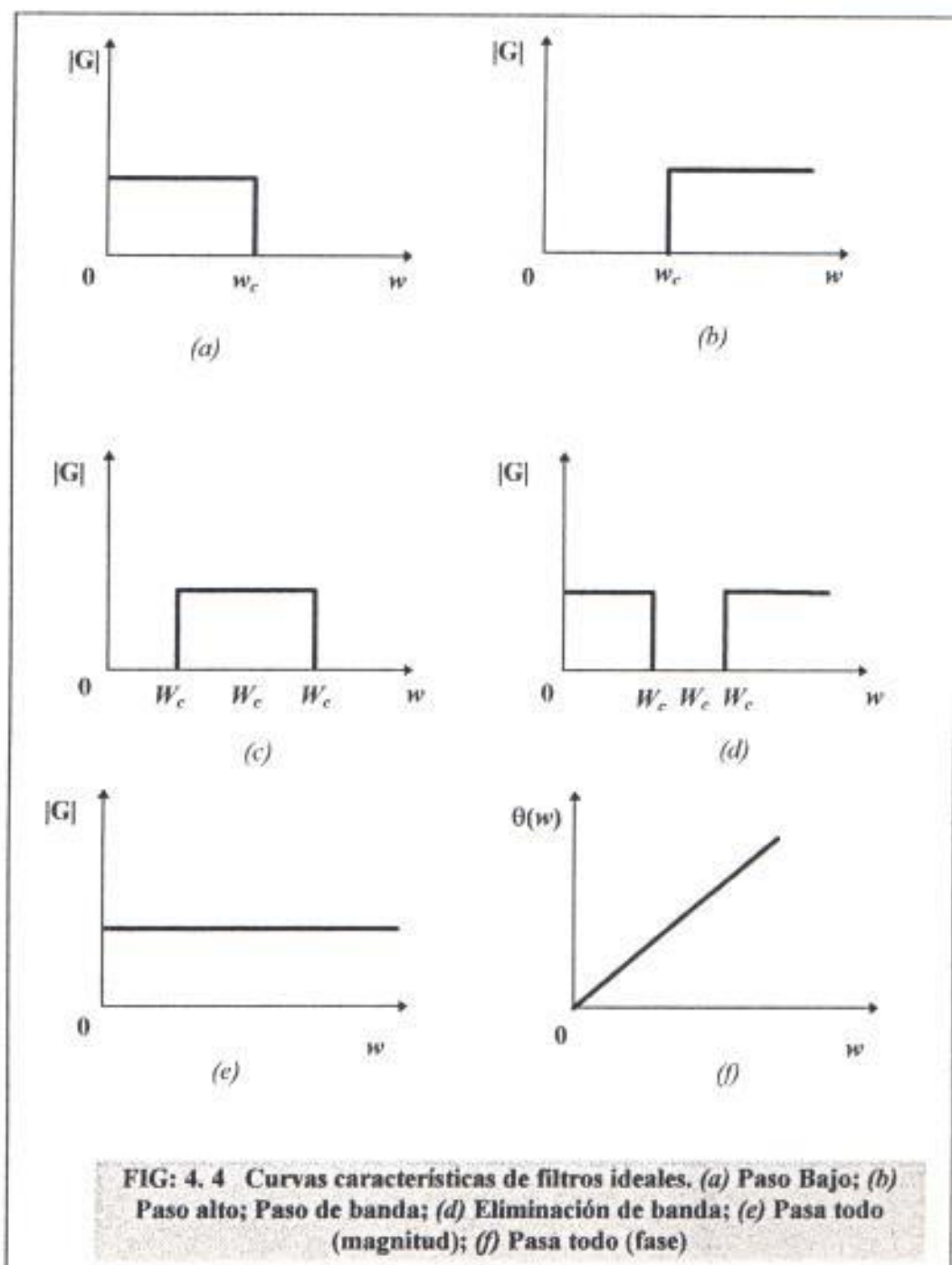
- 1) **Filtro de paso bajo.**- Permite el paso de las frecuencias desde cero hasta su frecuencia de corte y bloquea todas las frecuencias mayores que su frecuencia de corte.
- 2) **Filtro de paso alto.**- Bloquea todas las frecuencias de menores a su frecuencia de corte, y permite el paso de todas aquellas que sean mayores a ella.
- 3) **Filtro de paso de banda.**- Permite el paso de todas las frecuencias situadas entre sus frecuencias de corte inferior y superior y bloquea todas las frecuencias que se encuentren fuera de estos límites.
- 4) **Filtro de eliminación de banda.**- Bloquea todas las frecuencias situadas entre sus frecuencias de corte inferior y superior y permite el paso de todas las frecuencias que se encuentren fuera de esos límites.
- 5) **Filtro pasatodo.**- Deja paso a todas las frecuencias. Su propósito es producir un desplazamiento de fase pronosticable y se usa para producir un retardo de tiempo constante para todas las frecuencias

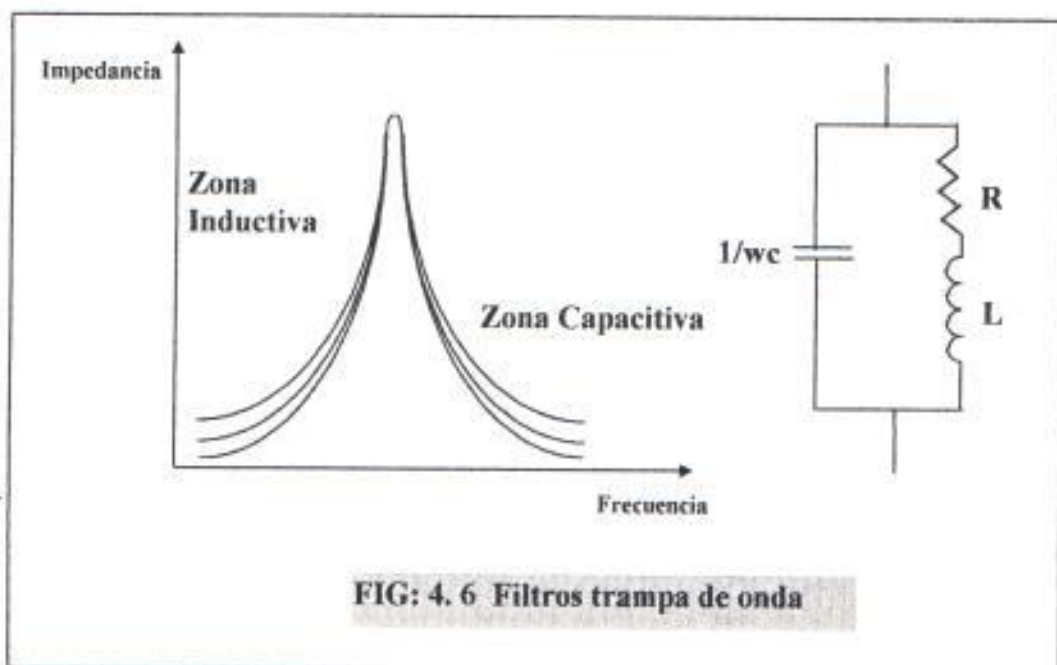
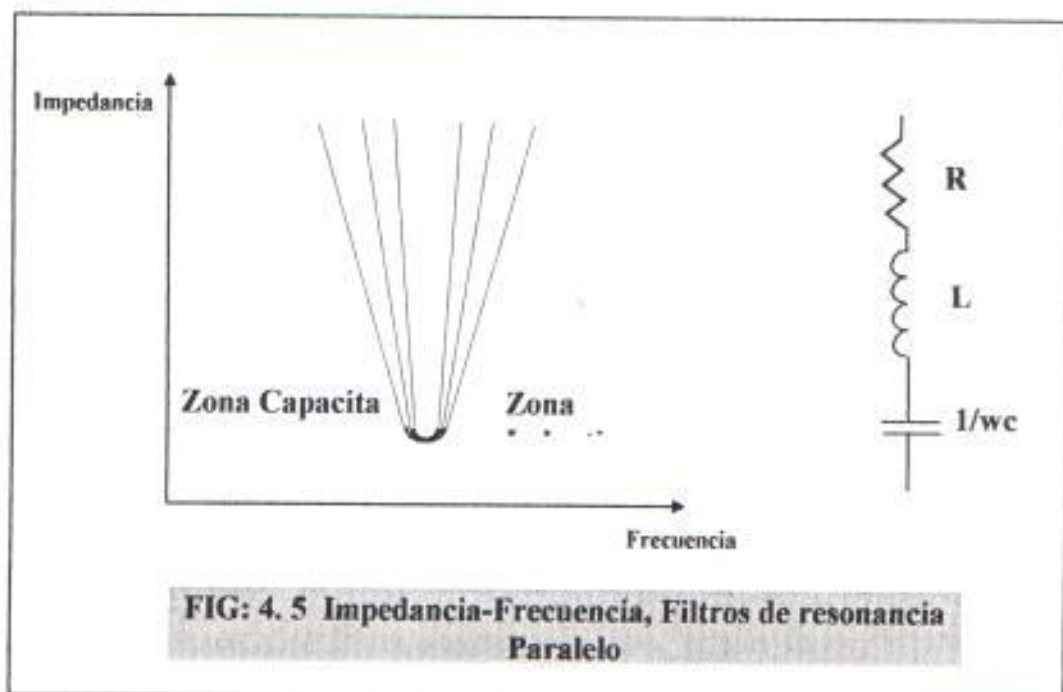
Las curvas características de los filtros ideales se observan en la fig. 4.4

#### 4.6.3.2.- FILTROS DE CORRIENTE CONTINUA.

Los filtros para el lado de corriente continua tienen la función de atenuar el efecto de superposición ( forma de onda tipo diente de sierra ), haciendo la forma de onda de la tensión de la corriente continua, prácticamente una línea recta. Para las aplicaciones de c.d. universalmente se emplean los filtros LC. convencionales pasabajos de sección única. Al inductor generalmente se lo selecciona de un valor mayor del crítico el cual mantendrá una corriente directa para la combinación carga-

rizo en el peor de los casos. Se elige después el capacitor a fin de obtener la reducción deseada del voltaje de rizo. Sin embargo se debe elegir la frecuencia resonante de tal manera que no coincida con una armónica residual por debajo de la frecuencia fundamental de rizo, Aun cuando en teoría estas armónicas de la frecuencia de suministro se cancelan, en la práctica la cancelación nunca es perfecta.





### 4.6.3.3.- FILTROS DE CORRIENTE ALTERNA

Los filtros para el lado de corriente alterna, aquellos sintonizados, tienen por objetivo comportarse como un cortocircuito virtual para las frecuencias que se desean eliminar.

### 4.6.3.4.- FILTROS SINTONIZADOS

Un filtro sintonizado simple es empleado para controlar armónicas en una frecuencia especificada. La impedancia característica es grande cerca de la frecuencia sintonizada. Los filtros sintonizados son de dos tipos, denominados comunmente por:

**a.- Filtros de resonancia paralelo.-** Estos tipos de filtros consisten en un reactor y un capacitor conectados en serie, su combinación conectada en paralelo con el circuito. Su característica impedancia-frecuencia, se muestra en la fig 4.5.

**b.- Filtro trampa de onda.-** Estos tipos de filtros consisten en un reactor y un capacitor conectados en paralelo, su combinación conectada en serie con el circuito. Su característica impedancia-frecuencia, se muestra en la fig 4.6.

El diseño del filtro depende sobre los máximos niveles armónicos permisibles y el aumento de la potencia reactiva requerida. La principal característica de un filtro sintonizado a parte de la frecuencia a la que actúa como tal, es la constante del filtro "Q". Esta constante se denomina FACTOR DE CALIDAD, la cual es la relación de la reactancia del reactor a la resistencia de la combinación, todo a la frecuencia fundamental.

EL factor de calidad "Q", determina la agudeza de sintonización y la mínima impedancia para cada rama del filtro. Un valor típico de Q, esta en el rango, desde

30-60 para un filtro ramificado y un resistor en serie, a veces se utiliza valores inferiores a 30, a fin de prevenir las pérdidas producidas por las altas frecuencias. Un valor alto de  $Q$ , da como resultado una impedancia baja del filtro en la frecuencia resonante, pero también resultan menos variaciones de pérdidas en los parámetros del filtro pudiendo ser tolerables.

Un valor alto de  $Q$ , será necesario si una resonancia paralelo es encontrada cerca de la armónica característica. Otra solución a este problema, es incluir un resistor amortiguador en paralelo con el filtro  $R$  y  $L$  ó despreciar la desintonización del filtro aboliendo problemas resonantes.

Para poder encontrar el valor de la reactancia del filtro paralelo, es necesario recordar la relación de resonancia ( a la frecuencia  $f$ ):

$$X_{L,f} = X_{C,f} \quad (\text{Ohm}) \quad (101)$$

Se trata de lograr que a la frecuencia " $f$ " determinada, la reactancia inductiva del reactor sea igual a la reactancia capacitiva del capacitor, el orden del armónico no es sino la relación entre la frecuencia " $f$ " y la frecuencia fundamental " $f_0$ ", así:

$$h = \frac{f}{f_0} \quad (102)$$

$$X_{L,0} = \frac{X_{C,0}}{h^2} \quad (\text{Ohm}) \quad (103)$$

Es muy importante tener presente la capacidad térmica del capacitor, puesto que por dicho elemento fluirán elevadas corrientes y, deberá estar diseñado para soportar los consiguientes sobrevoltajes.

#### 4.6.3.5.- FILTROS PASO-BAJO

Un filtro paso bajo es aquel dispositivo por medio del cual todas las señales comprendidas en la banda  $0 < f < f_l$  se transmiten sin pérdidas, mientras que aquellas señales con frecuencias fuera de esa banda, es decir  $f > f_l$ , da una transmisión nula.

La respuesta ideal de un filtro paso bajo se muestra en la fig 4.7, en realidad esta característica es irrealizable.

Anteriormente se había tratado los filtros sintonizados, en los cuales su sintonía se la obtiene normalmente por medio de tap de los reactores que sirve como parte del filtro. Un filtro paso bajo, es sino un filtro paralelo no sintonizado, estos filtros no sintonizados consisten en un reactor en serie con el suministro o la fuente y, un capacitor paralelo con cada fase. Este tipo de filtro del lado de corriente alterna son utilizados para convertidores estáticos de potencia de pequeño tamaño, Un diagrama se muestra en la fig 4.8.

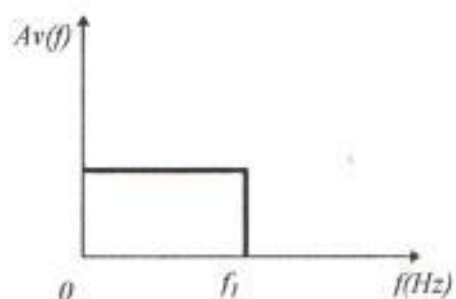
La combinación de un reactor serie y un capacitor paralelo proporciona una frecuencia natural menor que la más baja frecuencia del convertidor, la cual se encuentra por debajo de los 300 Hz. Es necesario realizar una investigación de la efectividad del filtro no sintonizado analizando su comportamiento en una banda de frecuencia desde 60 Hz hasta los 1380 Hz.

#### 4.6.3.6.- DISEÑO DE FILTROS

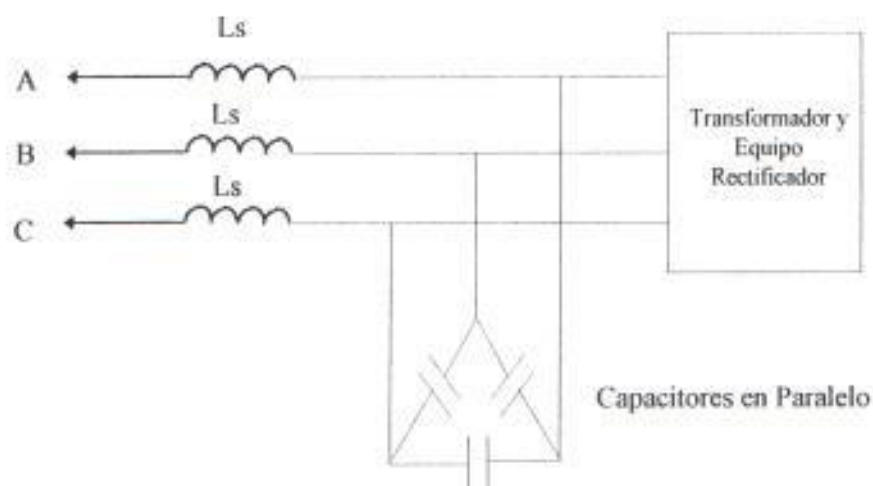
Si es requerida la supresión de las corrientes armónicas, es necesario la utilización de filtros paralelos, los cuales producen la reducción del flujo de las corrientes armónicas en los sistemas de potencia. Los capacitores pueden prever compensación de reactivos como bien pueden ser un importante componente del filtro.

La capacidad de un filtro armónico a.c. esta determinado por la potencia reactiva que el filtro suministra a la frecuencia fundamental a.c. Que es semejante a la potencia





**FIG: 4.7** Característica ideal de un filtro paso Bajo



**FIG: 4.8** Diagrama esquemático de un filtro paso bajo (Filtro paralelo no sintonizado)

reactiva suministrada por el capacitor.

El criterio ideal en el diseño del filtro es la eliminación de todo los efectos de los armónicos estudiados anteriormente, incluyendo la interferencia telefónica que es la más dificultosa de eliminar completamente. Para minimizar estos efectos, con el objetivo de obtener niveles armónicos aceptables en el punto de conexión de la carga especial con los otros consumidores, se han diseñado diferentes filtros armónicos expresados en términos de la corriente y voltajes armónicos, es más conveniente en el diseño de filtros, el criterio basado en los voltajes armónicos por que este garantiza límites de voltaje aceptables sin que limiten los valores de corriente.

Al realizar un diseño de filtros, algunas decisiones deben ser realizadas, las cuales permitirán continuar con el resto del diseño, entre ellas se tiene:

- 1.- ¿Cual es la cantidad de VAR que necesita la carga conectada a la barra problema?
- 2.- ¿Cual es la cantidad de VAR que debe ser aumentada?
- 3.- ¿Cual es el voltaje en la barra problema, analizándolo a carga nominal, sin carga y con sobrecarga?
- 4.- ¿Si a caso la variación de voltaje es muy grande, existen máquinas sincrónicas que pueden ser equipadas con reguladores de VARS?
- 5.- ¿Si la respuesta es negativa, que tipo de control de VARS incluyendo capacitores, ajustara a este tipo de problema?
- 6.- Es necesario decir la cantidad de filtros que deberán ser empleados. Generalmente se tienen filtros sintonizados para la quinta, séptima, undécima y decimatercera armónica, en algún sistema de potencia se utilizan un filtro paso alto,

todo depende del criterio del diseñador.

7.- La filosofía del diseño de filtro debe ser decidida, Es decir que se debería definir un tipo de filtro denominado FILTRO MINIMO, el cual suprime la armónica al menor costo y suministra la compensación de reactivos, pero a veces se tiene que sacrificar una de estas características.

8.- Usualmente el tamaño del filtro sintonizado a la quinta armónica (el capacitor), será de mayor tamaño que los filtros para las señales armónicas de orden elevado. La recomendación realizada por la norma ANSI Standar C55.1 es:

- a) KVAR: 135 %
- b) Corriente: 180 % del valor RMS
- c) voltaje: 110 % del valor RMS.

El tamaño del capacitor normalmente deberá ser seleccionado basándose en los requerimientos de compensación de potencia reactiva. Este banco total, es dividido en varios bancos, de acuerdo a la cantidad de necesaria de filtros a utilizarse para la atenuación de las señales armónicas en el sistema de potencia que se esta estudiando, puede ser 2, 3, 4 ó 5 bancos. De manera particular el banco total de capacitores es completamente arbitraria, Generalmente se instalan filtros de quinta, séptima, undécima, decimatercera y decima-séptima armónica.

