

25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGON

EVALUACION DE DISTORSION CAUSADA  
POR ARMONICAS EN CIRCUITOS DE  
DISTRIBUCION CON COMPENSACION EN  
DERIVACION DESCONECTABLE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICO

P R E S E N T A:

HECTOR / CORTES FERNANDEZ

298983

ASESOR

ING. RAUL BARRON VERA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

*A la UNAM, ENEP Aragón por haberme cobijado en sus aulas, bibliotecas y laboratorios durante mi formación profesional.*

*Al Instituto de Investigaciones Eléctricas, por las facilidades otorgadas durante mi estancia para la elaboración de esta tesis.*

*Al Honorable jurado y Profesores, en especial a aquellos que me brindaron su ayuda, apoyo y sobretodo su amistad.*

*A mis compañeros y amigos, que compartieron parte de su valioso tiempo en mi y en nuestra amistad.*

*Al Dr. Raúl Velázquez Sánchez y al Ing. Raúl Barrón Vera, por haberme dirigido esta tesis y sobretodo por sus valiosos comentarios y críticas de la misma.*

*A la empresa INELAP, por otorgarme información muy valiosa para la complementación de mi tesis, en especial al Ing. Ignacio Suárez.*

*Al CENIDET, por dejarme participar en uno de sus proyectos relacionado con mi tema de tesis, en especial al MC. Ciro Núñez por la información proporcionada y por brindarme su amistad de manera desinteresada.*

*A mis compañeros de la gerencia de Transmisión y Distribución, por hacerme parte del equipo de investigación y por apoyarme con consejos y críticas cuando lo necesité, en especial a los MC. Isaías Ramírez, Gerardo Montoya, Gustavo Regalado, Ramiro Hernández, a los técnicos Manuel y Evaristo; al Dr. Dionisio Suárez del área de Control de Procesos, también a las personas de mantenimiento por su amistad y apoyo, en especial a el Sr. Felipe, David y Oscar.*

*También agradezco a las personas que sin intención he dejado de mencionar y que de alguna manera contribuyeron con la realización de esta tesis.*

*A todos Uds. Mil GRACIAS . . .*

## DEDICATORIAS

*A Dios y la Virgen de Guadalupe por prestarme vida y salud para ver culminada una etapa más de mi formación profesional.*

*A mis Padres por todo el amor, apoyo, consejos, regaños y esperanzas que depositaron en mi para poder llegar a esta etapa de mi vida, a ti Mamá por esos desvelos y noches de preocupación que tuviste conmigo, a ti Papá por esa conducta asertiva, el carácter fuerte y sobre todo la ilusión que tenías por verme convertido en el mejor ingeniero del mundo me llevaron a esforzarme al máximo para no defraudarlos ...*

*A mis hermanos (as) que de manera indirecta me ayudaron a llegar al final de mi carrera, con su ejemplo y disciplina ...*

*A mis sobrinos que actualmente están estudiando, quiero servirles de ejemplo para que continúen con su formación académica y no se den por vencidos al presentarseles cualquier obstáculo ...*

*A mi cuñado Ricardo, espero que al igual que yo, logre terminar su carrera de ingeniería porque me consta el esfuerzo que están haciendo sus padres por dejarle la mejor de las herencias ...*

*A mis amigos de la ENEP Aragón, en especial a: Alejandro Segura, Pelé Gómez, Oscar J. García, Roberto Hernández, Ernesto Sánchez y Miguel A. Becerril por brindarme su valiosa amistad y por los buenos y malos momentos que vivimos durante nuestra etapa de estudiantes ...*

*Dedico esta tesis a una mujer muy especial para mi, por el apoyo incondicional, paciencia y amor que me brindó durante el transcurso de mi carrera, agradezco profundamente a mi linda esposa: Maritza ...*

*A cada uno de ustedes, un beso y un abrazo donde quiera que estén . . .*

---

# INDICE

INTRODUCCIÓN .....	viii
--------------------	------

## CAPITULO I

### **DISTORSION CAUSADA POR ARMONICAS, CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES.**

1.1 Definición de Armónicas .....	2
1.2 Causas .....	3
1.2.1 Convertidores Estáticos de Potencia .....	4
1.2.2 Rectificadores Monofásicos .....	5
1.2.3 Rectificadores Trifásicos .....	6
1.3 Efectos .....	8
1.3.1 Efectos en Sistemas de Potencia .....	9
1.3.2 Efectos en Cargas .....	14
1.3.3 Efectos en Comunicaciones .....	19
1.4 Soluciones .....	21
1.4.1 Filtros en Derivación .....	21
1.4.2 Convertidores Multipulsos .....	25
1.4.3 Cancelación de Armónicas por Inyección .....	25

## CAPITULO II

### **REVISION DE LA NORMALIZACION SOBRE NIVELES DE DISTORSION ARMONICA RECOMENDADOS PARA REDES DE DISTRIBUCION**

2.1 Filosofía de la Norma IEEE-519 .....	28
2.2 Desarrollo de los límites de distorsión Armónica .....	29
2.2.1 Límites en la Conmutación de las Muestras .....	31
2.2.2 Límites de Distorsión de Corriente .....	32
2.2.3 Límites de Distorsión de Voltaje .....	35
2.2.4 Aplicación de la Probabilística en límites de Distorsión .....	36
2.3 Normatividad en otros países .....	37
2.4 Discusión sobre las Normas .....	39

## CAPITULO III

### **METODOLOGIA PARA ANALISIS Y SIMULACION DEL FENOMENO DE RESONANCIA EN REDES DE DISTRIBUCION.**

3.1	La Resonancia .....	42
3.1.1	Resonancia Serie .....	43
3.1.2	Resonancia Paralelo .....	43
3.2	Identificando los Objetivos del Análisis Armónico .....	44
3.3	Metodología para el diagnóstico y control de armónicas .....	44
3.3.1	Mediciones de la Distorsión Armónica .....	45
3.4	Modelado y Simulación de Armónicas .....	46
3.4.1	Modelado de las Fuentes Armónicas .....	46
3.5	Sistemas de Distribución y otros elementos de modelado .....	47
3.5.1	Consideraciones Generales .....	47
3.5.2	Modelado de las Cargas .....	49
3.5.3	Modelos Recomendados .....	50
3.5.4	Modelado de las Armónicas en Redes .....	54
3.6	Preparación de datos .....	59
3.7	Simulación .....	61

## CAPITULO IV

### **EJEMPLOS DE APLICACION**

4.1	Ejemplo I .....	63
4.2	Ejemplo II.....	64
4.3	Ejemplo III.....	70
4.4	Ejemplo IV .....	75
4.5	Ejemplo V .....	78
4.6	Ejemplo VI .....	83