El criterio en el diseño del filtro depende generalmente:

- 1) Fuente armónica a tratar.
- 2) Admitancia del filtro y del sistema.

El tipo de filtro usado en los sistemas a.c. que alimentan convertidores, es

normalmente del tipo paralelo por que:

a) Son capacitivos a la frecuencia fundamental y producen valiosos voltajes reactivos en adelanto.

b) No aumentan apreciablemente la regulación del sistema de a.c.

c) La reactancia de conmutación del convertidor es tan baja como sea factible, ya que el filtro es substancialmente un cortocircuito para la corriente armónica.

d) Para un sistema de c.a. la impedancia variable es desconocida, es más fácil garantizar una tensión de armónica dado en los terminales a.c ( aun en cualquier punto del sistema.)

El filtro más sencillo es el tipo simple de banda ancha paso-bajo, para atenuar las armónicas de orden quinta, y superiores, dejando pasar la fundamental; desgraciadamente, el valor de la capacitancia el la práctica resulta excesivo. El otro extremo consiste en disponer muchas ramas resonantes en paralelo. Sintonizados para las armónicas de orden quinto, séptimo, décima primera, décima tercera,...etc, idealmente se necesita un numero infinito de ramas.

En un sistema trifasico una disposición adecuada es conectar en estrella los filtros de cada fase, poniendo el neutro en tierra. Es posible una conexión en triángulo, pero normalmente no tienen ventaja; por ejemplo no suprimen los armónicos de tensión de secuencia cero en el sistema c.a. y es más caro de aislar a tierra, instalado en un sistema de alta tensión.

#### **4.6.3.7.- COMPONENTES DE LOS FILTROS.**

Los capacitores que se emplean en los filtros se requieren para permitir el paso de corrientes elevadas. Por lo tanto deben ser de contracción de armadura extendida y

con un dieléctico de baja pérdida en la baja de frecuencia requerida. Los capacitores de papel y aceite, de película de plástico, de policarbonato o de mica, son, por lo general apropiados pero se deben elegir los que tengan los que tengan valores nominales de transitorios adecuados y de estado estacionario. Los filtros para aplicaciones de cd casi siempre emplean capacitores electrolíticos por su bajo costo y menor volumen incluso si su capacidad de corriente de rizo limitada requiere de un sobrediseño de filtro a fin de que se conserve dentro de los valores nominales.

Los reactores para filtros c.a. pueden ser de núcleo de aire o de hierro, dependiendo de la inductancia que se requiera de los valores nominales en kilovoltioamperes y de la gama de frecuencia. Incluso los inductores con núcleo de hierro se diseñan con un entrehierro que determina la inductancia. El diseño de los inductores de baja pérdida es complicado por el efecto película y la capacidad del devanado, lo cual a menudo dicta el empleo de conductores de cinta, tabulares o de Litz y por la dispersión del flujo en el entrehierro, lo cual puede requerir el empleo de hierro pulverizado para distribuir el entrehierro.

El filtro de línea de energía eléctrica es un filtro de paso bajo ( se analizara más adelante) que se coloca tan cerca como sea posible de las conexiones de un aparato. Por lo general, son circuitos LC de primer orden ( un capacitor en paralelo o un inductor en serie), de segundo orden ( una sección L) o de tercer orden ( una sección  $\pi$ ). Las secciones básicas se extienden para sistemas monofásicos, tráfico y multifásicos.

## CAPITULO V

### APLICACIÓN DE EL PROGRAMA WHARMZW PARA EL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA TÍPICO CON CARGAS NO LINEALES.

#### 5.1 SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA A ANALIZAR

SICOM es un fabricante de compresores herméticos que utiliza en gran escala hornos de inducción. Se le suministra tensión a 11.9 Kv a través de un transformador de 15 MVA. Este mismo sistema eléctrico alimenta a otras tres industrias que también poseen hornos de inducción (cargas no lineales) de menor potencia Engemasa, FBM y Wimor. El diagrama unifilar de el sistema se observa el la fig. 1

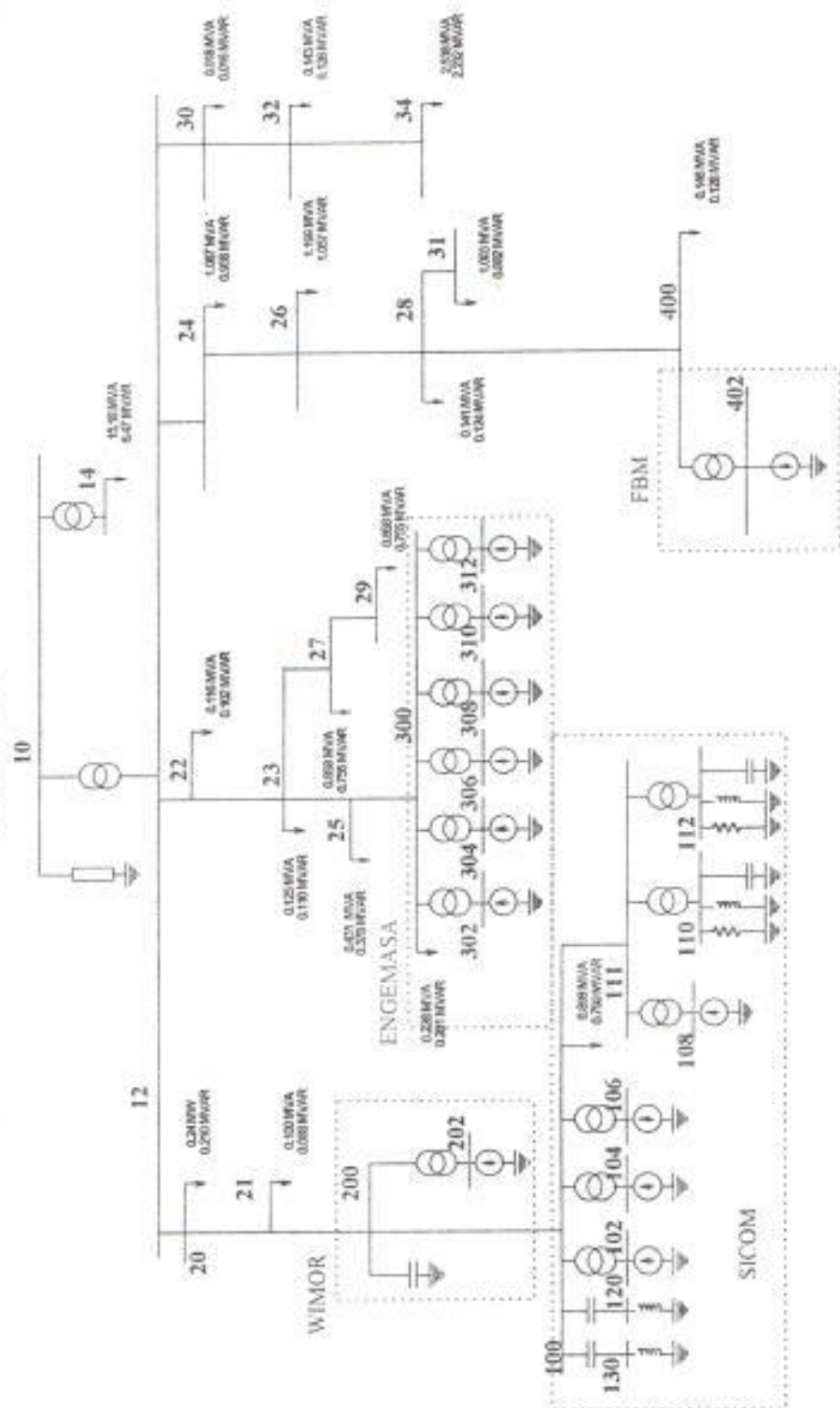
SICOM es una industria metalúrgica que tiene la mayor carga no lineal y la demanda contratada más alta en el sistema.

Existen dos clases de hornos de inducción en SICOM.

El modelo 1, es un horno más moderno y más eficaz. La industria posee cuatro unidades de este tipo con potencias de 1250 KW, 2x 1000 KW y 2500 KW, opera a una frecuencia industrial aproximada de 300 Hz. Los tres primeros consisten en un rectificador de seis pulsos con un tiristor inversor y están conectado al sistema de distribución a través de transformadores individuales delta - estrella aterrizada., el horno de 2500 KW posee dos rectificadores de seis pulsos en paralelo alimentado por un transformador que no fue suministrado por el fabricante. La potencia total de los hornos modelo uno es de 5750 KW.

El otro tipo de horno, el modelo 2 es un horno más antiguo, la industria posee dos unidades de este tipo con potencias de 670 KW cada uno, opera a la frecuencia industrial (60Hz) variando la producción a través de el ajuste de las tomas de un autotransformador. La potencia de todos los hornos de SICOM trabajando simultáneamente es de 7090 KW lo cual es un 54 % más alta que la máxima

FIG: 5.1 DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE POTENCIA A ANALIZAR



demanda contratada por la empresa 4600 KW esto nos indican que todos los hornos no funcionan simultáneamente

Los problemas reportados son altos niveles de armónicos en el sistema y en SICOM la quema de los SCRs del horno modelo 1, y la quema del transformador de el horno modelo 2. La solución empírica adoptada por la industria fue limitar la potencia de operación de los hornos tipo 2 a un 60 % de su potencia nominal, restringiendo la operación de los tap. Esto resolvió el problema de la quema del equipos pero resulto en la pérdida de producción.

SICOM posee un banco de capacitores para la corrección de el factor de potencia de 2 MVAR, colocado en la barra de entrada. (barra 100).

El estudio de las distorsiones que se realizaron fueron hechos desde dos puntos de vista diferentes, el primero es de la empresa suministradora de energía la cual trata de identificar las industrias que inyectan distorsiones armónicas en niveles más altos que los recomendados al sistema. Una vez identificada la industria que es la fuente de el problema, el segundo punto de vista analiza y soluciona el problema dentro de esta industria ya que este es su responsabilidad.

El análisis consiste en buscar las causas y la solución de el problema, sin la restricción de la potencia.

#### 4. DATOS E INFORMACION DEL CASO A ANALIZAR

En el caso de análisis los criterios a ser utilizados en la limitación de los niveles de distorsión armónica de tensión y corriente causados por los consumidores individuales y por la empresa suministradora, están basados en la norma IEEE 519. Para valores de tensión menores a 69 KV, la norma IEEE 519 recomienda niveles máximos de distorsión de tensión de 3 % para cada armónico individual y 5 % para la distorsión total. Estos valores son definidos como los valores máximos aceptables en cualquier punto de el sistema en el peor caso de operación con duración superior a una hora.



Los límites máximos recomendados por la norma para la corriente inyectada en el sistema para cada consumidor varían en función de el porte de el consumidor. Esta variación fue expresada en función de la corriente de corto circuito en el punto de acople común (PCC) y la corriente de demanda máxima de el consumidor.

Para el caso estudiado tenemos:

Factor de potencia en la entrada de SICOM. = 0.9 en atraso.

Potencia activa máxima contratada por SICOM = 4600 W

Potencia compleja :

$$S = \frac{P}{fp} = \frac{4600W}{0.9} = 5.111 MVA$$

Corriente base:

$$I_{base} = \frac{S}{\sqrt{3} * V} = \frac{5.111 MVA}{\sqrt{3} * 11.9 KVA} = 248 Amp.$$

Impedancia base:

$$X_{base} = \frac{V^2}{S} = \frac{(11.9 KV)^2}{5.11 MVA} = 27.71 \Omega$$

Impedancia equivalente vista por SICOM:

$$X_{Eq} = 1.419 \Omega$$

$$X_{Eq, pu} = \frac{1.419 \Omega}{27.17 \Omega} = 0.05120 pu$$

Corriente de corto circuito:

$$I_{CC} = \frac{1}{X_{Eq, pu}} = \frac{1}{0.05120 pu} = 19.529 pu$$

Corriente de corto circuito en Amp:

$$I_{cc} = I_{cc,pu} * I_{Base} = 19.529 pu * 248 Amp = 4.839 K Amp.$$

Razón de corto circuito  $S_{cc}$ :

$$S_{cc} = \frac{I_{cc}}{I_{Base}} = \frac{4.839 K Amp.}{248 Amp.} = 19.529$$

### D I S T O R C A O T O T A L E T. I. F.

BARRA	NOM.	DISTRORSION TOTAL (%)			TIF				
		VECTORIAL	COG	QUADRATICA	VECTORIAL	COG	QUADRATICA		
BARRA100	100	9.767	9.262	4.440	9.845	137.796	81.540	67.811	151.734
BARRA200	200	9.421	8.923	4.262	9.493	133.286	78.613	65.258	146.819
BARRA300	300	6.405	6.053	2.490	6.544	99.179	50.860	37.638	108.110
BARRA400	400	5.790	5.453	2.308	5.876	85.782	46.033	35.542	93.217
BARRA12	12	5.668	5.329	2.375	5.713	81.535	44.039	34.377	87.944

TABLA 5.1 Distorsión total de tensión y TIF en los puntos de acople común de las industrias con cargas no lineales

### D I S T O R C A O T O T A L E T. I. F.

BARRA	NOM.	DISTRORSION TOTAL (%)			TIF				
		VECTORIAL	COG	QUADRATICA	VECTORIAL	COG	QUADRATICA		
BARRA200	200	2.418	2.233	1.474	2.515	96.703	32.200	24.417	59.062
BARRA300	300	4.717	4.404	2.313	5.355	99.271	58.148	41.277	101.762
BARRA400	400	3.230	3.000	1.701	3.844	71.080	43.856	36.467	73.806
BARRA12	12	2.651	2.470	1.292	3.272	57.609	32.092	24.526	58.892

TABLA 5.2 Distorsión total de tensión y TIF en los puntos de acople común de las industrias con cargas no lineales (sin SICOM)

### D I S T O R C A O T O T A L E T. I. F.

BARRA	NOM.	DISTRORSION TOTAL (%)			TIF				
		VECTORIAL	COG	QUADRATICA	VECTORIAL	COG	QUADRATICA		
BARRA100	100	9.767	9.262	4.440	9.845	137.796	81.540	67.811	151.734
BARRA1000	102	15.223	14.910	9.011	16.012	278.661	200.917	184.645	301.425
BARRA181000	104	15.202	14.898	9.989	15.988	276.129	200.409	184.128	300.877
BARRA12500	106	14.214	13.754	8.905	14.677	253.145	189.703	177.948	273.077
BARRA1250	108	14.748	14.497	8.613	15.486	263.175	189.193	174.135	285.529
BARRACANAGTO	110	27.458	27.448	12.434	27.485	78.031	73.938	35.215	78.435
FICT-CANAGTO	111	9.852	9.354	4.477	9.929	137.468	81.309	67.587	151.305
BARRACANS670	112	27.458	27.448	12.434	27.485	78.031	73.938	35.215	78.435

TABLA 5.3 Distorsión total de tensión y TIF en las barras dentro de SICOM

La relación de corto circuito es de el orden de 20, consideraremos como valores máximos el 4 % para las corrientes armónicas individuales y del 5 % para la distorsión total de corriente.

Los tipos de mediciones que se realizaron fueron los siguientes:

- 1.- Mediciones periódicas.- Contienen los resultados de las mediciones periódicas cada cuatro horas durante tres meses.
- 2.- Instantáneas.- Contiene solamente aquellas mediciones que son mayores que los límites de la norma recomendada captadas en un instante de tiempo y son las utilizadas en el programa WHARMZW.

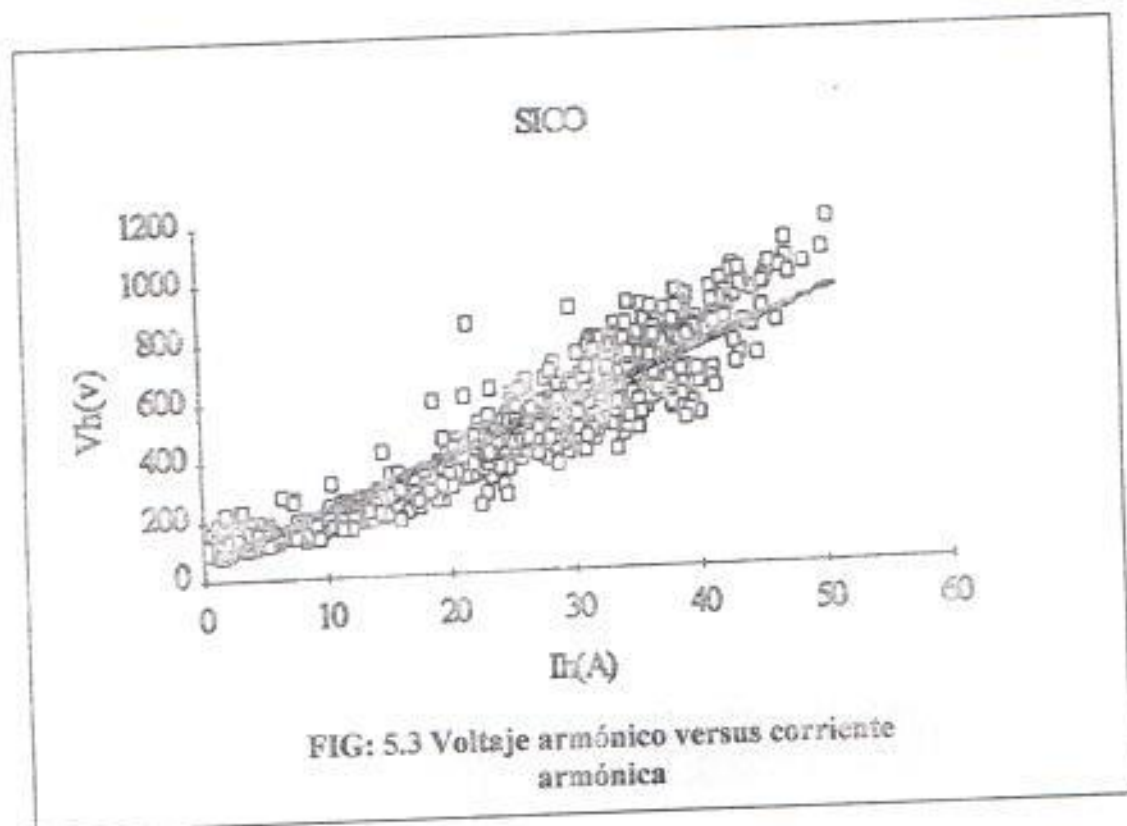
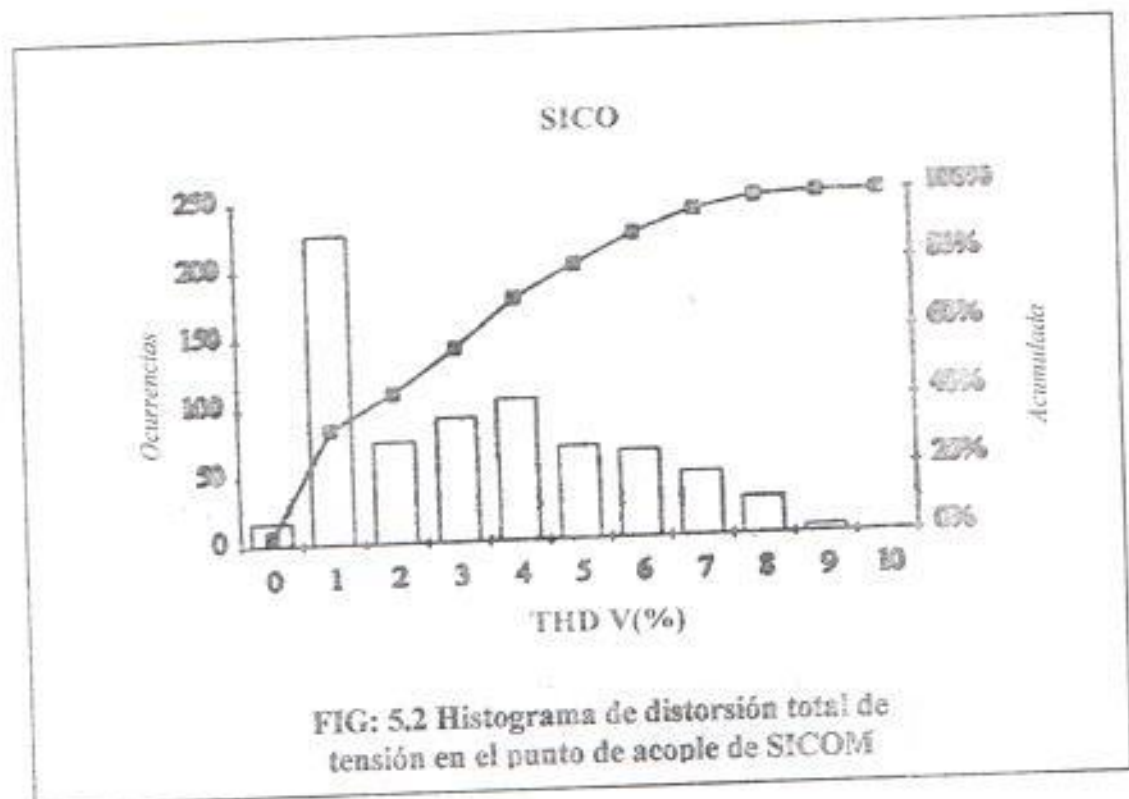
Los puntos donde se realizaron las mediciones directas principalmente fueron dos: El punto común de acople de SICOM (barra 100), en la barra donde esta conectado el horno modelo 1 que trabaja a 300 Hz (barra 108) y la barra donde esta conectado el horno modelo 2 que opera a 60 Hz (barra 110). Adicionalmente se tomaron valores del espectro de corrientes armónicas en cada una de las cargas no lineales consideradas fuentes de corrientes armónicas. El programa permite analizar el comportamiento de el sistema en cualquier punto.