CONCLUSIONES .....	85
REFERENCIAS .....	86
ANEXO A .....	90
ANEXO B .....	93
DEFINICIONES .....	94

## INDICE DE FIGURAS

1.1 Frecuencia fundamental (60 Hz) de una onda senoidal y las Armónicas.....	3
1.2 Rectificador de onda completa con una carga resistiva, una fase.....	5
1.3 Corriente de AC dada por un suministro interruptivo de energía.....	6
1.4 Rectificador de seis pulsos, 3 Fases.....	7
1.5 Formas de onda de corriente en un sistema de AC de una carga inductiva en un puente rectificador.....	8
1.6 Características típicas de los sistemas de distribución.....	9
1.7 Banco de capacitores que produce la Resonancia Serie.....	10
1.8 Condiciones de Resonancia Paralela.....	11
1.9 Respuesta del sistema que ilustra el efecto de la carga resistiva con la resonancia paralela.....	14
1.10 Los cables vs. Armónicas.....	16
1.11 Valores de 1960 para TIF.....	20
1.12 Diagrama del filtro de armónicas.....	22
1.13 Reactores Hans Von Mangoldt .....	23
1.14 Vistas de un filtro de armónicas.....	24
1.15 Gráfica de la forma de onda Distorsionada y Filtrada.....	24
1.16 Esquema General de un Filtro Activo .....	26
2.1 Definición de la Profundidad de la Muesca y el Área de la Muesca.....	32
2.2 Distribución de probabilidad para la THD de Corriente.....	37
2.3 Perfil de THD de corriente en una fase teniendo una relación $I_{cc}/I_c < 20$ en un sistema de Distribución $< 69$ kV.....	39
3.1 Resonancia Serie.....	43
3.2 Resonancia Paralelo.....	43
3.3 Efecto de la resonancia en paralelo originada por la instalación de capacitores en derivación.....	44
3.4 Configuración típica de un sistema de distribución.....	48
3.5 Arreglo Dominante.....	48
3.6 Sistema de Distribución, cargas y otros elementos.....	49
3.7 Representación total del Sistema.....	50
3.8 Modelo de Carga A.....	53
3.9 Modelo de Carga B.....	53
3.10 Modelo de Carga C.....	54
3.11 Modelo de Carga D.....	54
3.12 Diagrama Unifilar de un Sistema Primario de Distribución.....	56
3.13 Modelo Genérico de la carga por fase.....	58
3.14 Diagrama Unifilar de una Planta Industrial.....	59
4.1 Diagrama de Prueba .....	63
4.2 Gráfica de Impedancia vs. Frecuencia para la figura 4.1 .....	64

4.3	Red de Distribución con cargas No Lineales en el Bus 900.....	65
4.4	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 800.....	66
4.5	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 700.....	67
4.6	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600.....	68
4.7	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 900 y Compensación en el Bus 400.....	70
4.8	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 800 y Compensación en el Bus 400.....	71
4.9	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 700 y Compensación en el Bus 400.....	72
4.10	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400.....	73
4.11	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400 y Bus 700.....	79
4.12	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400 y Bus 800.....	80
4.13	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400 y Bus 900.....	81
4.14	Resonancia Paralela en la 7 <sup>a</sup> y 12 <sup>a</sup> Armónica.....	82
4.15	Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400, 700, 800 y 900.....	83
4.16	Resonancia Paralela en la 5 <sup>a</sup> y 15 <sup>a</sup> Armónica.....	84

## INDICE DE TABLAS

1.1	Espectro de un suministro interruptivo de potencia.....	6
1.2	Valores TIF de 1960 para una sola frecuencia.....	20
2.1	Bases para limitar la corriente armónica.....	30
2.2	Clasificación de Sistemas de bajo voltaje y límites de Distorsión.....	31
2.3	Límites de Distorsión de Corrientes para Sistemas Generales de Distribución (120 V hasta 69 000 V).....	34
2.4	Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Generales de Subtransmisión (69 001 V hasta 161 000 V).....	34
2.5	Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Generales de Transmisión (> 161 kV) .....	34
2.6	Límites de Distorsión de Voltaje.....	36
2.7	Límites de Distorsión permitidos en diferentes países.....	38
3.1	Composición de las Cargas.....	51
3.2	Datos típicos necesarios para estudios de armónicas en redes de distribución.....	60
4.1	Lecturas obtenidas de la Figura 4.1 .....	63
4.2	Lecturas obtenidas al cambiar los VA de $T_1$ de la Figura 4.1 .....	64
4.3	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.3.....	65
4.4	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.3.....	65
4.5	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.4.....	66
4.6	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.4.....	66
4.7	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.5.....	67
4.8	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.5.....	67
4.9	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.6.....	68
4.10	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.6.....	68
4.11	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.7.....	70
4.12	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.7.....	70
4.13	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.8.....	71
4.14	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.8.....	71
4.15	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.9.....	72
4.16	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.9.....	72
4.17	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.10.....	73
4.18	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.10.....	73
4.19	Valores de $V_{THD}$ para la Figura 4.10, aplicando el banco de capacitores por pasos.....	75
4.20	Valores de $I_{THD}$ para la Figura 4.10, aplicando el banco de capacitores por pasos.....	75
4.21	Datos necesarios para la corrección del FP, obtenidos del Flujo de Carga.....	78
4.22	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.11.....	79
4.23	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.11.....	79
4.24	Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.12.....	80
4.25	Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.12.....	80

4.26 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.13.....	81
4.27 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.13.....	81
4.28 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.15.....	83
4.29 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.15.....	83

## INDICE DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

- **AC:** Corriente Alterna.
- **A<sub>n</sub>:** Área de la muesca
- **ASD:** (Adjustable Speed Drive) Drive de Velocidad Ajustable.
- **C:** Capacitancia equivalente del Sistema.
- **DC:** Corriente Directa.
- **f<sub>1</sub>:** Frecuencia Nominal del Sistema ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ )
- **f<sub>R</sub> = f<sub>o</sub>:** Frecuencia Resonante.
- **h:** (*harmonic*) Armónica.
- **I<sub>h</sub>:** Corriente Armónica
- **I<sub>L</sub>:** Máxima demanda de corriente de carga (componente de la frecuencia fundamental) al PCC
- **I<sub>sc</sub>:** Máxima corriente de corto circuito PCC.
- **I<sub>sc</sub>/I<sub>L</sub>:** Es la proporción de corriente de cortocircuito disponible en el PCC para la máxima corriente fundamental de carga.
- **K:** Fracción de la inductancia
- **L:** Inductancia equivalente del Sistema.
- **PCC:** (Point of Common Coupling) Punto Común de Acoplamiento.
- **Q:** Potencia Reactiva del Sistema (VAR).
- **$\theta_{X/R}$ :** Angulo cuya tangente es la proporción X/R del sistema.
- **R:** Resistencia.
- **R<sub>CD</sub>:** Resistencia de Corriente Directa.
- **S:** Potencia Aparente del Sistema (VA).
- **X<sub>t</sub>:** Reactancia del transformador.
- **X<sub>c</sub>:** Reactancia Capacitiva.
- **X<sub>L</sub>:** Reactancia Inductiva
- **V<sub>h</sub>:** Voltaje Armónico
- **$\omega$ :** Radian ( $2\pi f$ )
- **V<sub>1</sub>:** Voltaje fundamental de línea a neutro (rms).
- **Z<sub>h</sub>:** Impedancia del sistema en el orden armónico h.