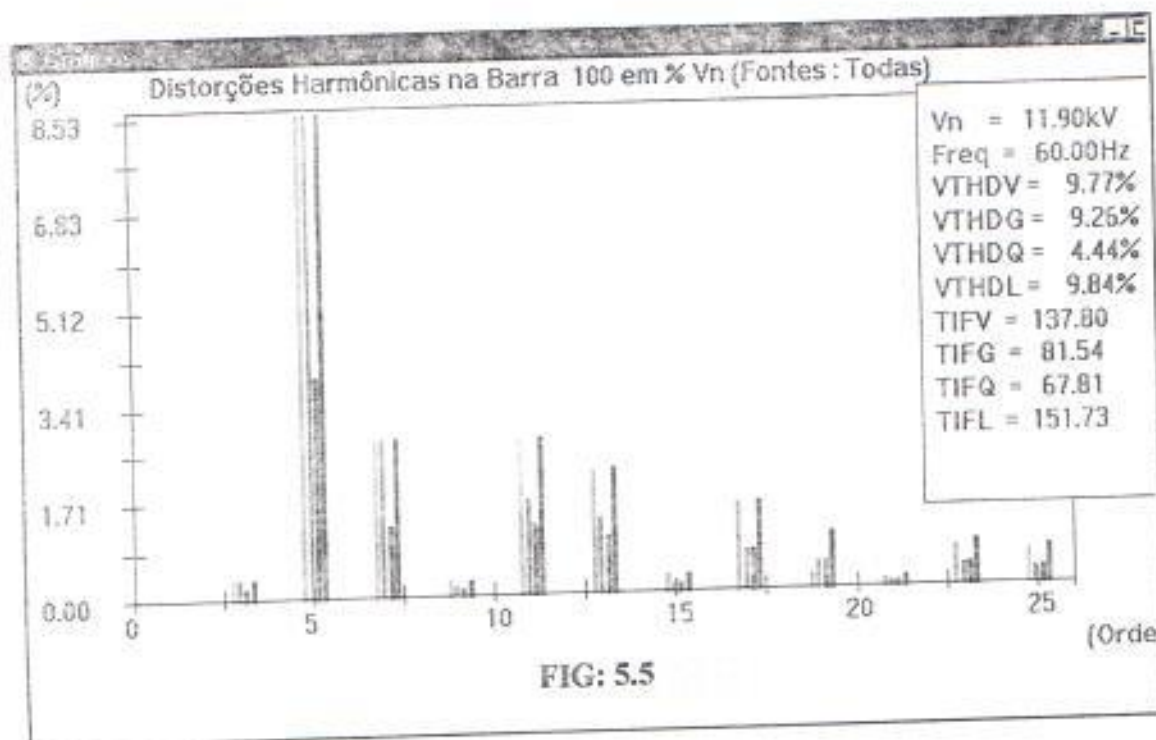
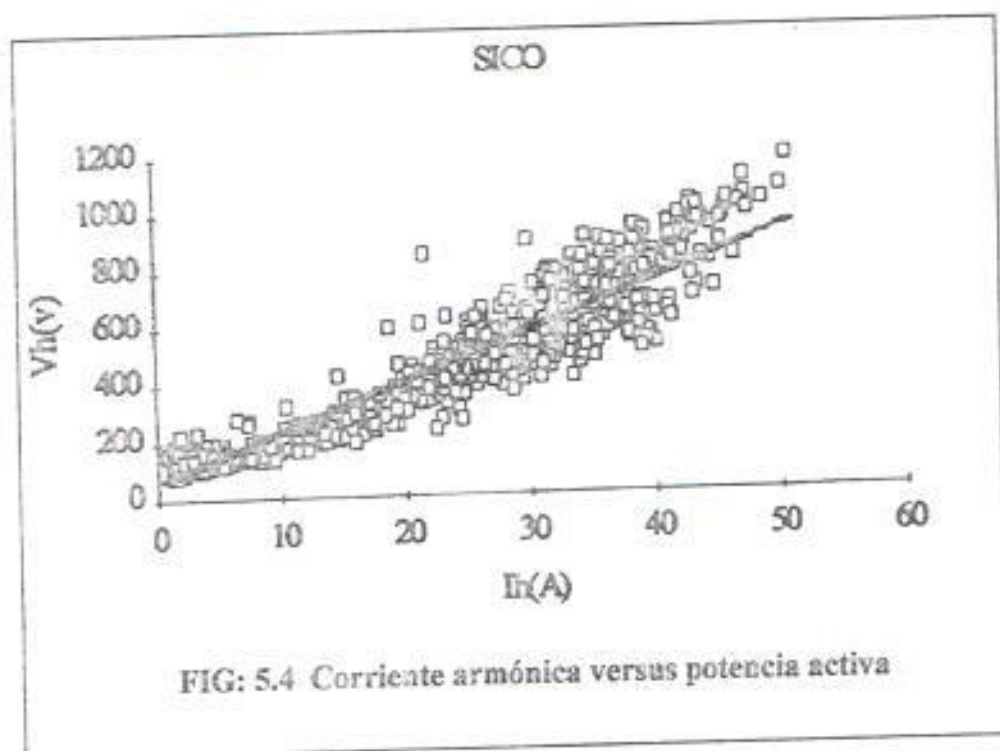
### 3. IDENTIFICACION DE LA CAUSA DEL PROBLEMA

#### 5.3.1 DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA EMPRESA SUMINISTRADORA.

Desde el punto de vista de la empresa suministradora.

Para las condiciones iniciales en las que se encontró al sistema, trataremos de identificar cual de las industrias que poseen cargas no lineales es la causante de el problemas de las distorsiones armónicas. De los resultados arrojados por el programa, (tomando las mediciones desde una base de datos instantánea), para el análisis de la distorsión armónica total de tensión que muestran en la tabla 1, daremos principal importancia a los datos mostrados en los puntos de acople común de las industrias SICOM (barra 100), WIMOR (barra 200) ENGEMASA (barra 300),





FBM (barra 400) y en la subestación San Carlos (Barra 12).

Como se puede ver todo los valores de la distorsión total de tensión sobrepasan los límites establecidos por la norma IEEE 519 que es de el 5 %, siendo el de mayor valor el encontrado en el punto de acople común de SICOM (barra 100) con 9.845 % le sigue WIMOR con 9.493 %, ENGEMASA con 6.584 % y finalmente FBM con 5.876 %.

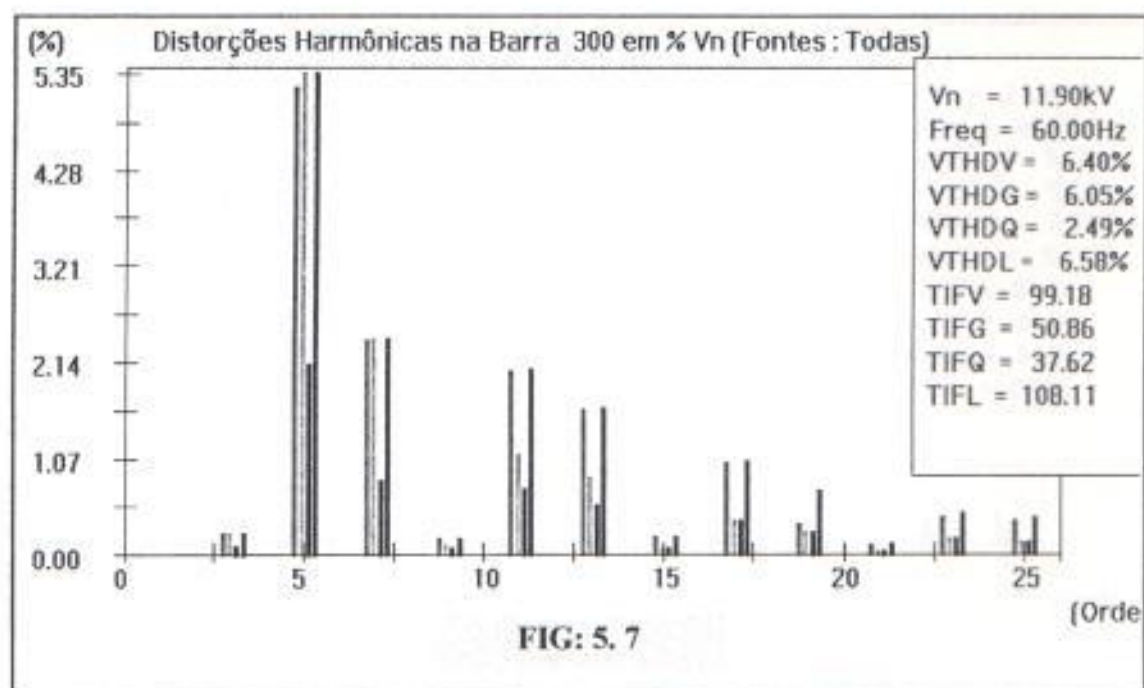
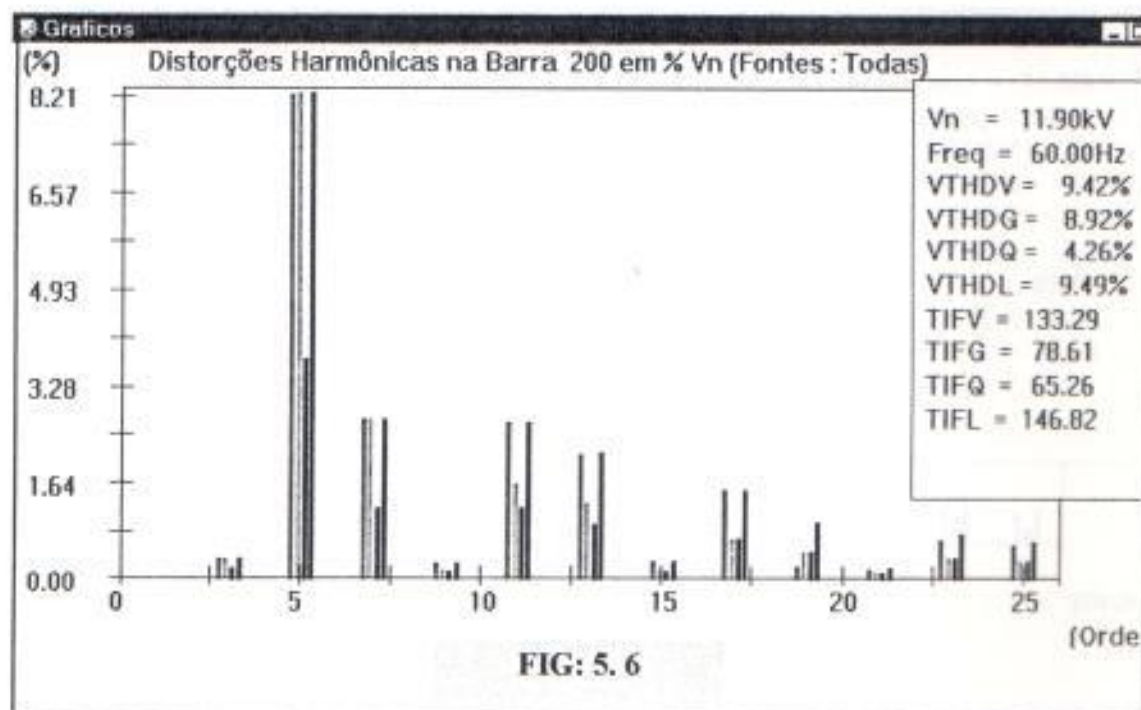
Las barras donde están conectadas las fuentes armónicas para cada una de las industrias, son las que presentan los más altos niveles de distorsión y de estas las fuentes armónicas conectadas en SICOM son las mayores. De las mediciones tomadas desde una base de datos periódica analizaremos los siguientes histogramas.

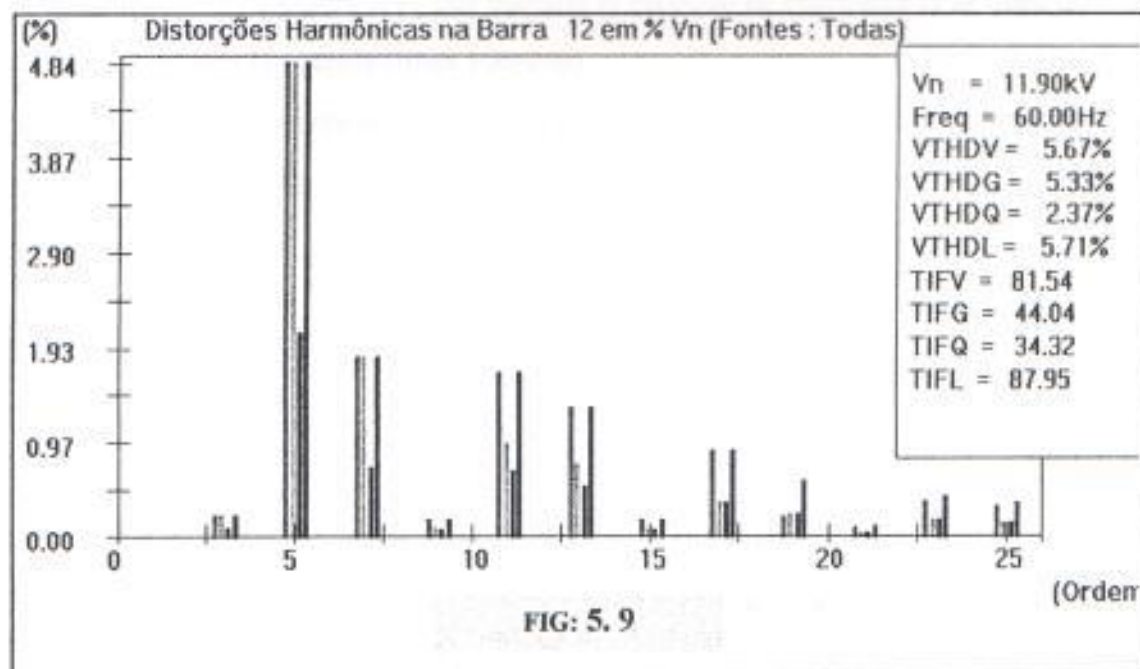
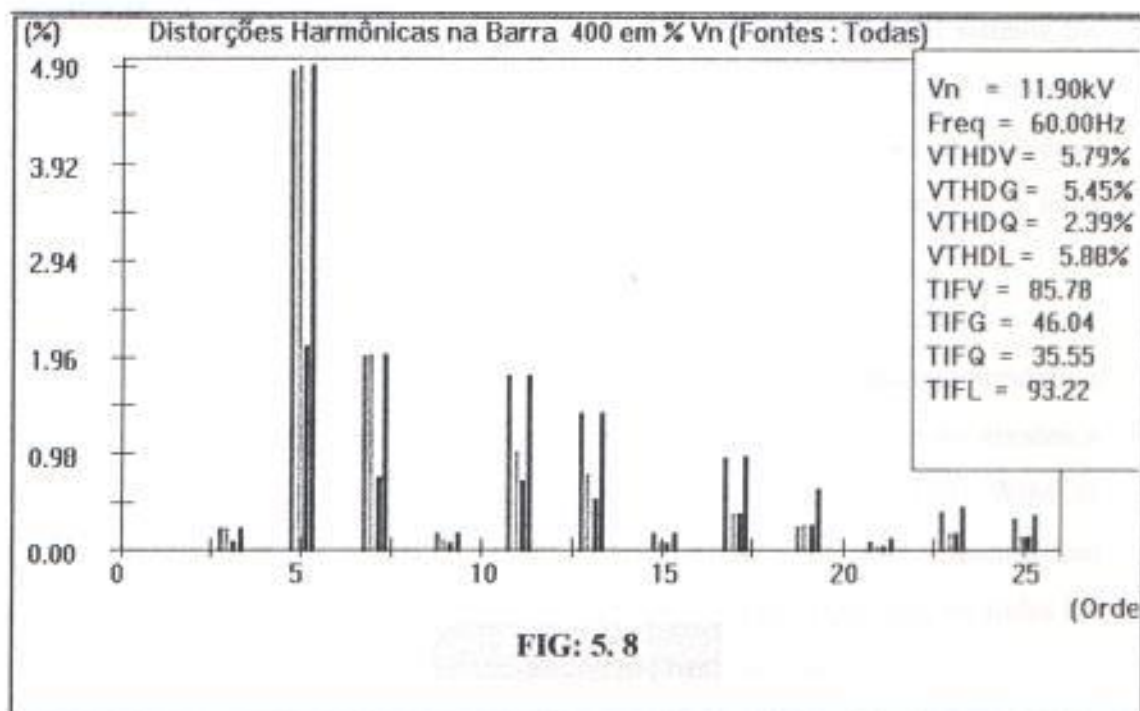
La figura 5.2 muestra el histograma de distorsión total de tensión (THDV) medido en el punto de acople común de SICOM. Se observa que cerca de el 70 % de el tiempo la distorsión de tensión estuvo por debajo de el 5 % mientras que el 25 % de el tiempo el límite máximo recomendado por la norma IEEE 519 fue excedido. Esto significa desde el punto de vista de la distorsión total de tensión, la calidad de suministro de energía eléctrica es inadecuada.

Las figuras 5.3 y 5.4 muestra el gráfico relacionado de las variables corriente  $I_h$  expresada en amperios, la tensión  $V_h$  y  $I_h$  con la potencia activa medida en la entrada de SICOM. Es importante observar que cada punto mostrado en estas figuras corresponde a valores de las variables obtenidas en el mismo instante.