---

# INTRODUCCIÓN

---

Bajo consideraciones ideales de operación en los sistemas eléctricos de potencia, se espera tener un sistema balanceado, con una única y constante frecuencia y a través de las redes, una forma de onda senoidal constante y con una amplitud específica. Desafortunadamente, esta operación no es ideal en la práctica, ya que en las líneas de transmisión y distribución tienen componentes que ocasionan distorsión en la forma de onda. La mayor contribución de los efectos de distorsión, provienen de las cargas No Lineales. Estos componentes actúan como fuentes de corriente armónica en las redes eléctricas.

Los fenómenos No lineales, así como la interacción entre el estator-rotor, la saturación magnética en las máquinas síncronas, así también como la saturación en los transformadores de potencia son conocidos ejemplos de fuentes de distorsión armónica. Por otro lado, como consecuencia del continuo avance de la tecnología, el incremento en el uso de artefactos de estado sólido para múltiples aplicaciones en sistemas eléctricos ha aumentado dramáticamente, agravando los problemas asociados con la distorsión de la forma de onda así también como pérdidas adicionales en el sistema reduciendo la vida útil de los equipos y ocasionando interferencia con las redes de comunicaciones.

La incorporación de los convertidores estáticos de potencia en transmisión de altos voltajes ha permitido la transferencia de grandes cantidades de energía sobre distancias considerables y de la interconexión de sistemas con diferentes frecuencias. Las ventajas de la transmisión de HVDC tiene como resultado en el incremento de nuevos vínculos de DC permitidos para entrar en operación. Sin embargo, los convertidores estáticos de potencia son considerados como la fuente principal de distorsión armónica en los sistemas de potencia. [Arrillaga, Bradley and Bodger, 1985].

Las investigaciones realizadas y la experiencia práctica sobre diversos aspectos de la distorsión armónica en los sistemas de potencias así como las causas, efectos, estándares, mediciones, simulación y eliminación han sido reunidas y detalladas en este trabajo.

El considerable crecimiento y complejidad de los modernos sistemas de potencia ha sido el resultado del incremento en los niveles de armónicas producidas en las redes, esencialmente producidas por equipos

No Lineales, esto ha ocasionado el desarrollo y adopción de estándares, guías y regulaciones para limitar la distorsión armónica. Varios países han impuesto ya una normatividad sobre armónicas [IEEE Std 519-1992], pero desafortunadamente la importancia de estos son vistas con escepticismo por las empresas suministradoras de potencia eléctrica de muchos países.

Una filosofía diferente ahora se está siguiendo por las empresas de suministro eléctrico interesándose en el incremento de la distorsión en las redes, así como el potencial necesario de tomar medidas correctivas incrementando de manera directa el problema. Las medidas correctivas son usualmente muy caras y por lo tanto se evitan cuando sea posible. La tendencia en la búsqueda de metodologías preventivas en el área de diseño, están siendo reforzadas en base a acciones preventivas, ya que estas son mas baratas que las correctivas. Sin embargo, las medidas preventivas pueden ser algo caras y por lo tanto la minimización de su costo es siempre deseable. El desarrollo de técnicas teóricamente predictivas ha proporcionado una gran ayuda y la introducción a la planificación de la ingeniería sobre los mejores procedimientos preventivos serán tomados para la operación adecuada de un sistema de potencia.

Porque las ventajas económicas y prácticas de la simulación digital sobre la escala física de los prototipos, hoy en día se puede confiar en simulación por computadora del análisis de las armónicas en sistemas de potencia.

La detección y predicción de las armónicas son normalmente los dos campos principales del análisis armónico digital. La forma de determinar y procesar el monitoreo de la información de las armónicas debe ser en tiempo real, viendo el comportamiento de las últimas predicciones de la red, basadas en modelos analíticos implementados para la simulación digital.

Una predicción precisa para la distorsión armónica en los sistemas de potencia depende no solo en el uso de rigurosos modelos de simulación, sino de suficiente información de los parámetros de la red a frecuencias armónicas. Desafortunadamente la información proporcionada por los fabricantes tiende a ser insuficiente e insegura.

Los modelos de simulación utilizados para determinar el comportamiento de los sistemas de potencia bajo diversas condiciones de operación, por ejemplo los transitorios y el estado estable, han pasado por un proceso evolutivo de sofisticación y complejidad, mismos que han sido acelerados en estos últimos 10 años con la aplicación de las computadoras para la solución de problemas prácticos de ingeniería y para el desarrollo de técnicas avanzadas de análisis.

Los modelos más simples de análisis de redes son representados por una sola fase a la frecuencia fundamental para la técnica de flujos de carga. Los primeros trabajos a frecuencias armónicas fueron desarrollados por [Kia and Heydt, 1982] para su análisis. El trabajo de [Dustan, 1954] es uno de los primeros modelos computacionales desarrollado a la frecuencia fundamental. Este modelo asume una perfecta simetría y un balanceo de sus componentes. La misma suposición se mantiene para estudios a frecuencias armónicas, aunque esta no sea una condición real tomada del lugar de operación de un sistema de potencia.

Las corrientes armónicas producidas por componentes No Lineales son especificadas por adelantado o derivadas de la solución obtenida de un algoritmo para el flujo de carga en una sola fase.

El desbalance es una característica común en los sistemas de potencia, este efecto no se puede describir con técnicas de una sola fase, se necesita una representación más real del sistema de potencia. A la frecuencia fundamental, un método para el análisis de un sistema trifásico desbalanceado, por primera vez fue propuesto por [El-Abiad and Tarsi, 1967]. El análisis de un sistema de transmisión incorporando un convertidor estático de potencia, fue reportado en los años 70 [Harker and Arrillaga, 1979]. El progreso de la investigación en las técnicas del Modelado y el análisis de los sistemas trifásicos desbalanceados fueron presentados de manera detallada [Arrillaga and Arnold 1991].

La necesidad de valorar el impacto en la respuesta de los sistemas de potencia y de los diversos componentes de la red, se ha requerido el desarrollo de alternativas de simulación, técnicas para el análisis de los sistemas de potencia desbalanceados a frecuencias armónicas.

He aquí un resumen de la historia de los métodos de Modelado y sus características.

Un método utilizado como marco de referencia la secuencia de los componentes [Mahmoud and Schultz, 1982] la propagación de las corrientes armónicas características son determinadas inicialmente por la inyección ideal de las fuentes de corriente dentro de las redes de AC.

Un Análisis Armónico Interactivo (IHA), basado en aproximaciones sucesivas de Gauss Seidel, ha sido usado para la evaluación de armónicas producidas por los artefactos No Lineales, así como los convertidores estáticos de potencia [Yacamini and de Oliveira, 1980] y los transformadores de potencia [Dommel, Yan and Wei, 1986]

Las armónicas producidas por componentes No Lineales son, en suma son desacopladas entre ellos. Este fenómeno puede no ser representado con

una técnica convencional de armónicas. Sin embargo, se han representado mas actualmente modelos de la máquina síncrona [Roark and Gross, 1978] [Semlyen, Eggleston and Arrillaga, 1987]. Modelos mas recientes incorporando el efecto de las armónicas incluye el análisis de los arcos eléctricos [Acha, Semlyen and Rajakovic, 1990], máquinas síncronas [Xu, Marti y Dommel, 1991] y los reactores controlados por tiristores [Acha, 1991].

Las componentes de las redes se describen por la transferencia de admitancias armónicas o por equivalentes de Norton, dependiendo si es lineal o no lineal. El sistema de potencia completo se describe en la forma de un equivalente de Norton o su doble (Thevenin). Esta forma es recomendable a un análisis nodal y por su flexibilidad permite la incorporación de nuevos modelos armónicos.

La idea básica de [Aprille y Trick, 1982] ha sido adoptada en trabajos recientes de análisis armónicos [Usaola y Mayordomo, 1990]. Incursiones regulares son realizadas en el dominio del tiempo para integrar un sistema dinámico de ecuaciones. Después de cada integración la solución es probada por periodicidad (convergencia) y un nuevo punto es calculado con el algoritmo de Newton Raphson en caso de que esta condición no satisfaga

### ***Resumen de Tesis***

En el Capitulo I, se describe los que son las armónicas, así también se mencionan los principales equipos que causan distorsión armónica, mencionando a los principales de estos a nivel distribución. También se hace mención a las principales efectos que ocasionan las armónicas en redes de distribución; finalmente en este capitulo se dan las soluciones más típicas para eliminar o disminuir el nivel de distorsión armónica, para que de esta manera se eviten la mayoría de los problemas que afectan a las empresas de suministro eléctrico y a los consumidores.

El Capitulo II, trata sobre la Normatividad impuesta a las redes de Distribución, para los límites permisibles de distorsión Armónica en voltaje como en corriente; también se presentan comparaciones de límites en diversos países.

El Capitulo III, hace énfasis en la metodología a seguir para la detección, corrección y control de las armónicas; así también se presentan los principales modelos utilizados para la simulación y modelado de los equipos que generan armónicas, principalmente a nivel distribución. Se explica, la importancia de la simulación como una herramienta básica en

el análisis de las armónicas, utilizando programas de computo para su solución.

El Capitulo IV, nos muestra varios ejemplos donde podemos analizar los efectos ocasionados por las armónicas, cuando intercambiamos las cargas No Lineales de lugar, así mismo vemos la gran distorsión que causan los bancos de capacitores al colocarlos cerca de una carga no lineal, fuente de armónicas, al igual que la Resonancia paralela producida a diferentes frecuencias armónicas. En este mismo capitulo, se dan varias conclusiones importantes que pueden ser tomadas en cuenta cuando se vaya a instalar un banco de capacitores.

# CAPITULO 1

---

## Distorsión Causada por Armónicas, Causas, Efectos y Soluciones

---



## 1.1 Definición de Armónicas.

Una armónica esta definida como:

**“Una componente sinusoidal de una onda periódica, teniendo una frecuencia que es un múltiplo de la frecuencia fundamental”.**

Una componente de la frecuencia que es dos veces el valor de la frecuencia fundamental, es llamada la *segunda armónica*. (IEEE Std 100-1992 [B14])<sup>\*</sup>.

Así, en un sistema de potencia a 60 Hz., una componente armónica “*h*”, es una sinusoidal teniendo una frecuencia expresada por lo siguiente:

$$h = n \text{ 60 Hz.}$$

Donde **n** es un número entero.

Las ondas senoidales que no son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental no son armónicas, pero son definidas en términos de la frecuencia fundamental en *por unidad*.

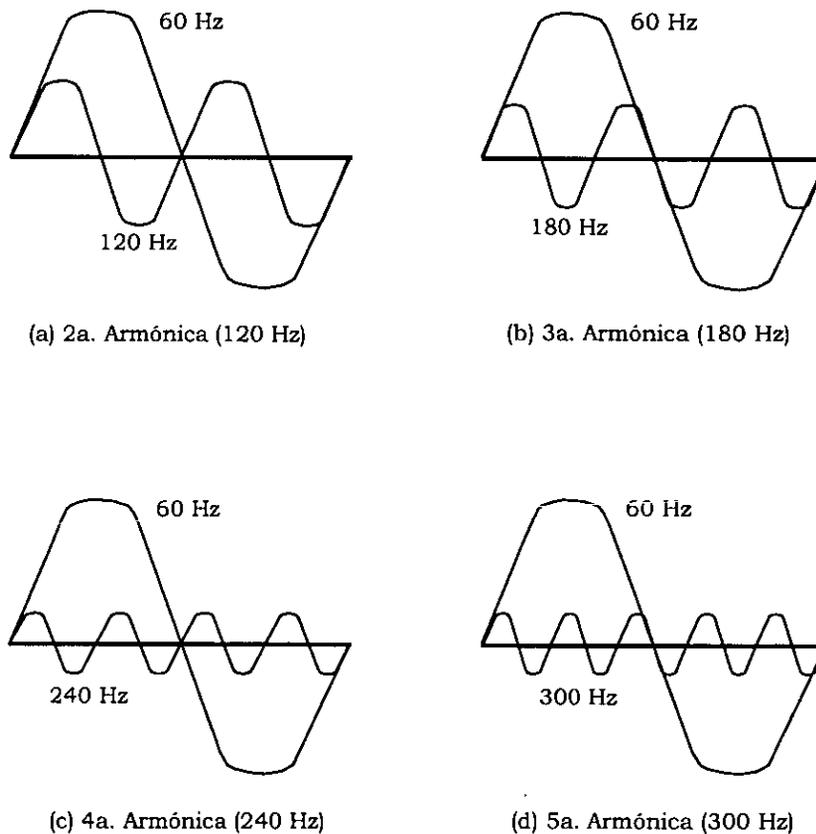
Con base en la teoría del análisis de Fourier, cualquier onda periódica derivada de una onda senoidal de amplitud constante contiene armónicos que son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental. Las armónicas de una forma de onda periódica distorsionada, puede representarse mediante una serie de Fourier.