La figura 5.3 muestra una correlación cercana a 1 comprobando que la distorsión armónica de la tensión, en la entrada de SICOM, es causada por la corriente armónica inyectada por este consumidor.

La figura 5.4 confirma la dependencia entre las variables corrientes armónicas y potencia activa consumida, el índice de correlación es prácticamente uno. Este resultado muestra en forma clara que SICOM es la principal responsable de la inyección de corrientes armónicas en el sistema. Otra forma de identificar que industria es la principal generadora de distorsiones armónicas, Es ir sacando de el sistema una a la vez las empresas con cargas no lineales, y hacer un análisis de







distorsiones armónicas. Solamente cuando se desconectó a SICOM del sistema los niveles de distorsión estuvieron debajo de los límites recomendados por la norma IEEE 519, esto prueba claramente que SICOM es la responsable por el problema. Los valores de distorsión obtenidos es el sistema sin SICOM se muestran en la tabla número dos.

Pero cuales son los principales armónicos que están causando el problema ?

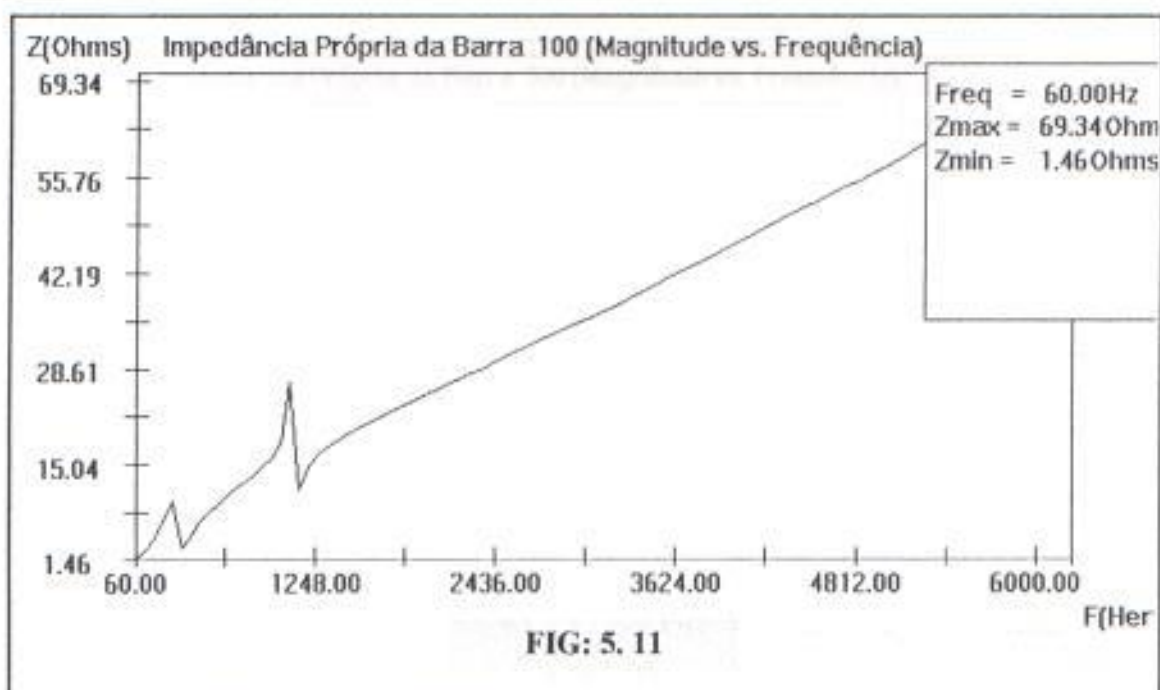
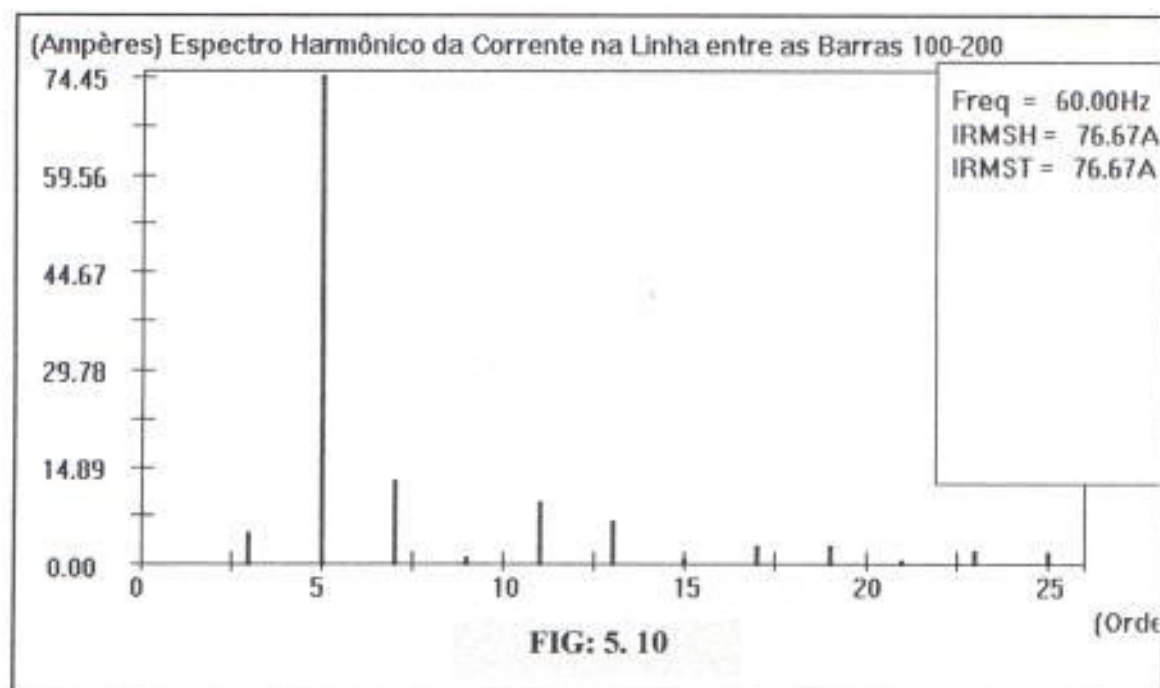
Las figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 muestran el espectro de las distorsiones armónicas por cada armónico individual y en el recuadro los valores de la distorsión armónica total, en los puntos de acople común de las industrias SICOM (barra 100), WIMOR (barra 200) ENGEMASA (barra 300), FBM (barra 400) y en la subestación San Carlos (Barra 12). Notamos claramente un quinto armónico dominante en todas las barras de estudio, seguido de el séptimo y décimo primer armónico.

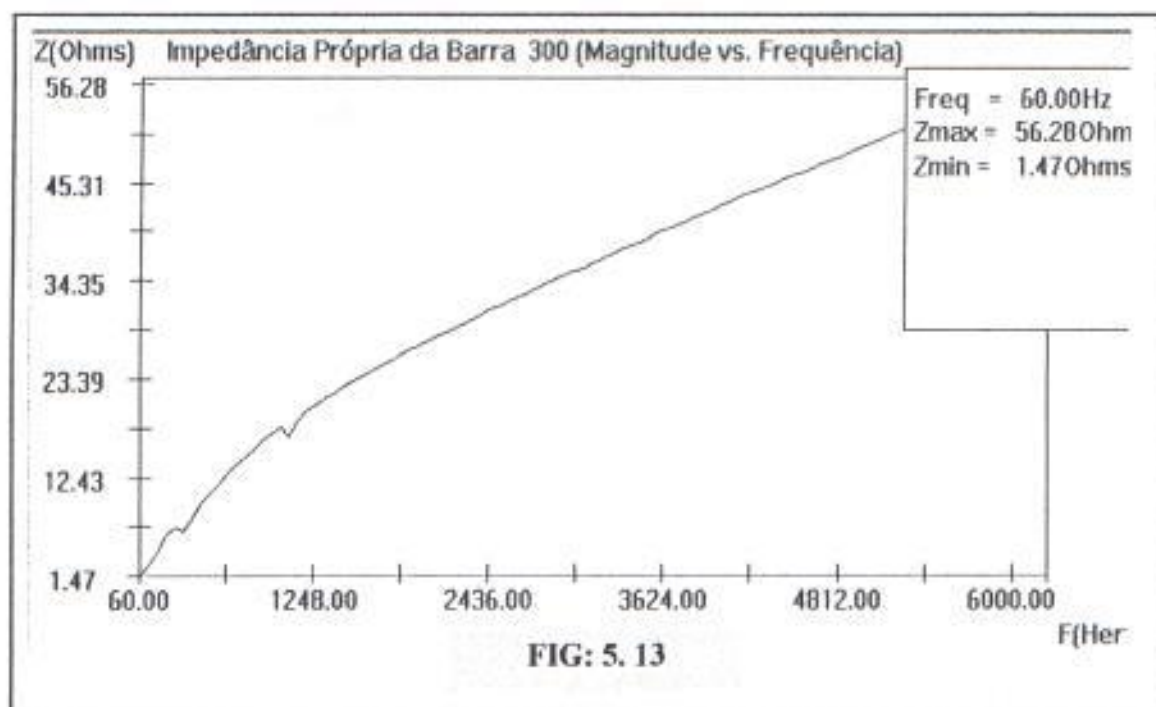
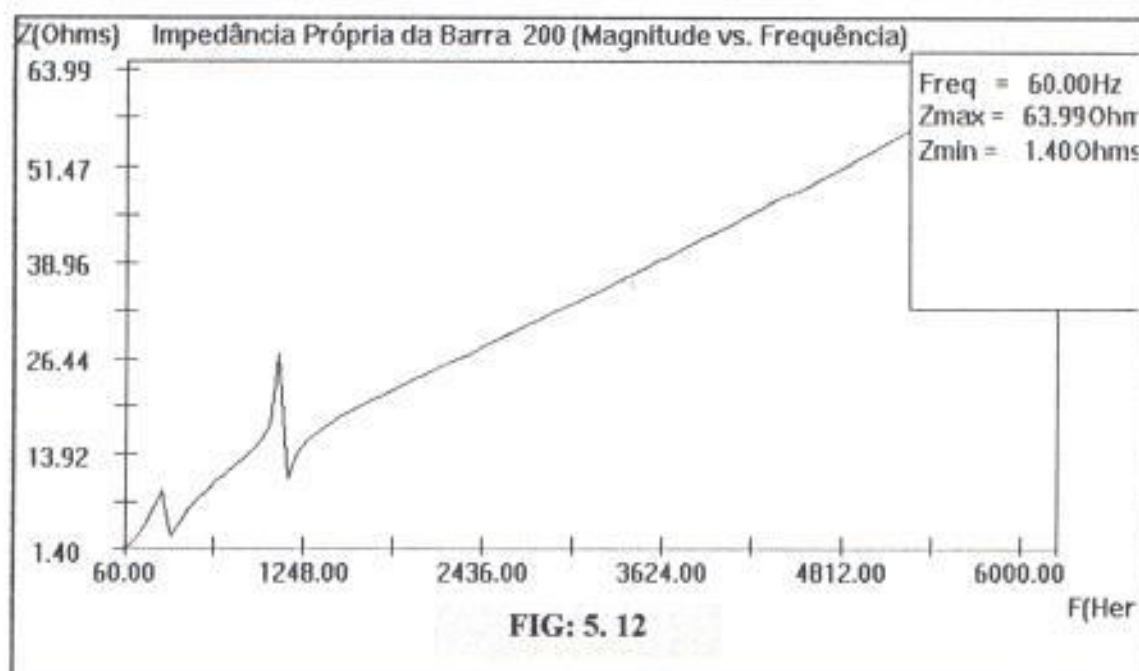
El valor de corriente debido solamente a los armónicos (sin considerar la corriente fundamental) que SICOM esta inyectando al sistema es de 76.67 amperios, con un predominio de una corriente debido a la presencia de el quinto armónico. esto se puede observar en la figura 5.10 que muestra el espectro de corrientes el la línea que une a SICOM con el sistema (línea 100-200).

Las gráficas de las curvas de impedancia versus frecuencias no muestran presentan problemas significativos de resonancia en los puntos de acople común de las empresas. Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15.

### **5.3.2 DESDE EL PUNTO DE VISTA DE EL CONSUMIDOR.**

Una vez analizado las condiciones de el sistema y identificado la empresa fuente de las distorsiones armónicas, el estudio se traslada dentro de esta empresa (SICOM). Desde el punto de vista de la empresa, el estudio esta basa en dos premisas, la primera es una investigación de las causas de las fallas en los hornos de inducción modelo 2 que trabajan a una frecuencia industrial de 60 Hz (quema de el transformador y capacitores), y la segunda premisa es el análisis de los hornos de





inducción modelo 1, que operan a una frecuencia de 300 Hz y que presentan como problema la quema de los diodos y SCRs.

Los hornos modelo 1, como se mencionó anteriormente, utilizan convertidores de potencia (puente rectificador de seis pulsos), esto es un indicativo de que estos hornos son causantes de las distorsiones de armónicas y son representados en el programa como fuentes de corrientes armónicas. Por tanto los puntos donde se realizaron las mediciones y el análisis son las barras donde se conectan los hornos y los transformadores que los alimentan.

Los resultados que se muestran en la tabla 4 muestran los niveles de las distorsiones armónicas totales en cada una de las barras de SICOM.

### 5.3.2.1 ANALISIS ARMONICO DEL HORNO DE INDUCCION A 60 HZ.

Los niveles de distorsión mostrados en las barras donde están conectados los hornos (barras 102, 104, 106, 108, 110 y 112), presentan los valores más altos que en cualquier otro punto de el sistema.

Examinando más detenidamente las condiciones en la barra 110 donde está conectado un horno modelo 2 (60 Hz) y el transformador que lo alimenta, obtenemos los resultados que se muestran en las figuras 5.16, 5.17, y 5.18.

La gráfica distorsión armónica de tensión por cada armónico individual (figura 5.16), nótese los alto valor en el quinto y séptimo armónico. El espectro armónico de las corrientes en el secundario de el transformador (figura 5.17), muestra un valor muy alto de corriente en la quinta armónica, y la sumatoria de todas las corrientes armónicas individuales da un valor de 567.28 Amperios sin considerar la corriente fundamental.

En la figura 5.18 se dibuja la gráfica de la impedancia versus la frecuencia en la barra 110, se muestra claramente una condición de resonancia cercana al quinto armónico. La resonancia próxima a los armónicos generados indica que el conjunto de componentes que forman los hornos a 60 Hz forman un circuito resonante

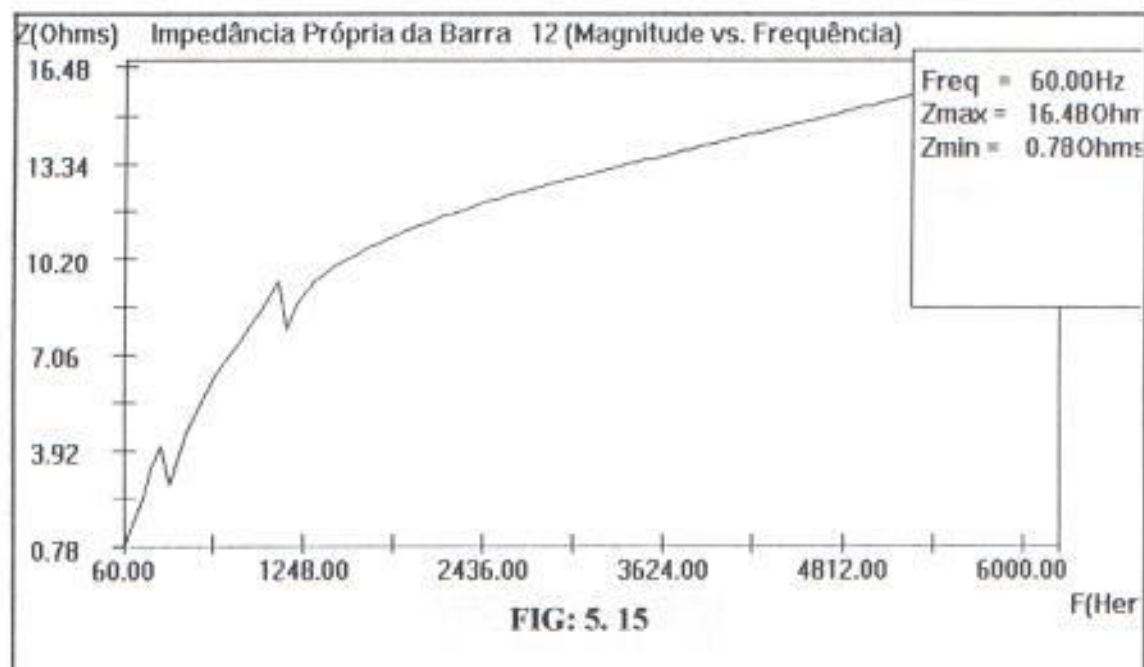
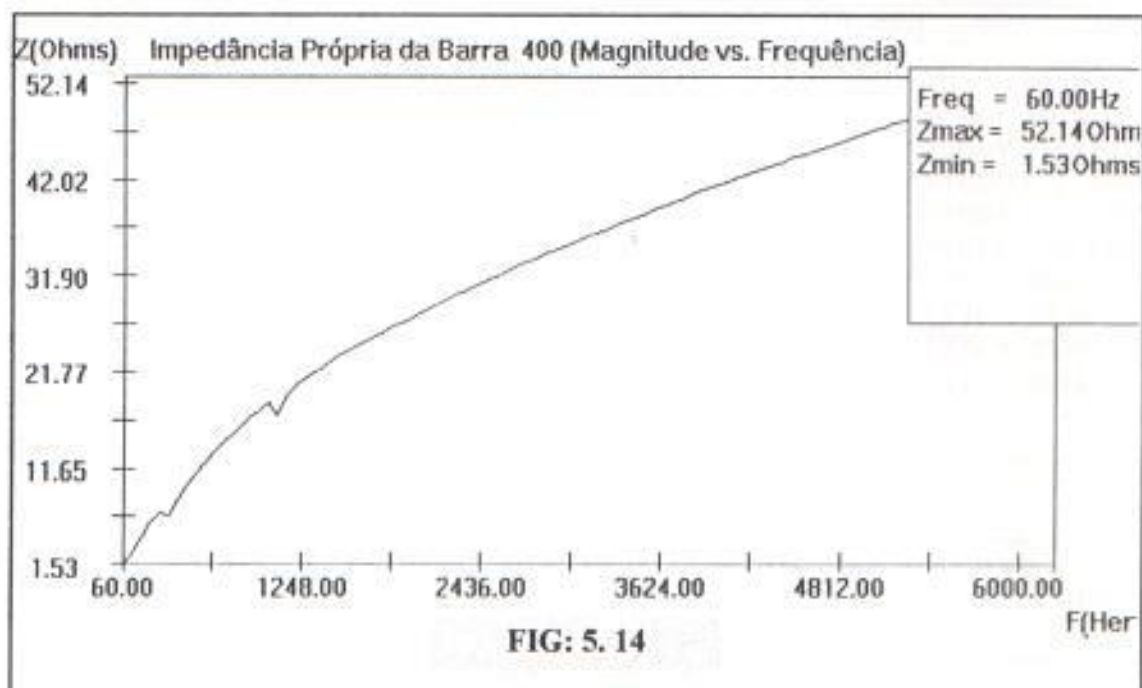
paralelo. Estos hornos están funcionando como filtros paralelos para las corrientes armónicas generadas por la propia SICOM y otras cargas no lineales de el sistema. De aquí se explica el alto valor de corriente armónica en el secundario de el transformador, la quema de el mismo y de los capacitores. Por este motivo el horno se encuentra operando a un 60 % de su capacidad nominal.

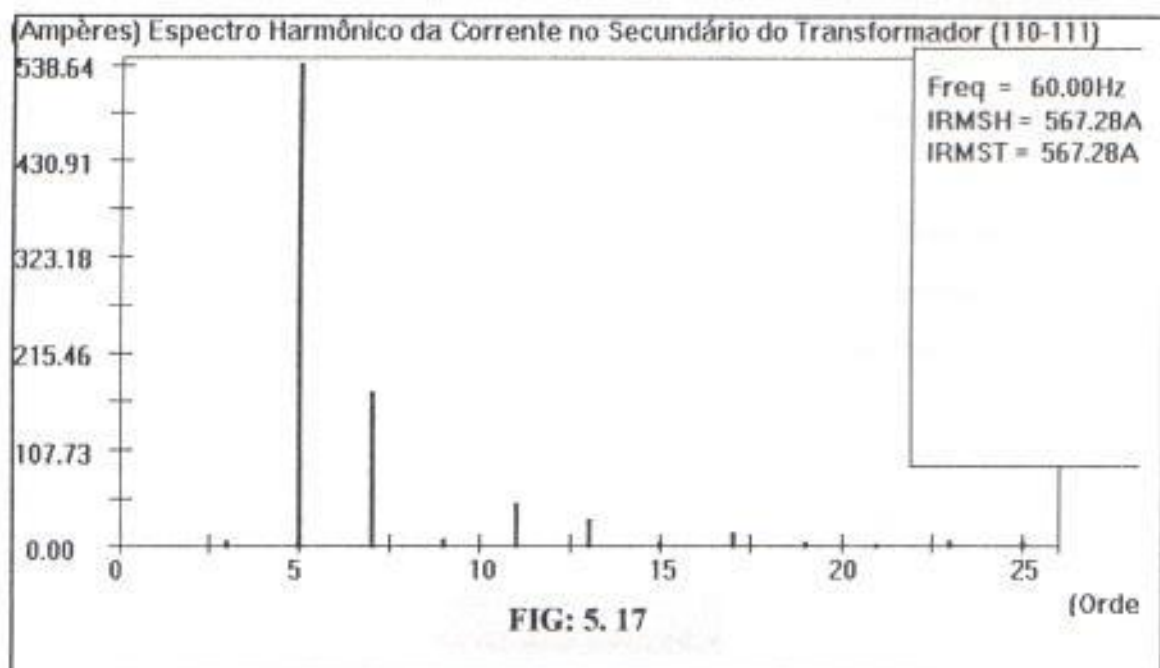
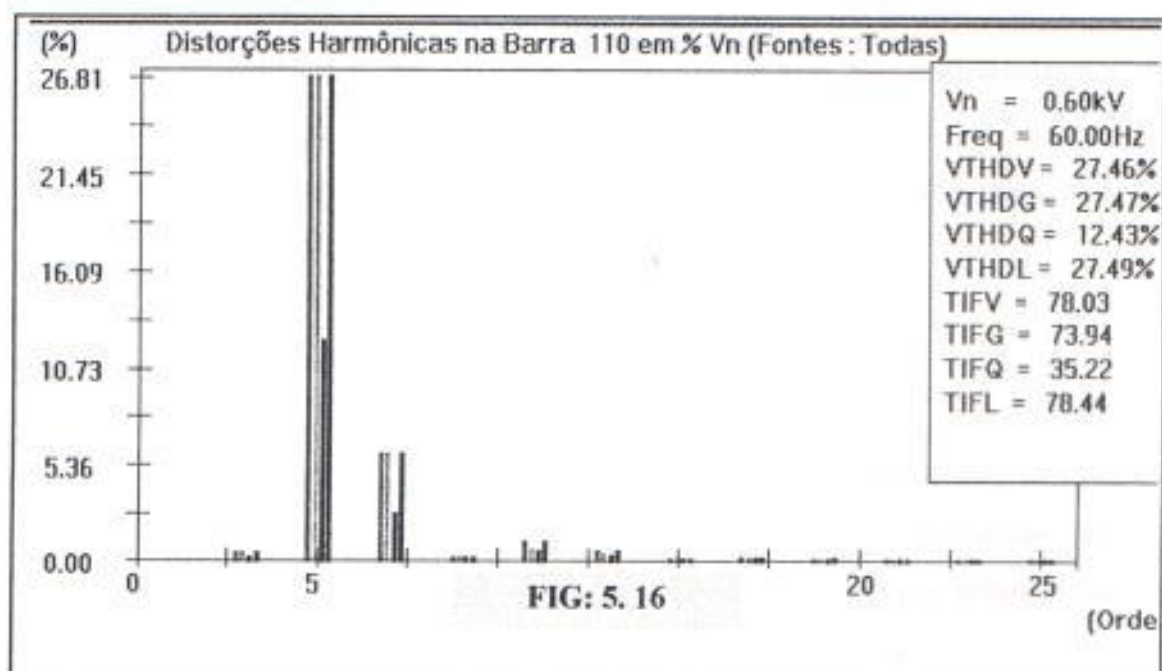
Para identificar con seguridad cual de los dos hornos es el causante de las distorsiones, examinaremos la figura 5.19 que muestra la gráfica entre el voltaje armónico y la potencia activa en el horno de 60 Hz, notamos que no existe correlación entre estas dos variables lo que prueba que este tipo de horno no es el causante de los problemas de armónicos sino, todo lo contrario el es el afectado.

Otro método fácil para determinar que hornos es el generador de corrientes armónicas es el de realizar un estudio de niveles de distorsión eliminando uno de los hornos a la vez, si con solo un modelo de horno conectado los niveles de las distorsiones no varían, esta es la fuente de las corrientes armónicas o caso contrario si los niveles disminuyen substancialmente entonces el horno desconectado es el origen de el problema. Este procedimiento se realizo desconectando los hornos que trabajan a un frecuencia de 300 Hz, el los resultado se observa una disminución significativa de los niveles de distorsión, esto confirma que los hornos desconectados son los causantes de el problema.

### **5.3.2.2 ANALISIS ARMONICO EN EL HORNOS DE INDUCCION A 300 HZ.**

El histograma de las corrientes armónicas individuales en una de las barras donde esta conectado un horno de inducción de 300 Hz (barra 108), figura 5.20, muestra claramente que los valores de distorsión armónica para el quinto y séptimo armónica y la distorsión armónica total (recuadro) sobrepasan los niveles recomendados por la norma IEER 519. Un comportamiento similar encontramos en las otras barras donde están conectados los otros hornos de este mismo modelo. La corriente armónica que inyecta este horno se muestra en la figura 5.21.





La correlación entre la corriente armónica y la potencia activa en este modelo de horno, presentada en la figura 5.22, es prácticamente unitaria, lo que demuestra que esta carga es la generadora de armónicos.

La gráfica de impedancia versus frecuencia en esta barra, como se aprecia en la figura 20, no presenta ninguna condición de resonancia.

#### 5.4 RESUMEN DE LOS PROBLEMAS.

Los valores de la distorsión total de tensión sobrepasan los límites establecidos por la norma IEEE 519 que es de el 5 %, siendo el de mayor valor el encontrado en el punto de acople común de SICOM (barra 100) con 9.845 % le sigue WIMOR con 9.493 %, ENGEMASA con 6.584 % y finalmente FBM con 5.876 %.

La correlación cercana a 1 entre la corriente armónica y la potencia activa esta comprobando que la distorsión armónica de la tensión, en la entrada de SICOM, es causada por la corriente armónica inyectada por este consumidor.

Solamente cuando se saco a SICOM de el sistema los niveles de distorsión estuvieron debajo de los límites recomendados por la norma IEEE 519, esto prueba claramente que SICOM es la responsable por el problema.

Se nota claramente un quinto armónico dominante en todas las barras de estudio, seguido de el séptimo y décimo primer armónico.

En gráfica entre el voltaje armónico y la potencia activa en el horno de 60 Hz, notamos que no existe correlación entre estas dos variables lo que prueba que este tipo de horno no es el causante de los problemas de armónicos sino, todo lo contrario el es el afectado.

Los hornos a 60 Hz están funcionando como filtros paralelos para las corrientes armónicas generadas por la propia SICOM y otras cargas no lineales de el sistema. De aquí se explica el alto valor de corriente armónica en el secundario de el transformador, la quema de el mismo y de los capacitores.

La correlación entre la corriente armónica y la potencia activa en el horno modelo 2



de 300 Hz, es prácticamente unitaria, lo que demuestra que esta carga es la generadora de armónicos.

## 5.5 SOLUCIONES PROPUESTAS

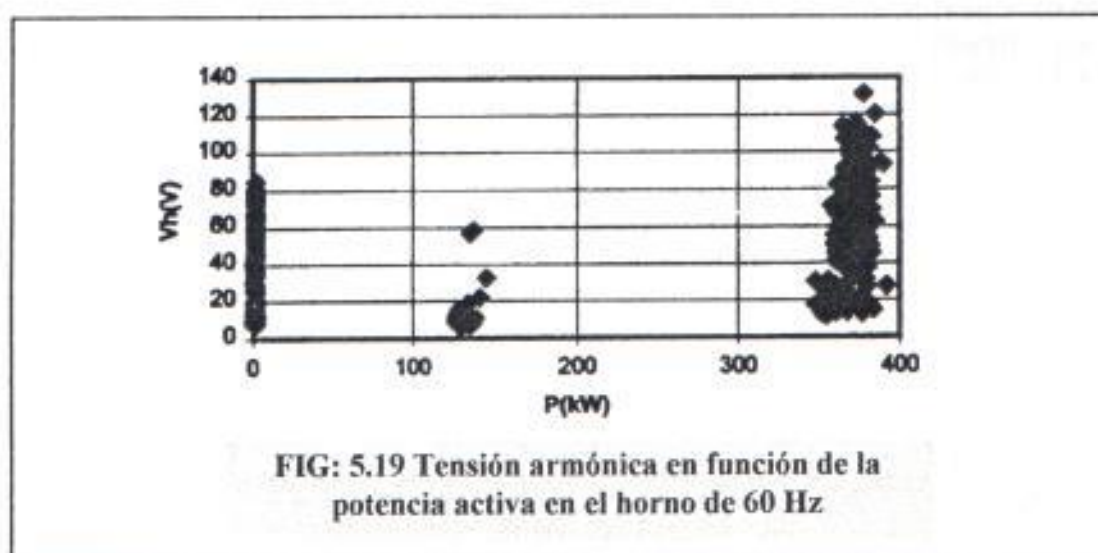
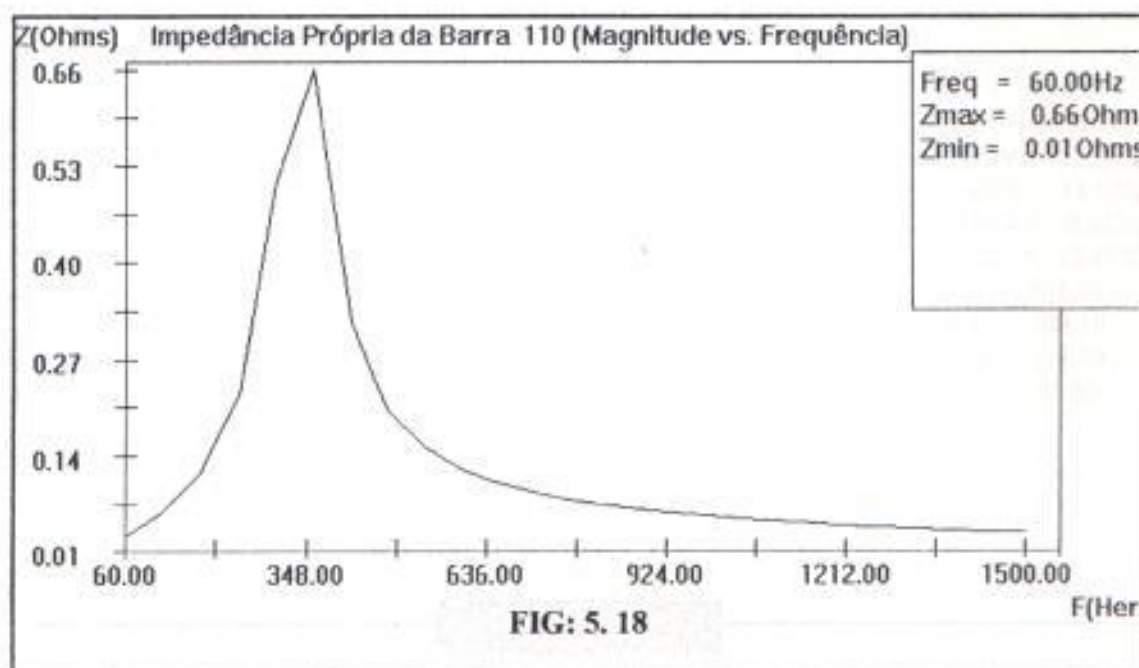
Para la resolución de el problema en distorsiones armónicas de SICOM existen varias alternativas que técnicamente son posibles, pero no debemos olvidar que un estudio económico juega un papel muy importante para determinar que alternativa es la más conveniente.

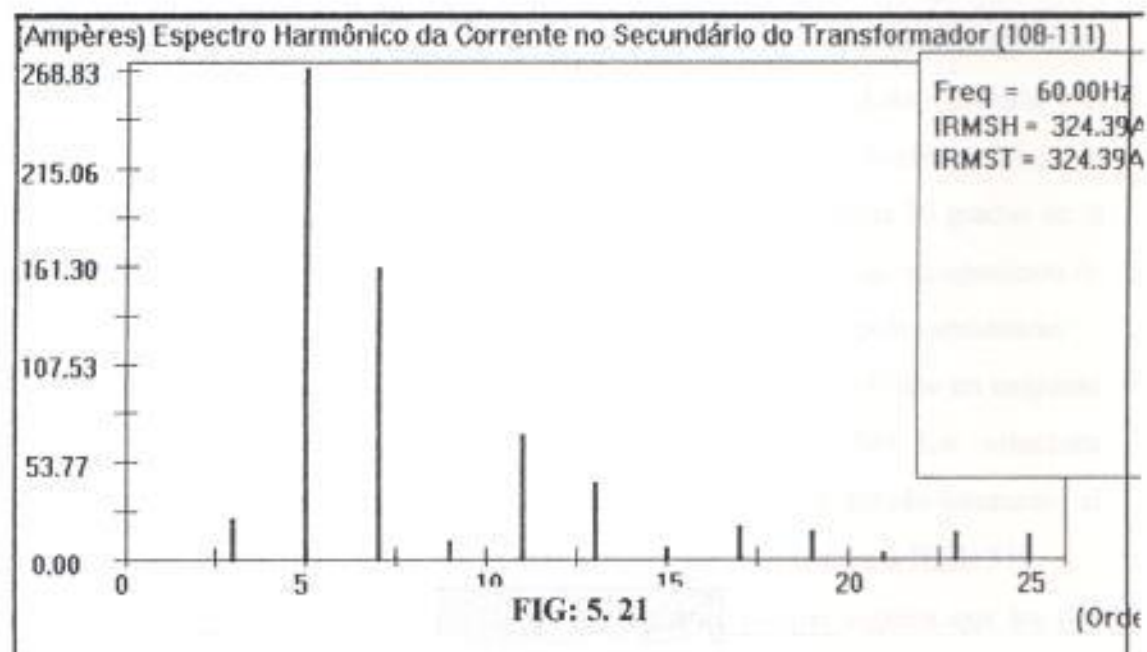
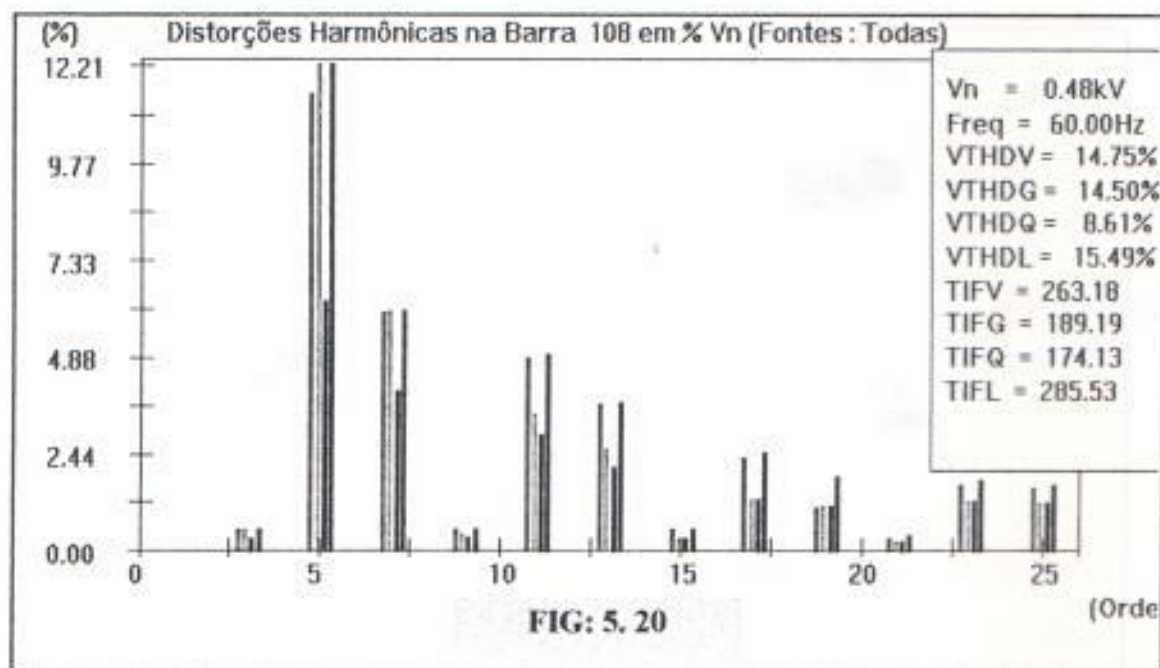
### **1.- Transformar los hornos de inducción de rectificadores de seis pulsos a rectificadores de 12 pulsos.**

La transformación de rectificadores de seis a doce pulsos logra que la generación de la corriente armónica se reduzca aproximadamente a la mitad para rectificadores de igual potencia, esta técnica de reducción de armónicas es conocida como multiplicación de fases.

EL horno de inducción de 300 Hz con potencia de 2500 Kw posee dos puentes rectificadores de seis pulsos conectados en paralelo. Si este rectificador es transformado en uno de doce pulsos y es alimentado por el mismo transformador, entonces para realizar la transformación bastaría un transformador desfasador de 1500 KW.

Los otros hornos de 300Hz y de potencia 1000 Kw la transformación no es posible debido a que poseen un solo puente rectificador. esta es una solución parcial al problema , ya que solo corregimos la generación de distorsiones de un solo horno, pero es valida porque combinada con otra alternativa podemos lograr mejores resultados. Un análisis más detallado de la multiplicación de fase es tratado en el capítulo 4 sección





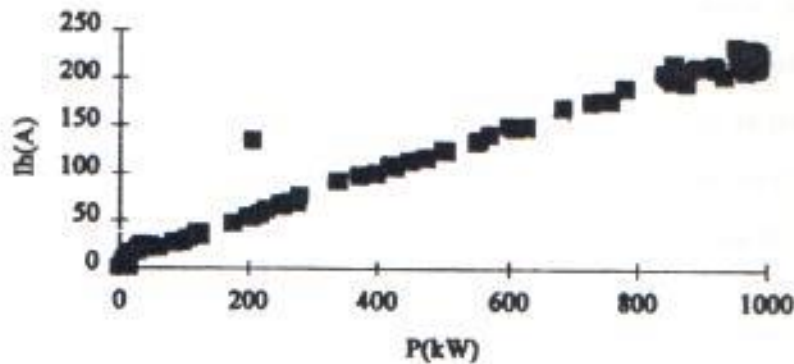


FIG :5.22 Corriente armónica en función de la potencia activa en el horno de 300 Hz

## 2.- Desfasamiento de los hornos de inducción de 300 Hz.

Los cuatro hornos de inducción de 300Hz que posee SICOM están trabajando en fase a pesar que cada horno está alimentado por un transformador independiente. Si los transformadores de los hornos de 1000 Kw son conectados en delta - estrella y el otro con conexión delta-delta o estrella- estrella los voltajes respectivos deben de estar 30 grados fuera de fase y así las armónicas estarán desfasadas 30 grados de la correspondiente frecuencia principal. Estas armónicas deben de estar en oposición de fase en los dos puentes lo que provoca la cancelación de las principales armónicas.