Con la aplicación de las técnicas de análisis de Fourier, una forma de onda Periódica distorsionada puede separarse en una serie de formas senoidales con frecuencias múltiplos enteros de 60 Hz.

La Figura 1.1, ilustra la frecuencia fundamental (60 Hz.) de una onda senoidal, y la 2°, 3°, 4° y 5° armónica.

---

<sup>\*</sup> La marca B14 corresponde a la bibliografía contenida dentro de la Norma IEEE.



**Figura 1-1 Frecuencia Fundamental (60 Hz.) de una onda senoidal y las Armónicas.**

## 1.2 CAUSAS

El incremento de cargas no lineales conectadas a las líneas de distribución, han incrementado la contaminación eléctrica en dichas líneas. Lo que provoca que las forma de onda del voltaje y de corriente pierdan su forma senoidal.

Las corrientes armónicas son el resultado de cargas que requieren otras corrientes que una senoidal. [IEEE 141-1993]. Los mas comunes de estos son los convertidores estáticos de potencia, aunque existen otras cargas (no lineales), que son la causa principal de orígenes de distorsión armónica.

A continuación se hace mención de las principales causas, así como los equipos que ocasionan armónicas en las redes de distribución:

- Hornos de arco y otros artefactos de descarga por arco, una lámpara fluorescente.
- Soldadoras de resistencia (impedancia de las articulaciones entre metales dispares son diferentes para el flujo de las corrientes positiva vs. negativa).
- Equipos magnéticos, como un transformador y máquinas rotatorias que requieren corrientes de 3° armónica para excitar el hierro.
- Máquinas síncronas (producen ondas sinusoidales, 5° y 7° armónica).
- Drives de velocidad ajustable usados en ventiladores, bombas y procesos.
- Switchs de estado sólido, que modulan la corriente para el control del calentamiento, iluminación intensa, etc.
- Interruptores para el suministro de potencia usados en instrumentación, PC's, televisiones, etc.
- Altos voltajes de CD de estaciones de transmisión (rectificadores de AC a DC e inversores de DC a AC).
- Inversores fotovoltaicos, convertidores de DC a AC.

A continuación se presenta una descripción algunas situaciones y de equipos que ocasionan la generación de armónicas.

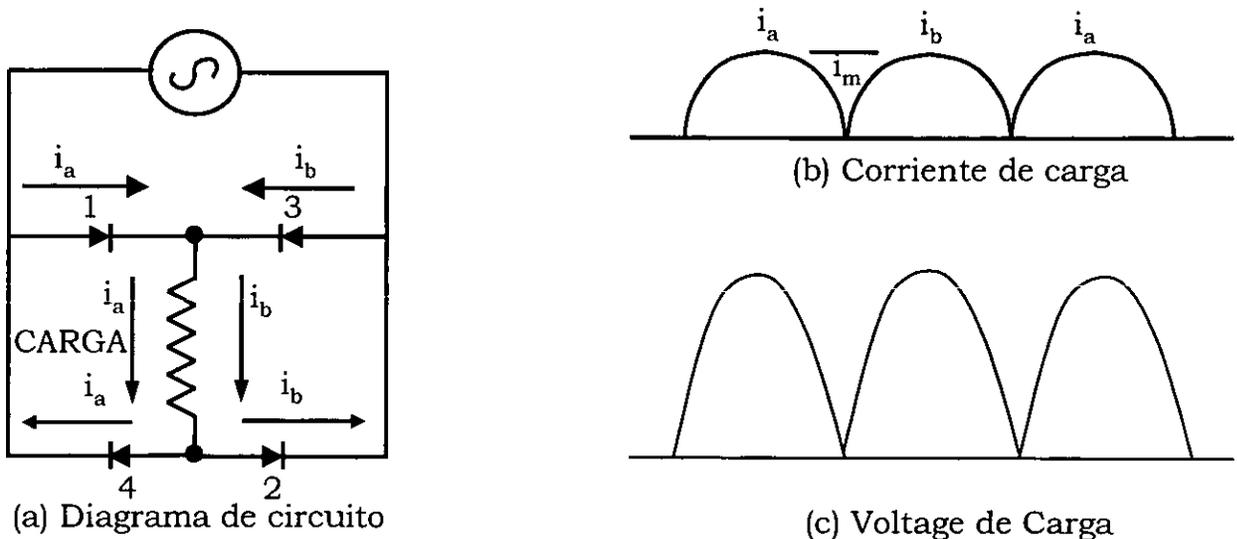
### **1.2.1 Convertidores Estáticos de Potencia**

No se pretende realizar un análisis a fondo de convertidores estáticos de potencia, sin embargo, se analizarán dos circuitos básicos: un puente monofásico y un trifásico (de onda completa). Estos dos circuitos son la base para toda la aplicación hoy en día de los convertidores estáticos de potencia. Los circuitos monofásicos son usados en equipos electrónicos, como las computadoras (PC's), televisiones, etc. Los circuitos trifásicos son usados en aplicaciones de potencia como son drives ajustadores de velocidad, variadores de frecuencia, etc.

Estos dispositivos pueden utilizar diodos o tiristores. Todo esto será analizado como las cargas en los convertidores y los efectos de los diferentes tipos de cargas en los sistemas de potencia. Las cargas pueden ser capacitivas, inductivas o resistivas. Las tres son múltiplos de la 3° armónica, incluyendo a la resistencia.

### 1.2.2 Rectificadores Monofásicos.

La importancia de los rectificadores monofásicos no puede ser pasados por alto. La Figura 1.2, muestra el circuito básico, las formas de onda para corrientes y voltajes con una carga resistiva.



**Figura 1.2 Rectificador de Onda Completa con una carga Resistiva, una fase.**

En la pasada década, una adaptación de este circuito ha sido usada casi en todos los equipos electrónicos a nivel residencial, comercial, industrial y militar. La carga resistiva ilustrada en la figura 1.2 (a) ahora ha sido reemplazada por un elemento capacitivo; cuando la carga ve que el rectificador es una energía almacenada o regulación del voltaje capacitivo, esto llega a ser un tipo interruptor de energía aplicada.

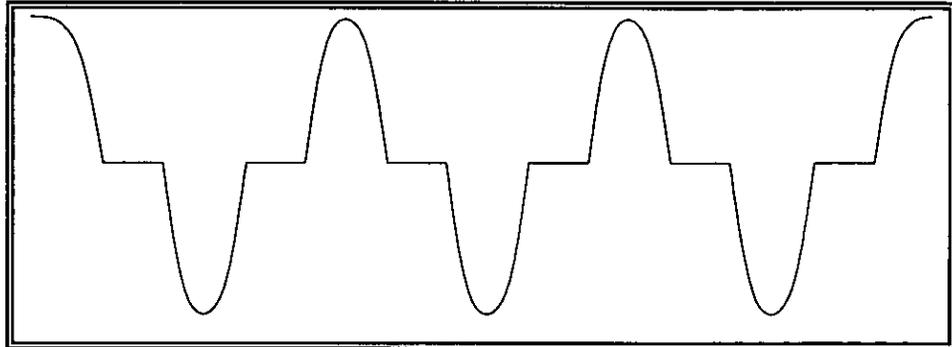
Esta adaptación tiene asegurado ser un efectivo intento de proveer energía para equipos electrónicos que usan chips de silicón y/o transistores.