Esta alternativa de solución que involucra a los dos hornos de 1000 Kw en conjunto con la solución número uno, que involucra al horno de 2500 Kw soluciona totalmente el problema. La generación de corrientes armónicas debido solamente al horno de 1250 Kw no sobrepasa los niveles establecidos por la norma IEEE 519.

Esta alternativa en la práctica es muy difícil aplicarla, porque implica que los dos hornos de 1000 Kw estén trabajando simultáneamente y con exactamente las mismas condiciones de carga para que se produzca la cancelación de las armónicas. Los datos de las condiciones de operación para los hornos no fueron suministrados

### **3.- Filtros en la subestación San Carlos.**

La colocación de filtros armónicos para la quinta y séptima armónica en la subestación San Carlos resuelve el problema de la distorsión armónica de tensión en el sistema. Un estudio de el filtro que satisfaga los criterios de la distorsiones en la subestación indican que precisan poseer una potencia nominal superior a los filtros colocados en la entrada de SICOM (alternativa 4). lo que implica un costo mayor de fabricación y espacio de instalación.

### **4.- Filtros en la entrada de SICOM.**

Esta fue la alternativa de solución adoptada para resolver los problemas de distorsión en el sistema. Filtros para la quinta y séptima armónica se diseñaron y fueron instalados en la entrada de SICOM.. Las simulaciones posteriores a la instalación demostraron que esta es la solución técnica y económica más factible.

Es una norma general que los armónicos sean impedidos a ingresar al sistema en los puntos más próximo posible donde son generados, en consecuencia otra alternativa de solución es la colocación de filtros en el lado de baja tensión de los transformadores que alimentan a los hornos de inducción. El estudio muestra que las altas corrientes que deben filtrarse en el lado de baja tensión de el transformador y el mayor numero de filtros a instalarse hacen que económicamente no sea una alternativa atractiva.

### **Diseño de el filtro en la entrada de SICOM**

El análisis de las corrientes armónicas determino que los armónicos quinto y séptimo son los que causan los problemas de distorsión. Se procederá a diseñar filtros sintonizado serie para estas armónicas utilizando el banco de capacitores de 2 MVA ya existente en SICOM.

### Filtro para el quinto armónico.

Para el diseño del filtro del armónico utilizaremos el 66% de la capacidad de el banco de capacitores.

$$Q_3 = 2 \text{ MVA} * 0.66 \approx 1.33 \text{ MVA}$$

La reactancia capacitiva de el filtro es:

$$X_{Cf} = \frac{V^2}{Q} = \frac{(11.9 \text{ KV})^2}{1.33 \text{ MVA}} = 106.47 \Omega$$

La capacitancia de el filtro es:

$$C_f = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 106.47 \Omega} = 25.05 \mu\text{F}$$

Para el calculo de la reactancia inductiva de el filtro se debe cumplir la condicion de:

$$X_{Lh} = X_{Ch}$$

donde h es el orden del armónico para el cual el filtro es sintonizado. Expresado en términos de la frecuencia fundamental queda:

$$X_{Lh} = \frac{X_{Cf}}{h^2} = \frac{106.47 \Omega}{(5)^2} = 4.24 \Omega$$

La inductancia de el filtro es:

$$L = \frac{X_{Lh}}{2 * \pi * 60} = \frac{4.24 \Omega}{2 * \pi * 60} = 0.01127 \text{ H}$$

Para el calculo de la resistencia de amortiguamiento, variando el factor de calidad  $\bar{Q}$  buscamos la característica impedancia frecuencia más funcional

$$\bar{Q} = \frac{X_M}{R}$$

$$\bar{Q} = 19.27$$

$$R = \frac{X_M}{Q} = \frac{4.24\Omega}{19.27} = 0.22\Omega$$

### Filtro para el séptimo armónico

Para el diseño del filtro del armónico utilizaremos el 34 % de la capacidad de el banco de capacitores.

$$Q_7 = 2.MVA * 0.34 \approx 0.67 MVA$$

La reactancia capacitiva de el filtro es:

$$X_{Cf} = \frac{V^2}{Q} = \frac{(11.9KV)^2}{0.67 MVA} = 211.35\Omega$$

La capacitancia de el filtro es:

$$C_f = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 211.35\Omega} = 12.5 \mu F$$

Para el calculo de la reactancia inductiva de el filtro se debe cumplir la condición de:

$$X_{Lh} = X_{Ch}$$

donde h es el orden del armónico para el cual el filtro es sintonizado. Expresado en términos de la frecuencia fundamental queda:

$$X_{Lh} = \frac{X_{Cf}}{h^2} = \frac{211.35\Omega}{(7)^2} = 4.319\Omega$$

La inductancia de el filtro es:

$$L = \frac{X_{Lf}}{2 * \pi * 60} = \frac{4.31\Omega}{2 * \pi * 60} = 0.01144H$$

Para el calculo de la resistencia de amortiguamiento, variando el factor de calidad  $\bar{Q}$  buscamos la característica impedancia frecuencia más funcional

$$\bar{Q} = \frac{X_{Lf}}{R}$$

$$\bar{Q} = 14.01$$

$$R = \frac{X_{Lf}}{\bar{Q}} = \frac{4.31\Omega}{14.01} = 0.307\Omega$$

## 5.6 ANALISIS DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA INCLUYENDO FILTROS.

SICOM es una industria metalúrgica que tiene la mayor carga no lineal y la demanda contratada más alta en el sistema.

Filtros para la quinta y séptima armónica se diseñaron y fueron instalados en la entrada de SICOM. Las simulaciones posteriores a la instalación demostraron que esta es la solución técnica y económica más factible. Aunque se observan armónicos individuales predominantes sus magnitudes son pequeñas y no sobrepasan los límites establecidos por la norma IEEE 519, esto era lo deseado por la compañía suministradora.

Con los filtros instalados en la entrada de SICOM (barra 100), para la quinta y séptima armónica, se realizó el análisis armónico de el sistema. Los niveles de distorsión armónica total de voltaje en los puntos de acople común de las principales industrias con cargas no lineales SICOM (barra 100), WIMOR (barra 200) ENGEMASA (barra 300), FBM (barra 400) y en la subestación San Carlos (Barra 12) se muestran en la tabla 5:

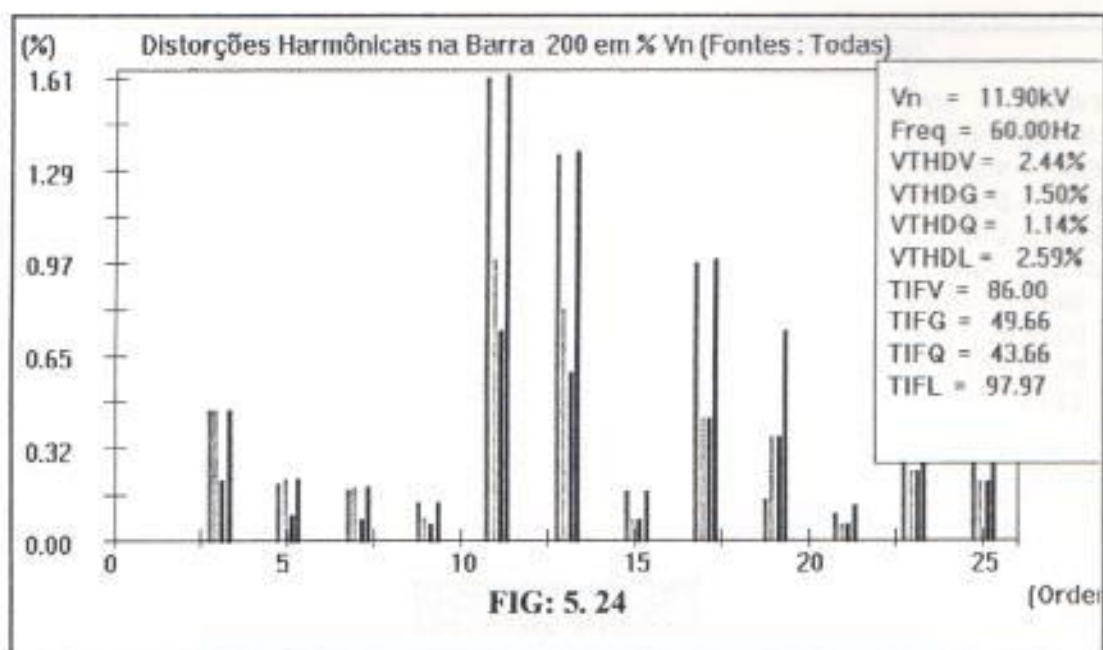
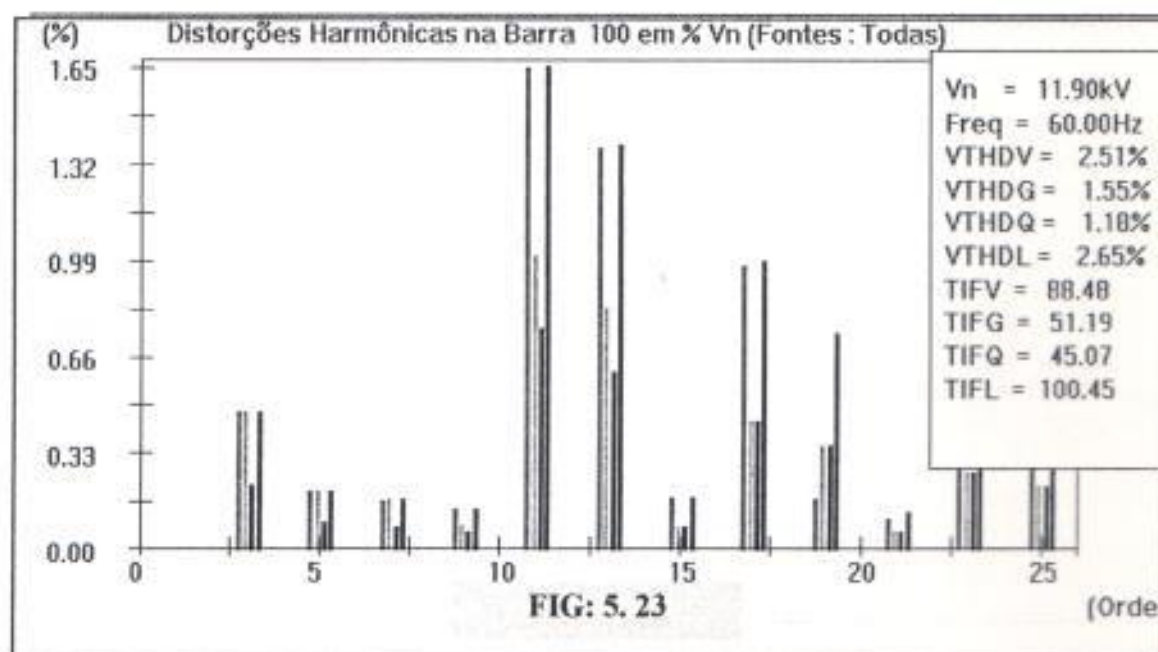


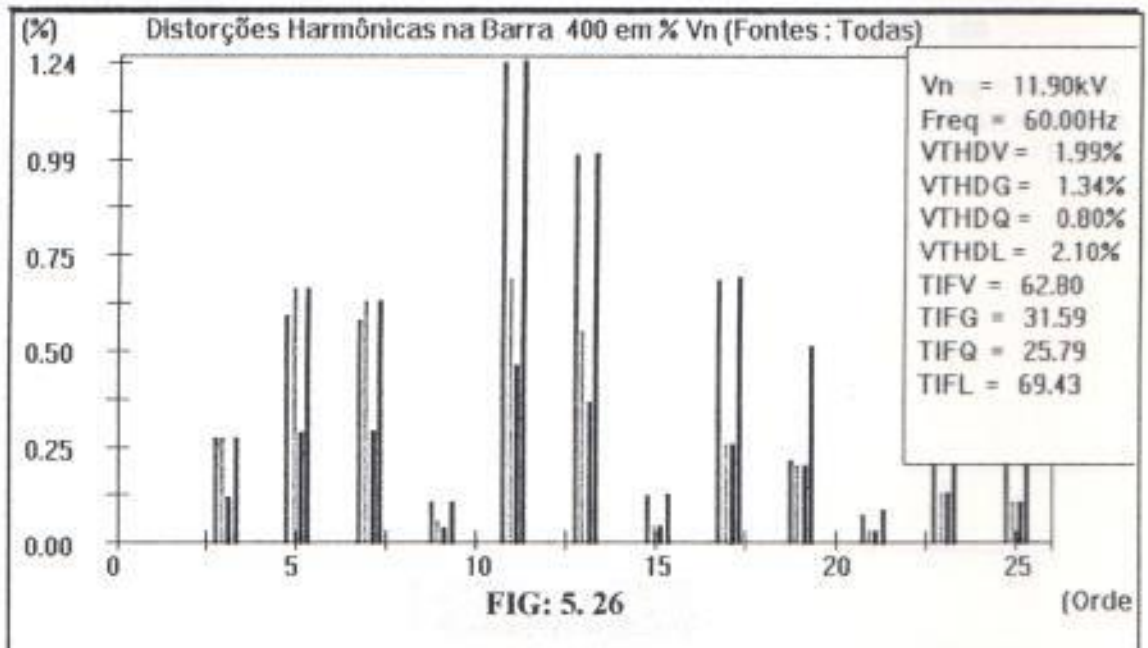
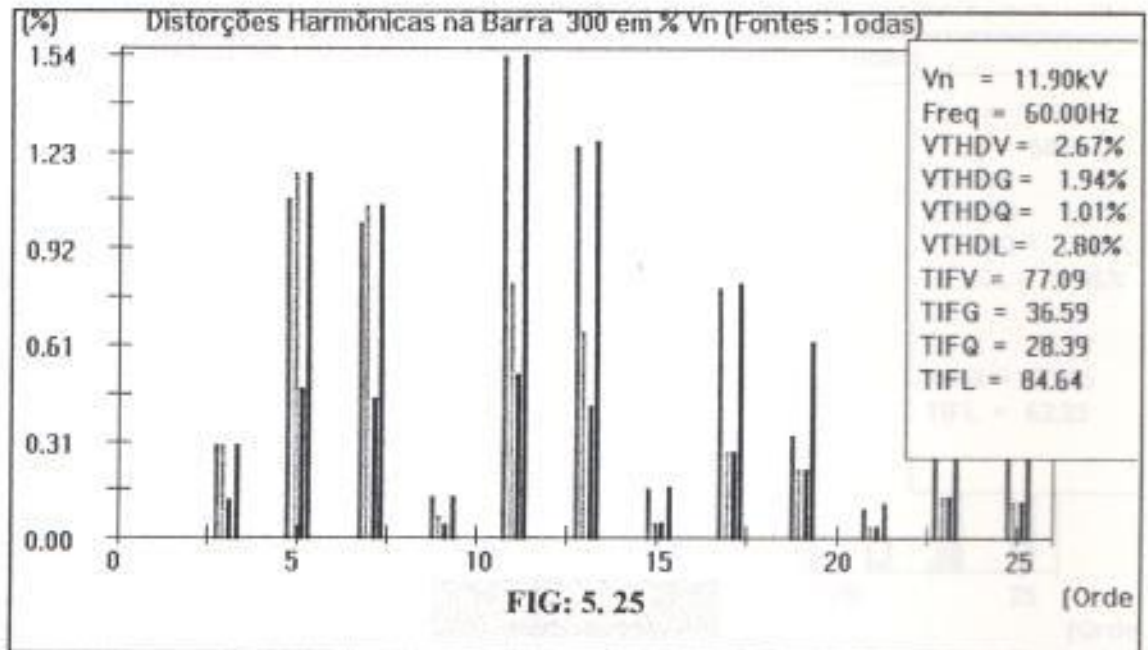
El histograma de las distorsiones armónicas individuales de voltaje para los puntos arriba descritos se muestran en las figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 y 5.27. Aunque se observan armónicos individuales predominantes sus magnitudes son pequeñas y no sobrepasan los límites establecidos por la norma IEEE 519, esto era lo deseado por la compañía suministradora. Comparece estos valores con los obtenidos en el análisis de las condiciones iniciales de el sistema, (figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9) notamos reducciones significativas.

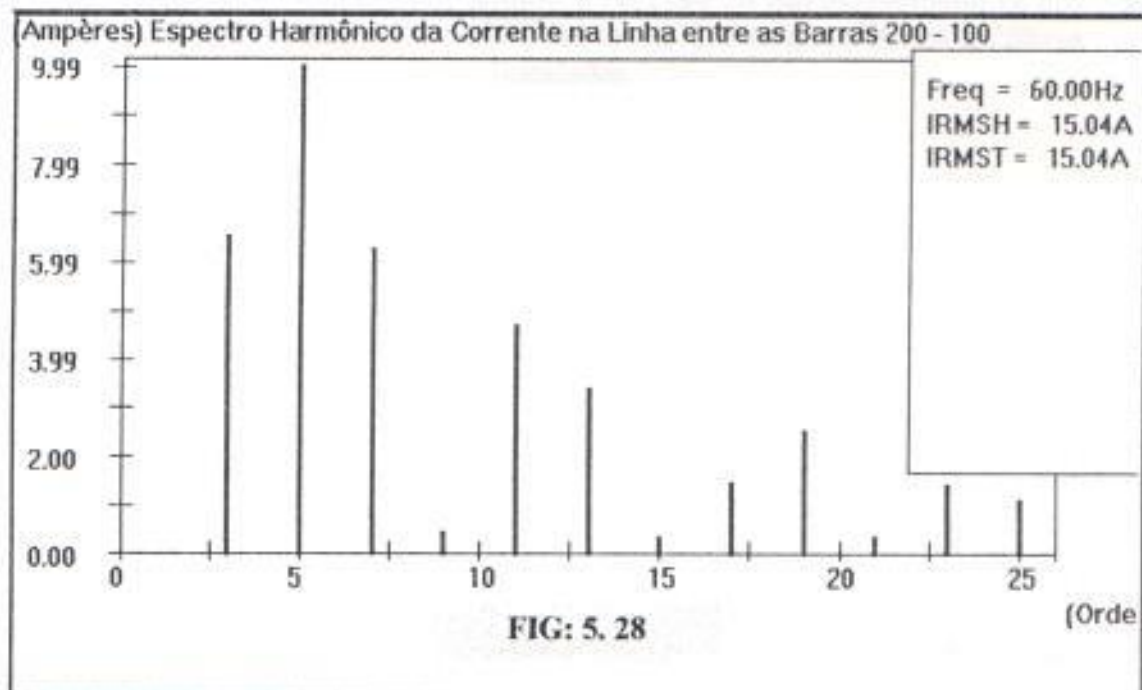
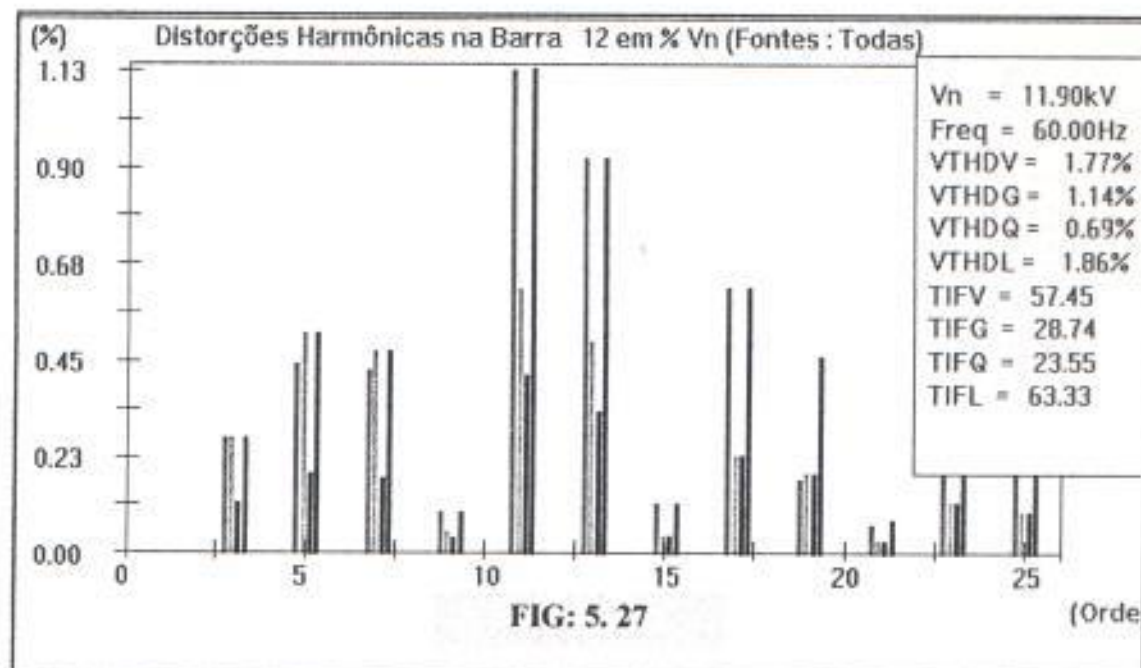
La reducción de corriente armónica inyectada al sistema por SICOM es sustancial, el valor se redujo de 76.67 a 15.04 amperios. El espectro de corrientes armónicas (línea 100-200), con los filtros instalados, se observa en la figura 5.28 compare esta figura con la numero 5.10.