La corriente de salida de este tipo de suministros de energía, es mostrada en la figura 1.3, notese que la corriente es discontinua; esto es, hay un periodo donde la corriente no fluye en el circuito de AC.

El capacitor solamente da corriente cuando se necesita, para ser cargado y proporcionar el voltaje de salida. Existe un voltaje de DC casi constante disponible para el suministro de energía aunque la corriente que fluye sea discontinua.

Las ventajas de este tipo de suministro de energía son gran iluminación, eficiencia y economía que este puede proporcionar voltaje pleno a la salida con un amplio rango de voltaje a la entrada.

La desventaja de este tipo de suministro de energía es que el sistema de AC muestra a una alta corriente del orden de la 3° armónica.



**Figura 1.3 Corriente de AC dada por un suministro interruptivo de energía.**

La tabla 1.1 lista las componentes de la corriente armónica para los típicos interruptores de suministro de energía.

Dependiendo de la carga del capacitor, puede tener sobre 80 % del contenido de la tercera armónica. Adicionalmente, pero con mucho menos grado, esto además contiene todas las corrientes armónicas impares.

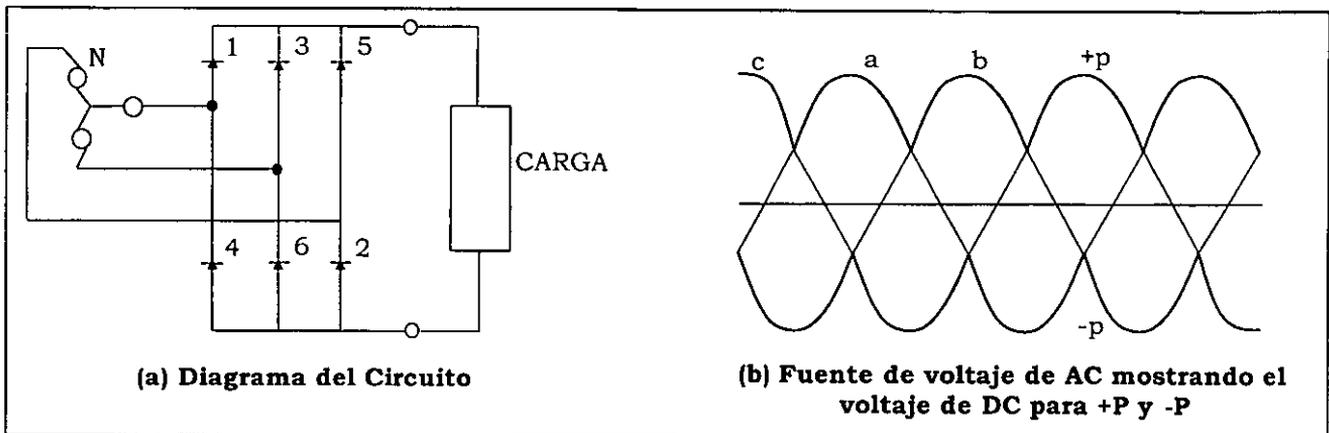
Armónica	Magnitud	Armónica	Magnitud
1	1.00	9	0.157
3	0.81	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.370	15	0.079

**Tabla 1.1 Espectro de un Suministro Interruptivo de Potencia.**

### **1.2.3 Rectificador Trifásico, de seis pulsos.**

El puente trifásico, es la base en todos los drives de velocidad ajustables y rectificadores de voltaje constante. Una porción de rectificadores están hechos con diodos o tiristores. Dependiendo de que el nivel de voltaje es para funcionar como un control de salida, el tipo de inversor utilizado para convertir de DC a frecuencia de AC, así de esta manera se determinará si es un diodo ó un tiristor es que sea utilizado en el rectificador.

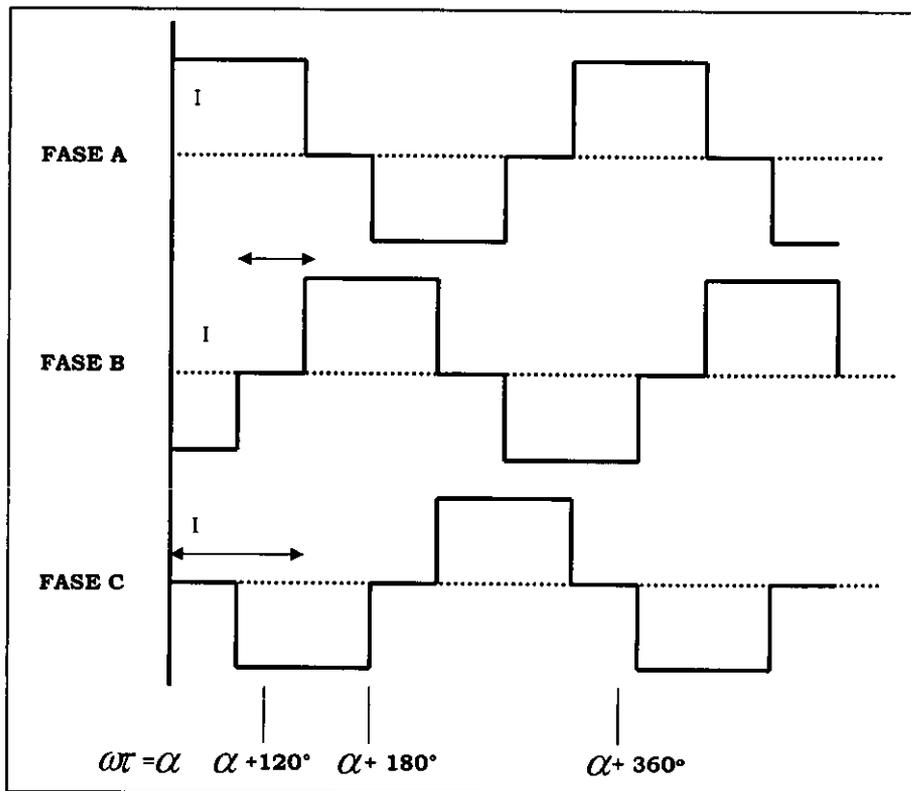
El voltaje en el bus varía entorno al reflejo del punto neutral del circuito de AC, como se muestra en la figura 1.4 (b). Estos voltajes de DC son una sexta armónica con respecto al neutro del circuito, y si el neutro está aterrizado, será entonces un voltaje de la 3<sup>o</sup> armónica con respecto a tierra. Este hecho es importante cuando hay una maquinaria, el cual el motor esta conectado a la salida del bus, o una maquinaria conectada de AC conectada al inversor que alimenta el bus de DC. Teniendo el voltaje de Rizo entre la máquina de AC o de DC que producen corrientes a través del comportamiento, tomando precauciones apropiadas. Esas precauciones incluyen aterrizar las flechas de la maquina de DC o aterrizar adecuadamente la máquina de AC de manera para eliminar estos 360 Hz de Rizo.