El resultado de esta solución, evaluada dentro de SICOM, se observa en la tabla 6 y más detenidamente en las barras 108 y 110 donde están conectados los hornos de inducción de 300 y 60 Hz respectivamente. El histograma de corriente armónica individual de estas barras se observan en las figuras 5.29 y 5.30. Estudiando detenidamente la figura 5.29 (recuadro) notamos que el valor de la distorsión armónica total de tensión supera los valores establecidos por la norma IEEE 519 y los valores de corriente armónica en el secundario de el transformador no han cambiado (figura 5.31) (comparece las figuras 5.29 con 5.20 y 5.30 con 5.21), esto era de esperarse debido a que la supresión de armónicas no se realiza en el mismo punto de generación que es el horno de inducción. Esta condición es permitida si el transformador no es afectado.

Las magnitudes de las corriente en los transformadores de los horno de 60 Hz y 300 Hz con los filtros instalados pueden compararse con los valores obtenidos sin los filtros analizando las figuras 5.31 y 5.32 con las figuras 5.17 y 5.21 respectivamente.







## D I S T O R C A O T O T A L E T . I . F .

BARRA	NUM.	D I S T O R C A O T O T A L (%)				T . I . F .			
		VECTORIAL	COO	QUADRATICA	LINEAR	VECTORIAL	COO	QUADRATICA	LINEAR
BARRA100	100	2.300	3.095	3.371	3.360	53.523	30.491	23.052	55.771
BARRACAN670	110	0.105	0.212	0.088	0.213	0.848	0.869	0.614	0.985
FICT-CAN670	111	2.280	3.094	3.370	3.358	53.495	30.475	23.040	55.742
BARRACAN670	112	0.105	0.212	0.088	0.213	0.848	0.869	0.614	0.985

TABLA 5.4 Distorsión total de tensión y TIF en las barras dentro de SICOM sin los hornos de 300 Hz

## D I S T O R C A O T O T A L E T . I . F .

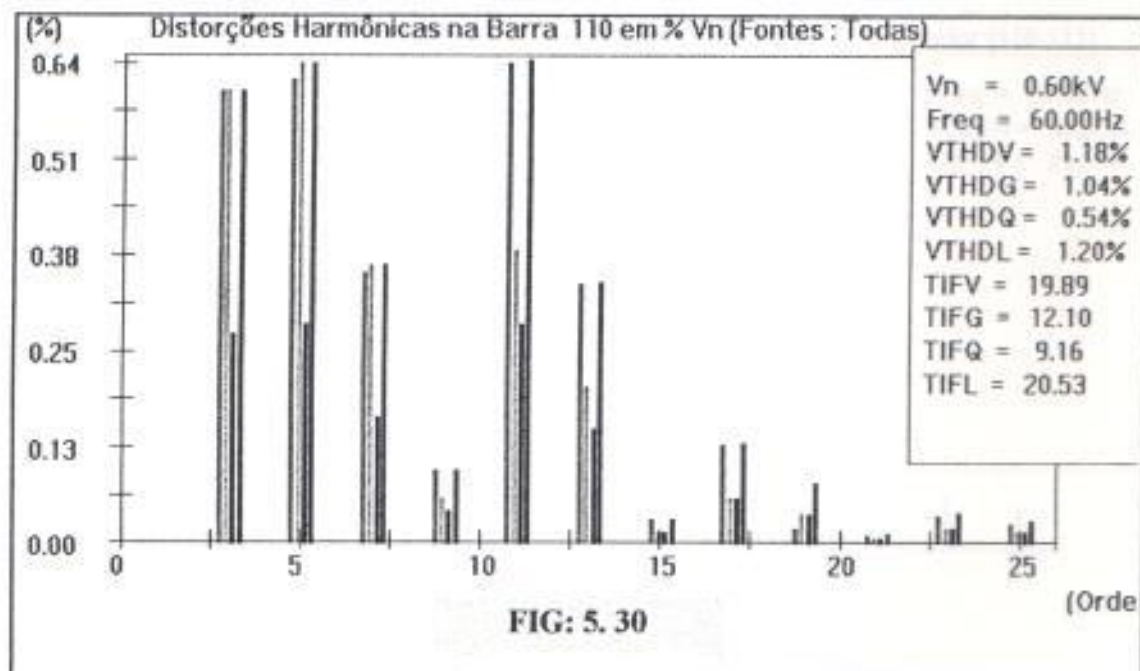
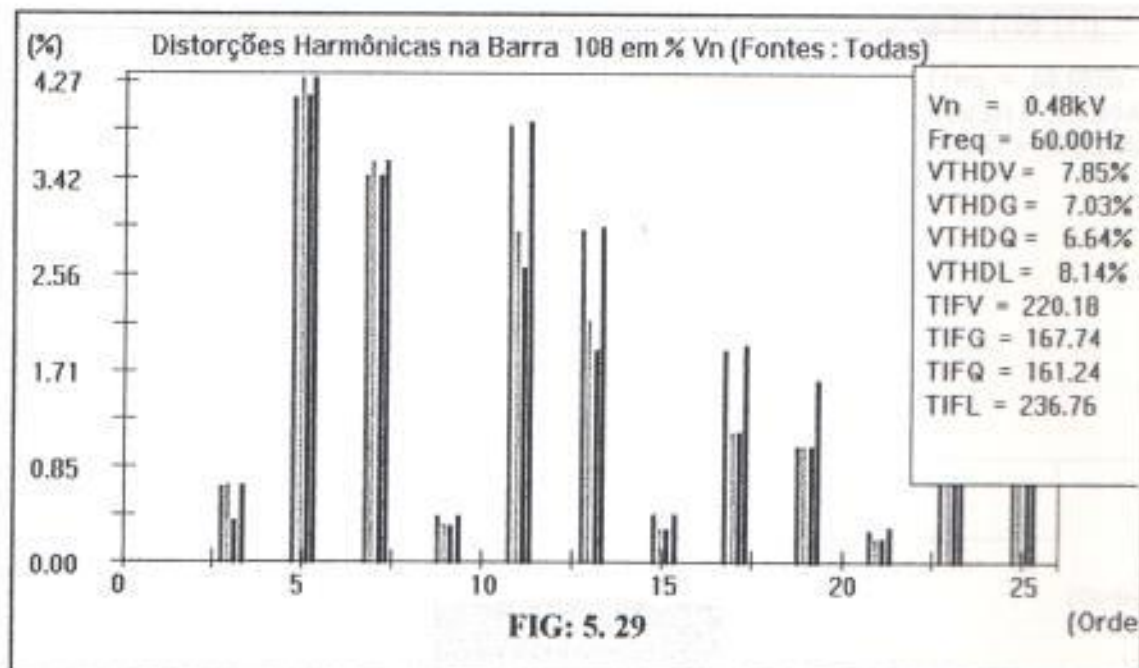
BARRA	NUM.	D I S T O R C A O T O T A L (%)				T . I . F .			
		VECTORIAL	COO	QUADRATICA	LINEAR	VECTORIAL	COO	QUADRATICA	LINEAR
BARRA100	100	2.505	1.545	1.394	2.647	89.477	51.190	45.071	100.453
BARRA200	200	2.444	1.501	1.243	2.586	85.950	45.656	43.450	87.967
BARRA300	300	2.669	1.943	1.011	2.799	77.005	36.586	28.399	68.689
BARRA400	400	3.989	1.337	0.803	2.095	62.790	51.507	25.791	49.478
BARRA12	12	1.711	1.137	0.686	1.861	57.445	38.741	21.548	43.328

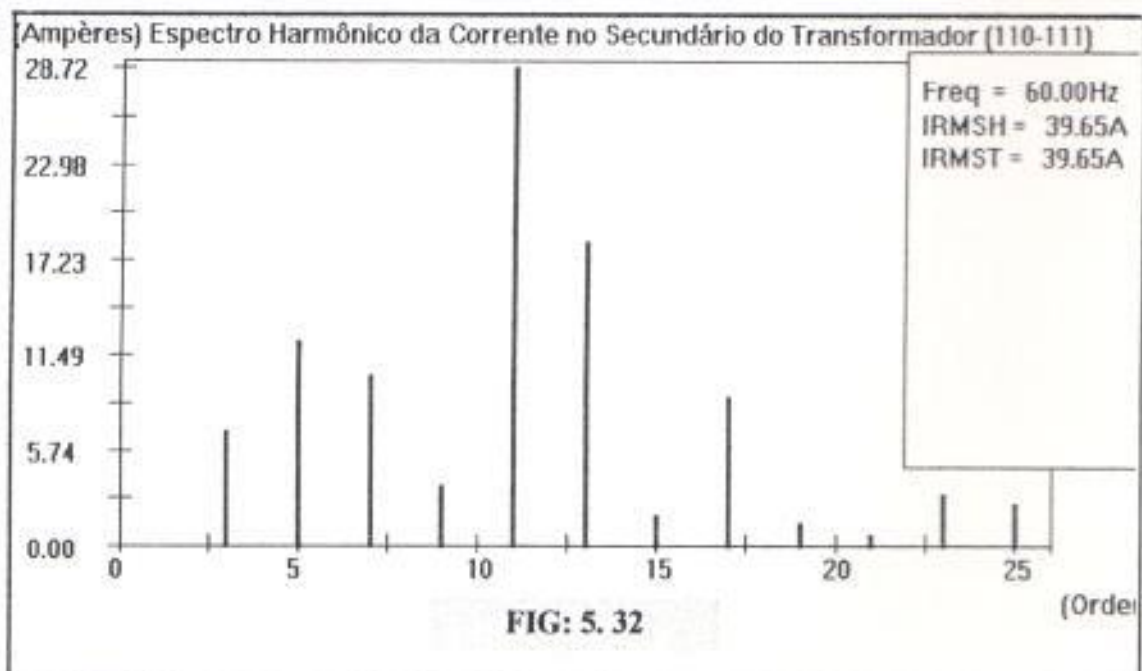
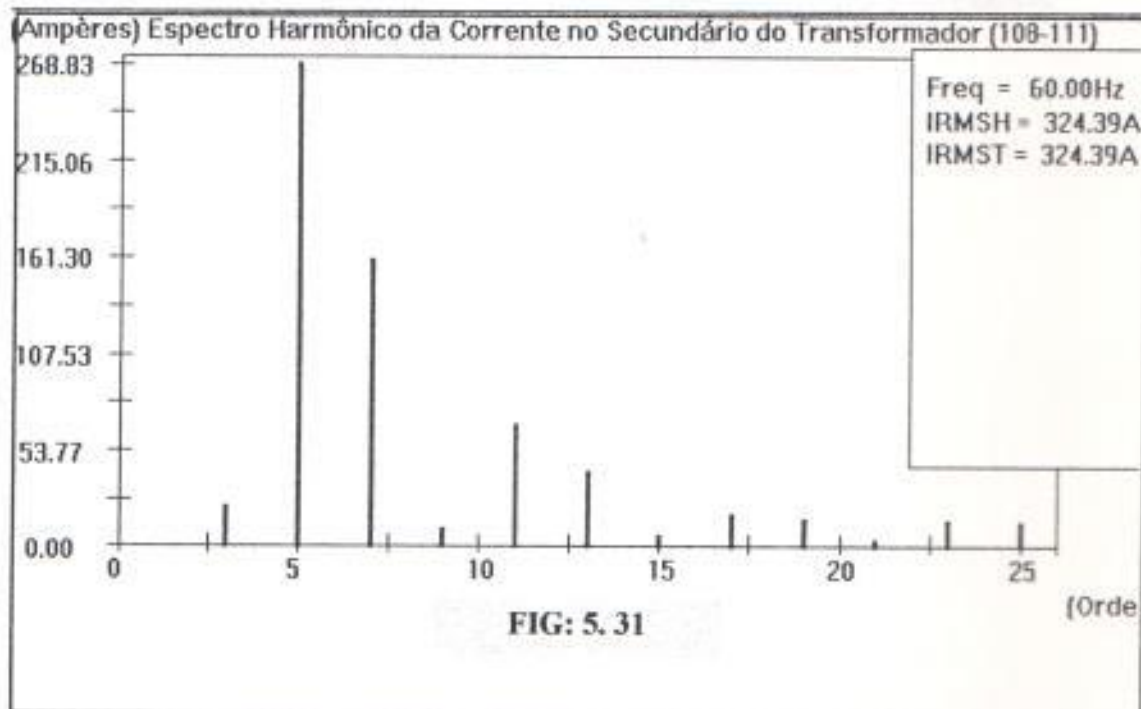
TABLA 5.5 Distorsión total de tensión y TIF, con los filtros instalados en los puntos de acople común de las industrias con cargas no lineales, con los filtros instalados

## D I S T O R C A O T O T A L E T . I . F .

BARRA	NUM.	D I S T O R C A O T O T A L (%)				T . I . F .			
		VECTORIAL	COO	QUADRATICA	LINEAR	VECTORIAL	COO	QUADRATICA	LINEAR
BARRA100	100	2.505	1.545	1.394	2.647	89.477	51.190	45.071	100.453
BARRA1000	102	8.520	7.614	7.214	8.835	234.520	178.221	172.014	251.198
BARRA1000	104	8.898	7.592	7.190	8.751	231.977	178.692	171.882	250.678
BARRA2500	106	7.398	6.419	6.320	7.642	208.158	164.302	158.334	223.248
BARRA11250	108	7.849	7.029	6.639	8.143	220.175	167.742	161.388	236.753
BARRACAN670	110	1.183	1.044	0.583	1.203	39.880	32.091	9.343	20.520
FICT-CAN670	111	2.505	1.547	1.182	2.648	88.551	51.158	45.026	100.510
BARRACAN670	112	1.183	1.044	0.583	1.203	39.880	32.091	9.343	20.520
BARRA-FILT5H	120	15.544	18.412	9.418	16.585	108.713	71.546	53.898	120.174
BARRA-FILT8H	130	16.058	15.868	7.189	16.268	156.042	123.345	73.775	165.084

TABLA 5.6 Distorsión total de tensión y TIF, con los filtros instalados en las barras dentro de SICOM





## 5.7 BASE DE DATOS PARA EL SISTEMA DE POTENCIA A ANALIZAR.

```

TITU
CASO BASE
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
DCTR INMR
SBAS 100.00
SU      HNO
COST   SIM
9999
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
DEFO INMR RPTO
60.000000 0020
      1.000      2.000
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
COST INMR
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
100  BARRA100      11.9      0.0      2      S
102  BARRA1A1000  1.575      0.0      6      N
104  BARRA1B1000  1.575      0.0      6      N
106  BARRA12500   1.575      0.0      6      N
108  BARRA11250   1.400      0.0      7      N
110  BARRACAN670   1.600      0.0      5      S
111  EICT-CAN670   11.8      0.0      2      H
112  BARRCAN670    1.600      0.0      5      H
120  BARRA-FILTSH  11.9      0.0      2      H
130  BARRA-FILSTM  11.9      0.0      2      H
200  BARRA200      11.9      0.0      2      S
202  BARRA2175    1.400      0.0      7      M
300  BARRA300      11.9      0.0      2      S
302  BARRA2R400    1.400      0.0      7      M
304  BARRA2B400    1.715      0.0      4      M
306  BARRA2C400    1.750      0.0      3      M
308  BARRA2A125    1.440      0.0      9      S
310  BARRA2S125    1.400      0.0      8      H
312  BARRA2K100    1.200      0.0     10      H
400  BARRA400      11.9      0.0      2      S
402  BARRA2F150    1.400      0.0      7      H
 10  BARRA10      1381.0     0.0      1      H
 20  BARRA20      11.8      0.0      2      H
 21  BARRA21      11.9      0.0      2      H
 12  BARRA12      11.9      0.0      2      S
 14  BARRA14      11.3      0.0      2      H
 21  BARRA22      11.9      0.0      2      H
 23  BARRA23      11.9      0.0      2      H
 25  BARRA25      11.9      0.0      2      H
 27  BARRA27      11.9      0.0      2      H
 29  BARRA29      11.9      0.0      2      H
 14  BARRA24      11.9      0.0      2      H
 26  BARRA26      11.9      0.0      2      H
 28  BARRA28      11.9      0.0      2      H
 31  BARRA31      11.9      0.0      2      H
 30  BARRA30      11.9      0.0      2      H
 32  BARRA32      11.9      0.0      2      H
 34  BARRA34      11.9      0.0      2      H
9999
DCTR INMR
 1      138.0
 2      11.90
 3      0.750
 4      0.715
 5      0.600
 6      0.575
 7      0.480
 8      0.460
 9      0.440
10      0.280
99
DEFO
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
12  200,133000  0.390300  0.013210  0.985  S  0  0  0.000  1  H  D
20  210,133000  0.390300  0.013210  0.390  S  0  0  0.000  1  H  D
21  2000,133000 0.390300  0.013210  0.300  S  0  0  0.000  1  H  D
200 1000,133000  0.390300  0.013210  0.150  S  0  0  0.000  1  S  D
300 1110,093000  0.109000  0.265000  0.300  S  0  0  0.000  1  S  D
 12  220,133000  0.390300  0.013210  0.520  S  0  0  0.000  1  H  D
 22  230,190000  0.392300  0.012901  0.455  S  0  0  0.000  1  H  D
 23  250,107000  0.403400  0.012603  0.285  S  0  0  0.000  1  H  D
 23  270,133000  0.390300  0.013210  0.720  S  0  0  0.000  1  H  D
 37  290,193000  0.390300  0.013210  0.930  S  0  0  0.000  1  H  D
 25  3000,107000  0.403400  0.012603  0.460  S  0  0  0.000  1  H  D
 12  240,133000  0.390300  0.013210  0.500  S  0  0  0.000  1  H  D
 24  260,133000  0.390300  0.013210  0.200  S  0  0  0.000  1  H  D
 26  280,107000  0.403400  0.012603  0.705  S  0  0  0.000  1  H  D
 28  311,591200  0.522000  0.809449  0.750  S  0  0  0.000  1  H  D
 28  4000,595400  0.451400  0.011174  0.200  S  0  0  0.000  1  H  D
 12  300,133000  0.390300  0.013210  0.305  S  0  0  0.000  1  H  D
 30  320,107000  0.403400  0.012603  0.309  S  0  0  0.000  1  H  D
 32  340,107000  0.403400  0.012603  0.030  S  0  0  0.000  1  H  D
9999
DEFO COST
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
10  01.712000  9.940000  000000000.  0  0  5000.0000.  1  H  D

```



202	00.000100	00000000	201.477000	0	0	0000.0000.	1	S	D
100	1200.000100	00000000	25.050000	0	0	0000.0000.	1	N	D
120	00.220000	4.213600	00000000.	0	0	0000.0000.	1	S	D
100	1300.000100	00000000	12.540000	0	0	0000.0000.	1	N	D
130	00.310000	4.320400	00000000.	0	0	0000.0000.	1	S	D
110	01.029000	00000000	00000000.	0	0	0000.0000.	1	N	D
130	00.000100	0.720000	00000000.	0	0	0000.0000.	1	N	D
130	00.000100	00000000	3103.000000	0	0	0000.0000.	1	N	D
112	01.029000	00000000	00000000.	0	0	0000.0000.	1	N	D
112	00.000100	0.720000	00000000.	0	0	0000.0000.	1	N	D
112	00.000100	00000000	3103.000000	0	0	0000.0000.	1	N	D

9999

DTR:

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	330.0000	0.00000	12	11.90000	0.00000	0.000000	0.000000		
15.000000	0	0	1.000000	1	N	P			
30	330.0000	0.00000	14	11.90000	0.00000	0.000000	0.000000		
15.000000	0	0	1.000000	1	N	P			
100	12.00000	0.00000	102	0.575000	0.00000	0.000556	0.055600		
1.250000	0	0	1.000000	1	S	P			
111	12.00000	0.00000	108	0.400000	0.00000	0.000549	0.054900		
1.500000	0	0	1.000000	1	N	P			
100	12.00000	0.00000	104	0.575000	0.00000	0.000554	0.055400		
1.250000	0	0	1.000000	1	S	P			
100	12.00000	0.00000	106	0.575000	0.00000	0.000445	0.044500		
2.000000	0	0	1.000000	1	S	P			
111	12.00000	0.00000	110	0.400000	0.00000	0.000550	0.055000		
0.800000	0	0	1.000000	1	S	P			
111	12.00000	0.00000	112	0.400000	0.00000	0.000550	0.055000		
0.800000	0	0	1.000000	1	S	P			
300	12.40000	0.00000	302	0.400000	0.00000	0.000631	0.063100		
0.750000	0	0	1.000000	1	N	P			
300	13.40000	0.00000	304	0.715000	0.00000	0.000350	0.035000		
0.750000	0	0	1.000000	1	N	P			
300	12.00000	0.00000	308	0.750000	0.00000	0.000433	0.043300		
0.500000	0	0	1.000000	1	M	P			
300	12.40000	0.00000	308	0.440000	0.00000	0.000504	0.050400		
0.150000	0	0	1.000000	1	M	P			
300	12.60000	0.00000	310	0.460000	0.00000	0.000504	0.050400		
0.150000	0	0	1.000000	1	N	P			
300	12.60000	0.00000	312	0.280000	0.00000	0.000504	0.050400		
0.225000	0	0	1.000000	1	N	P			
400	12.60000	0.00000	402	0.400000	0.00000	0.000504	0.050400		
0.500000	0	0	1.000000	1	N	P			
200	12.60000	0.00000	202	0.400000	0.00000	0.000504	0.050400		
0.300000	0	0	1.000000	1	N	P			

9999

DTR: WDR

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1415	180000	0.466000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
242	087000	0.456000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
261	199000	1.057000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
280	141000	0.328000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
4000	144000	0.128000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
311	003000	0.892000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
220	116000	0.302000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
230	125000	0.310000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
250	433000	0.370000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
3000	228000	0.201000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
270	059000	0.755000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
290	058000	0.755000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
200	239000	0.210000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
210	100000	0.088000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
1000	000000	0.790000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
300	018000	0.016000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
320	143000	0.126000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M
340	530000	2.232000	1.000000	F	0	0	0.0000.0000.0000.0000.0000		M

9999

DTR: DRB

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9
202	C								
180.		3.157							
300.		40.730							
420.		22.565							
540.		0.737							
660.		11.514							
780.		0.083							
900.		0.779							
1020.		2.568							
1140.		4.094							
1260.		0.568							
1380.		2.587							
1500.		2.231							
-9999.									
102	C								
180.		15.022							
300.		189.275							
420.		119.472							
540.		8.012							
660.		54.779							
780.		40.158							
900.		4.707							
1020.		15.822							
1140.		11.957							
1260.		2.303							

1380.	8,913
1500.	7,110
-9999.	
104 C	
180.	15,022
300.	189,275
420.	118,471
540.	9,012
660.	54,779
780.	40,158
900.	4,707
1020.	15,322
1140.	11,917
1260.	2,303
1380.	8,913
1500.	7,110
-9999.	
108 C	
180.	22,490
300.	258,831
420.	158,780
540.	10,046
660.	67,320
780.	40,332
900.	5,394
1020.	18,142
1140.	15,143
1260.	2,700
1380.	14,544
1500.	13,194
-9999.	
106 C	
180.	27,564
300.	444,501
420.	256,935
540.	10,769
660.	134,728
780.	82,179
900.	5,760
1020.	42,071
1140.	24,540
1260.	4,500
1380.	20,284
1500.	18,525
-9999.	
102 C	
180.	3,202
300.	92,589
420.	62,849
540.	1,353
660.	29,528
780.	20,021
900.	1,400
1020.	9,843
1140.	6,530
1260.	0,712
1380.	3,361
1500.	3,025
-9999.	
308 C	
180.	4,840
300.	62,109
420.	42,237
540.	1,501
660.	19,844
780.	15,455
900.	1,129
1020.	6,615
1140.	4,389
1260.	0,613
1380.	2,259
1500.	2,033
-9999.	
306 C	
180.	4,620
300.	59,253
420.	40,230
540.	1,506
660.	18,901
780.	12,816
900.	1,076
1020.	6,300
1140.	4,180
1260.	0,584
1380.	2,151
1500.	1,936
-9999.	
308 C	
180.	2,454
300.	31,279
420.	17,995
540.	1,763
660.	8,590
780.	5,313
900.	1,440



## CONCLUSIONES

Los sistemas eléctricos tienen como finalidad básica, dar atención a los consumidores dentro de padrones de continuidad, grados de adecuación, seguridad aceptables y al menor costo global posible. Evidentemente a pesar de todo los esfuerzos que se vayan a realizar, los sistemas estarán siempre sujetos a problemas que puedan llevar a la interrupción y mala calidad del suministro de energía a los consumidores. Como la energía eléctrica es un insumo para cada uno de los consumidores, la interrupción y mala calidad de esta puede originar serios trastornos, como por ejemplo: pérdida de la producción, pérdida de la materia prima, ociosidad de las instalaciones y de mano de obra, etc. Siendo por tanto importante que se entiendan los problemas causados por estas interrupciones, así como los costos asociados a estas.

Un problema de calidad de energía, es cualquier fenómeno de origen eléctrico que interrumpe el correcto funcionamiento de los sistemas y equipos eléctricos.

Hay generalmente dos tipos básicos de problemas en la calidad de la energía

- 1.- Los que crea la interrupción de cargas eléctricas o de circuitos enteros
- 2.- Los que causan la interacción del equipo eléctrico y el sistema de suministro eléctrico.

Los armónicos son creados por cargas no lineales que absorben corrientes en impulsos bruscos en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal. Estos impulsos crean ondas de corriente distorsionadas que originan a su vez corrientes armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

Este fenómeno se manifiesta especialmente en los equipos provistos de fuente de alimentación de entrada con condensadores y diodos, es decir, ordenadores personales, impresoras y material electromédico.

Los armónicos son corrientes o tensiones cuya frecuencia son múltiplos enteros de frecuencia fundamental de la alimentación

En la actualidad, los armónicos son un subproducto de la electrónica moderna, se manifiestan donde hay un gran número de ordenadores personales, motores de velocidad regulable y otros equipos que absorben corriente en forma de impulsos. Cuando hay armónicos la forma de la onda no presenta una forma sinusoidal, la forma de la onda aparece distorsionada. Decimos que estas ondas son no sinusoidales.

La relación entre la corriente armónica absorbida por cargas no lineales y la impedancia de la fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm, lo que provoca armónicos de tensión. La impedancia de fuente la constituye el transformador de alimentación y los componentes del ramal.

La propia red de alimentación puede ser una fuente indirecta de los armónicos de tensión.

Las armónicas generadas en los sistemas de potencia son producidas por diferentes fuentes conectadas a la red, como son: convertidores estáticos, máquinas rotativas transformadores y equipos de arco.

Junto a los convertidores estáticos hay dos cargas no - lineales que debido a su contribución de armónicas necesitan ser consideradas, estos son los equipos de arco y lámparas fluorescentes.

La distorsión de tensión puede causar la operación errónea de controladores, quema de capacitores, sobrecalentamiento de motores y transformadores y aumento general de pérdidas en el sistema. Es por consiguiente un problema de calidad de energía.

En los sistemas eléctricos de potencia A.C, las corrientes armónicas fluirán por el camino de menor impedancia. Estas armónicas se dividirán de acuerdo a la razón de impedancia de las ramas. Normalmente la fuente de potencia es el camino de baja impedancia, por lo tanto la mayoría de las corrientes armónicas fluirán hacia ella, sin embargo si existen instalaciones de capacitores de potencia, un problema podría ocurrir cuando la reactancia capacitiva de los capacitores de potencia es igual a la

reactancia inductiva equivalente del sistema.

La resonancia en paralelo produce una alta impedancia al flujo de corriente cuya frecuencia corresponde a la frecuencia de resonancia. La resonancia en serie produce en cambio un circuito de baja impedancia. La condición de resonancia paralelo puede causar oscilaciones de corriente que son excitadas por la corriente de resonancia en paralelo, Estas corrientes que fluyen a través de impedancias producen voltajes armónicos, produciendo entonces formas de onda de voltaje distorsionado.

Las corrientes armónicas pueden ocasionar un excesivo calentamiento en las máquinas rotativas. Las corrientes armónicas de secuencia de fase positiva y negativa, ambas causan calentamiento adicional en el rotor sólido de las grandes máquinas sincrónicas. Esto limita la cantidad de carga rectificadora que pueden servir los generadores sincrónicos. El efecto más importante en las máquinas rotativas es la pérdida del cobre, y este produce calentamiento en los sitios cerrados y cubiertos. Este efecto tiene gran importancia con abertura de rotor profundo, en esta la impedancia del rotor se ve incrementada por la frecuencia.

Los dispositivos tales como voltímetros y relés de sobrecorriente, que funcionan mediante disco de inducción, solo ven circulando la corriente fundamental pero debido a las fases desbalanceadas que son producto de la distorsión armónica, puede producir la operación errónea de estos dispositivos.

El efecto de los componentes armónicos sobre los bancos de capacitores es causa de incremento en las pérdidas eléctricas, y producen calentamiento en los capacitores.

En los transformadores, la influencia de los terceros armónicos puede ser clasificada como sigue:

- a) Sobrecalentamiento de los devanados del transformador y en la carga.
- b) Esfuerzos en la aislación.

Elementos electrónicos tales como: rectificadores, inversores, ciclo convertidores son sensibles al punto de cruzamiento cero de la onda de voltaje y estos son

afectados por la distorsión armónica.

El efecto más importante en los convertidores es el desplazamiento del punto neutro (conmutación). Las siguientes recomendaciones son una guía para la protección de los armónicos en los equipos electrónicos.

Los bancos de capacitores en la subestaciones son los componentes dominantes en las respuestas armónicas y transientes del sistema de distribución. La respuesta armónica del sistema de distribución esta dominada por la inductancia y capacitancia paralela L.C, incluyendo circuitos del banco capacitor de la subestación y la reactancia equivalente de la fuente.

La proliferación de equipos causantes de perturbaciones es una preocupación creciente como sus efectos, llevan a la necesidad de establecer criterios y procedimientos que posibiliten la convivencia armoniosa entre los equipos perturbadores y equipos sensibles a las perturbaciones de tensión

Estos criterios y procedimientos suministran elementos que permiten a las empresas de energía evaluar la calidad del servicio con respecto de los niveles de distorsiones armónicas, controlar las perturbaciones causadas por las cargas no lineales en operación y cuantificar el impacto de la instalación u ampliación de cargas generadoras de armónicos en el horizonte planeado, identificando la necesidad de medidas correctivas. Además de esto, posibilita a los consumidores adecuar sus equipos y sistemas de proceso al padrón de servicio garantizado por la empresa.

También estas recomendaciones pueden servir como orientación a los consumidores y a los fabricantes de los equipos electro- electrónicos, para que no sean producidos o utilizando dispositivos o procesos excesivamente causantes o excesivamente sensibles a las perturbaciones.

La base para estos criterios y procedimientos son

- 1,- Establecer un conjunto simple y coherente de recomendaciones de forma que su aplicación sea conveniente desde el punto de vista practico.
- 2,- Limitar los efectos de las perturbaciones dentro de niveles aceptables, de

forma que garantiza a los usuarios el suministro de energía de calidad satisfactoria a sus necesidades.

- 3.- Establecer criterios y procedimiento que puedan ser aplicados en los etapas de planeamiento y de operación de las empresas eléctricas y consumidores en la evaluación de cargas especiales.

En el presente tiempo no existe una especificación uniforme sobre los límites admisibles del contenido de armónicas existente en los sistemas de potencia. El incremento en la industria del uso de dispositivos semiconductores cada vez se hace mayor, pudiendo producirse un difícil problema en el futuro, lo cual debe ser previsto ahora.

En la mayoría de las normas existentes, el requerimiento más importante consiste en limitar la distorsión de tensión en el punto de conexión común PCC del convertidor con otros consumidores

La norma IEEE 519 es una práctica recomendada para la corrección del factor de potencia y para la limitación del impacto armónico en los equipos y en los sistemas eléctricos.

Un aspecto fundamental e innovador es la división de responsabilidades de problema de armónicos entre los consumidores y la empresa de suministro de energía, Consecuentemente ella establece límites de distorsión de tensión en el punto de unión, que son responsabilidad de la concesionaria y límites de distorsión de corriente, en el punto de unión que son responsabilidad del consumidor,

Los límites de tensión y de corriente por consumidor pueden ser violados en algunos casos, a criterio de las empresa eléctricas, en base de un análisis técnico económico

La violación de los límites globales de tensión solo deben ser aceptados con carácter temporal y en casos excepcionales, tales como indisponibilidad del equipo de filtrado o contingencias, en estos casos debe haber un monitoreo continua de los niveles de distorsión existentes en el sistema.

El monitoreo de la calidad de la energía en las primeras etapas de planeación de una



planta o de la instalación de cargas sensibles, proporciona información sobre si existe o no problemas de calidad de la energía. El monitoreo puede consistir inicialmente en

El tiempo óptimo para la planeación de la calidad de la energía es durante el diseño de construcción

Los procedimientos para la evaluación de las perturbaciones provocadas por una carga no lineal en las fases de planificación, pre-operacional y de operación.

Cualquier equipo electrónico o accionado por electricidad puede diseñarse y construirse para soportar los problemas que más puedan esperarse de calidad de la energía. Los fabricante de equipo es deben tomar un decisión de negocios para fabricar sus productos de manera que soporten las situaciones que pueden esperarse normalmente.

Los filtros de las corrientes armónicas pueden reducir apreciablemente el flujo de corrientes armónicas al sistema de potencia, y presentan la ventaja adicional de compensar la potencia reactiva asociada a los procesos de conmutación y control de los convertidor. Dichos circuitos de filtrado en resonancia que emplean reactancias en serie con los condensadores. Los circuitos en resonancia deben estar sintonizados de tal forma que presentan una impedancia para las corrientes armónicas individuales que se aproxime a cero y que sea muy reducida en comparación con la impedancia del sistema de suministro de energía. En general, los filtros de armónicas son diseñados para servir dos procesos.

- 1.- Reducir los niveles del flujo de las corrientes armónicas
- 2.- Proporcionar toda o parte de la potencia reactiva requerida por el convertidor.

Las dimensiones del circuito de filtrado se ha de basar en:

- 1.- Las corrientes armónicas de las cargas

- 2.- El nivel de armónicos de la tensión de la red de alimentación superpuesta.
- 3.- La reactancia de cortocircuito en el punto de conexión

Los filtros reducen la amplitud de una o más corrientes o tensión de cierta frecuencia, generalmente consiste en uno o más circuitos sintonizados LC, con un factor de calidad (Q) razonablemente alto, alrededor de 20 ó más. El grado de supresión de armónicas, afecta al costo y la eficiencia de los equipos convertidores de gran potencia AC/DC.

Al realizar un análisis de un sistema eléctrico de potencia, asumir de barras de voltaje del tipo sinusoidal, puede ser no adecuada debido a la interacción entre las corrientes y los voltajes de las señales armónicas, y muy en especial cuando se producen condiciones de resonancia.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- G.T. Heydt, "Electric Power Quality", Stars in a Circle Publications, 1991
- 2.- GCOI / SCEL / CECE / GCPS /GCTST / GTCP, "Criterios y procedimientos para la atención a consumidores con cargas especiales", Seminario de Calidad de Energía Eléctrica, Espol, FIEC. Noviembre 1996.
- 3.- Donald g. Fink y H.Wayne Beaty, "Manual de Ingeniería Eléctrica", Décima Tercera Edición, Tomos I, I I, I I I, y IV, McGraw-Hill, 1993.
- 4.- IEEE "Guide for Harmonic Control and Reactive Compensations of Static Power Convers," IEEE Proyect No,519, July, 1979, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc.
- 5.- J. Arrillaga, D. Bradley y P. Bodger, "Power System Harmonic", Jhon Wiley and Sons, ChinChester U.K, 1979.
- 6.- Georg Will, "Corrección del Factor de Potencia, Principios Básicos, Aplicaciones Practicas y Supresión de Armónicos" Cuadernos 5, 6 y 7. Elektrodienst, Año Vigésimo, 1978.
- 7.-William D. Stevenson, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", Segunda Edición, McGraw-Hill, 1979.
- 8.- Irving L. Kosow, "Maquinas Eléctricas y Transformadores", Capítulos 12, 14, Segunda Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1993.

9.- Westinghouse Corporation, " The Westinghouse Transmission and Distribution Handbook", Westinghouse, E. Pittsburgh, PA, 1965.

10.- American National Institute (ANSI ), " National Electrical Code ", ANSI / NFPA 70-1990.

11.- Comportamiento Armónico de Sistemas Eléctricos, " Manual de el Usuario", Centro de Pesquisas de Energía Eléctrica (CEPEL), 1996.

12.- IEEE, "Estándares y Bibliografía", [www. standards.ieee.org](http://www. standards.ieee.org) y [www. biblio.ieee.org](http://www. biblio.ieee.org), IEEE Home Page. 1997.