**Figura 1.4 Rectificador de seis pulsos, 3 Fases.**

Cuando la carga conectada al rectificador es inductiva, entonces ahí podrán fluir de manera constante las corrientes de DC del rectificador. Los elementos interruptivos del rectificador como las corrientes de DC entre las tres fases del circuito de AC de modo que por  $120^\circ$  las corrientes fluyen a través del elemento # 1 de la fase positiva *a*. Pasa los primeros  $60^\circ$  de este periodo, la corriente negativa esta fluyendo a través del elemento # 6 de la fase negativa *b* y para los últimos  $60^\circ$  a través del elemento # 2 negativo de la fase *c*.

Al final de los  $120^\circ$  la corriente positiva conmuta de la fase *a* a la fase *b* del elemento # 3 que trasladan las corrientes positivas a los siguientes  $120^\circ$ . Además la corriente negativa continua fluyendo en el elemento # 2 por  $60^\circ$  y entonces conmuta al elemento # 4 en la fase *a* negativa. Este proceso continua con la corriente de cada fase para  $120^\circ$  de conducción positiva seguida por  $60^\circ$  de no conducción y los  $120^\circ$  de conducción negativa como se muestra en la figura 1.5.



**Figura 1.5 Formas de onda de corrientes en el sistema de AC de una Carga Inductiva en un Puente Rectificador.**

### 1.3 EFECTOS

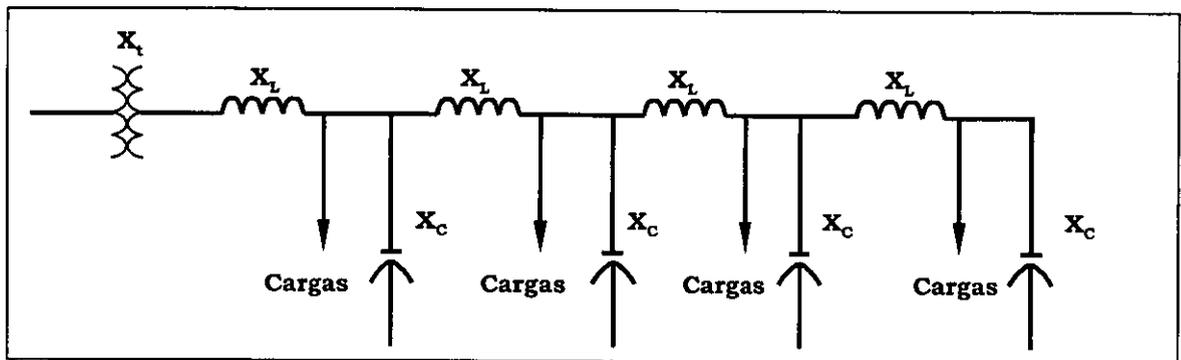
La intención de esta sección es de proveer un amplio panorama de los tipo de problemas que pueden desarrollarse cuando las armónicas se presentan, y las condiciones de operación, configuración de los sistemas que pueden colocar escenarios para problemas de armónicas. Los efectos de armónicas se dividen en:

- a) *Efectos en Sistemas de Potencia.*
- b) *Efectos en cargas.*
- c) *Efectos en comunicaciones.*

### 1.3.1 Efectos en Sistemas de Potencia.

El más significativo impacto que las armónicas tienen en sistemas de potencia es que ellas pueden causar pérdidas adicionales debido a calentamientos, distorsión de voltajes. Estos efectos ocurren principalmente como resultado de situaciones de resonancia paralela y/o serie. Cuando estas condiciones de resonancia se presentan, las corrientes armónicas que existen, pueden fluir en los sistemas de generación.

Los sistemas de distribución responden a características como la interacción entre los capacitores en derivación y las inductancias del sistema (como se muestra en la Figura 1.6). La emanación dada por la carga del sistema es importante. Además de los bancos de capacitores, la capacitancia de los cables aislados pueden influenciar sistemas de resonancia.



**Figura 1.6 Características típicas de los sistemas de distribución.**

Las más severas condiciones de resonancia ocurren cuando un solo banco de capacitores en los medios primarios de compensación en derivación del sistema (un gran banco de capacitores en una subestación, por ejemplo).

En este caso, hay un punto resonante en el sistema, y significa una distorsión de voltaje y una magnificación de corrientes armónicas pueden ocurrir si esta resonancia corresponde a una corriente armónica generada por cargas no lineales. Es bastante común para esta resonancia que ocurra la quinta armónica, como es el caso para la frecuencia, que responde a características ilustradas en la figura 1.9.

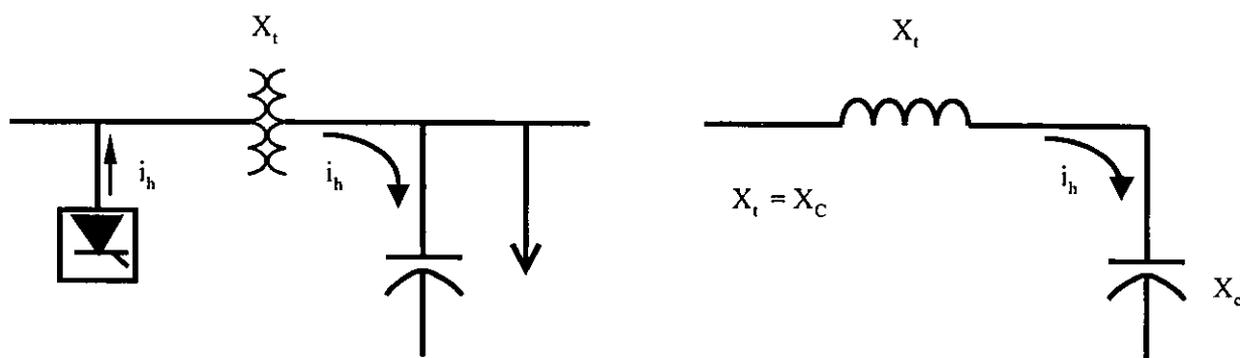
Cuando varios bancos muy pequeños de capacitores son aplicados a lo largo del sistema de distribución, habrá varias frecuencias resonantes. Si estos capacitores se cambian, la resonancia característica del sistema será más difícil determinarla. Cada una de las resonancias generalmente tendrá magnitudes que serán menores que las magnitudes que se asociarían con una resonancia mayor. Por lo tanto, los efectos de los capacitores alrededor del sistema de distribución puede reducir el potencial por problemas debidos a una resonancia mayor.

La colocación de capacitores introduce una resonancia paralela adicional que podría interactuar con las corrientes armónicas. La distorsión del voltaje armónico generalmente es la peor parte cuando los capacitores están en servicio cerca de las terminales de un alimentador, resultando una larga inductancia de la línea, que sintoniza a la resonancia en la frecuencia mas baja e incrementa la distancia de las corrientes armónicas que fluyen.

Como se mencionó anteriormente, la emanación dada por las cargas es muy importante en los sistemas de distribución. Este es frecuentemente el factor que previene las condiciones de resonancia que está causando significantes problemas de armónicas. La componente resistiva de la carga es el factor mas importante.

### Resonancia Serie

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y capacitiva están en serie y son iguales en cualquier frecuencia. Esta condición ocurre como resultado de la combinación en serie de un banco de capacitores y línea ó transformadores. La resonancia en serie presenta una baja impedancia en la trayectoria de las corrientes armónicas y tienden a fluir en, o "trampa", de cualquier corriente armónica. La resonancia serie puede resultar un alto voltaje de distorsión entre el inductor y el capacitor en el circuito serie. Un ejemplo de una posible resonancia armónica es una carga con un transformador al centro que tiene capacitores conectados en el bus secundario (Figura 1.7). Este circuito aparece como un circuito serie cuando se ve el lado primario del transformador.



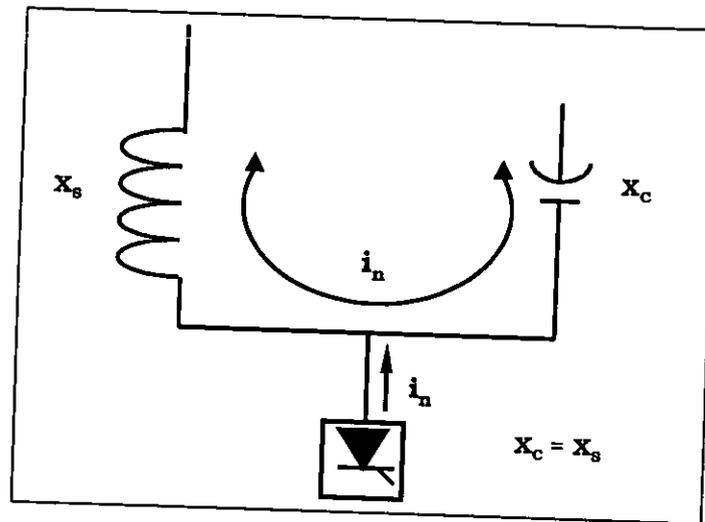
(a) Diagrama Unifilar

(b) Diagrama de Impedancia

**Figura 1.7 Banco de capacitores que produce la resonancia serie.**

## Resonancia Paralela.

La resonancia paralela (Figura 1.8) ocurre cuando en el sistema las reactancias inductivas y capacitivas son iguales en alguna frecuencia. Si la combinación del banco de capacitores y el sistema inductivo resulta una resonancia paralela cerca a una de las características armónicas generadas por una carga no lineal, que las corrientes armónicas exciten al circuito "tanque" causando una amplificación de corriente que oscila entre la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en el capacitor. Esta corriente oscilatoria puede causar una excesiva distorsión de voltaje.



**Figura 1.8 Condiciones de Resonancia Paralela.**

La frecuencia en que ocurre la resonancia paralela puede ser estimada por la siguiente ecuación:

$$H_{\text{Resonancia}} = \sqrt{\frac{\text{Corto circuito MVA}}{\text{Tamaño del Banco de Capacitores en MVA}}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$$

Donde: H es el orden de armónicas,  $X_c$  y  $X_L$  son las reactancias de la frecuencia fundamental.

Si la resonancia paralela existe, las magnitudes de la forma de onda del voltaje en el sistema se amplifican encima de los niveles nominales.

La frecuencia armónica resonante puede ser encontrada mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{f_R}{f_1} = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{S_{\text{sistema}}}{Q_c \text{ sen } \theta_{X/R}}} = \sqrt{\frac{S_{\text{sistema}}}{Q_c}}$$

Donde:

- $f_R$  Frecuencia de Resonancia Paralela (Hz);
- $f_1$  Frecuencia Nominal del Sistema ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ );
- C Capacitancia equivalente del sistema (faradios);
- L Inductancia equivalente del sistema (Henrys);
- $S_{\text{sistema}}$  Nivel del sistema (VA);
- $Q_c$  Capacitancia conectada al sistema (VAR);
- $\theta_{X/R}$  Ángulo cuya tangente es la proporción X/R del sistema.

Los capacitores instalados en los sistemas de potencia, son utilizados para la regulación del voltaje y la corrección del factor de potencia; la resonancia paralela puede ocurrir en cualquier sistema de distribución cuando existen capacitores instalados. La reactancia inductiva de los sistemas de distribución se incrementa con la frecuencia, mientras que la reactancia capacitiva de un banco de capacitores decrece. A una frecuencia específica, los sistemas de distribución estarán en resonancia, la condición será cuando la reactancia inductiva del sistema es igual a la reactancia del banco de capacitores, esencialmente cancelandose entre ambos.

Durante la resonancia paralela la impedancia para el flujo de la corriente es la pura resistencia del circuito, que es normalmente muy baja. Las corrientes y voltajes sufren tremenda amplificación durante la resonancia paralela cuando son comparados con una carga inductiva. La presencia de corrientes armónicas incrementa la posibilidad de ocasionar resonancia paralela en los sistemas de distribución que contienen capacitores.

Los problemas asociados con la resonancia paralela son típicamente de armónicas relacionados con el calentamiento, incluyendo sobrecalentamiento en circuitos interruptores (breakers), fusibles quemados y fallas en general de los equipos. El calentamiento producido por las armónicas en los bancos de capacitores, ocasiona un incremento de perdidas en el metal, aislamiento y conductores con un correspondiente incremento de temperatura. Si altas corrientes armónicas son permitidas, podrá causar una gran reducción de vida en los equipos y una posible falla de los equipos.

La ecuación siguiente es utilizada para determinar el orden de las armónicas y saber si el sistema puede estar en resonancia. Si esta ecuación revela un alto orden de frecuencia armónica resonante en el sistema, entonces un solo banco

de capacitores puede ser instalado para la corrección del factor de potencia o regulación de voltaje para el sistema de distribución.

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{Mvar_c}}$$

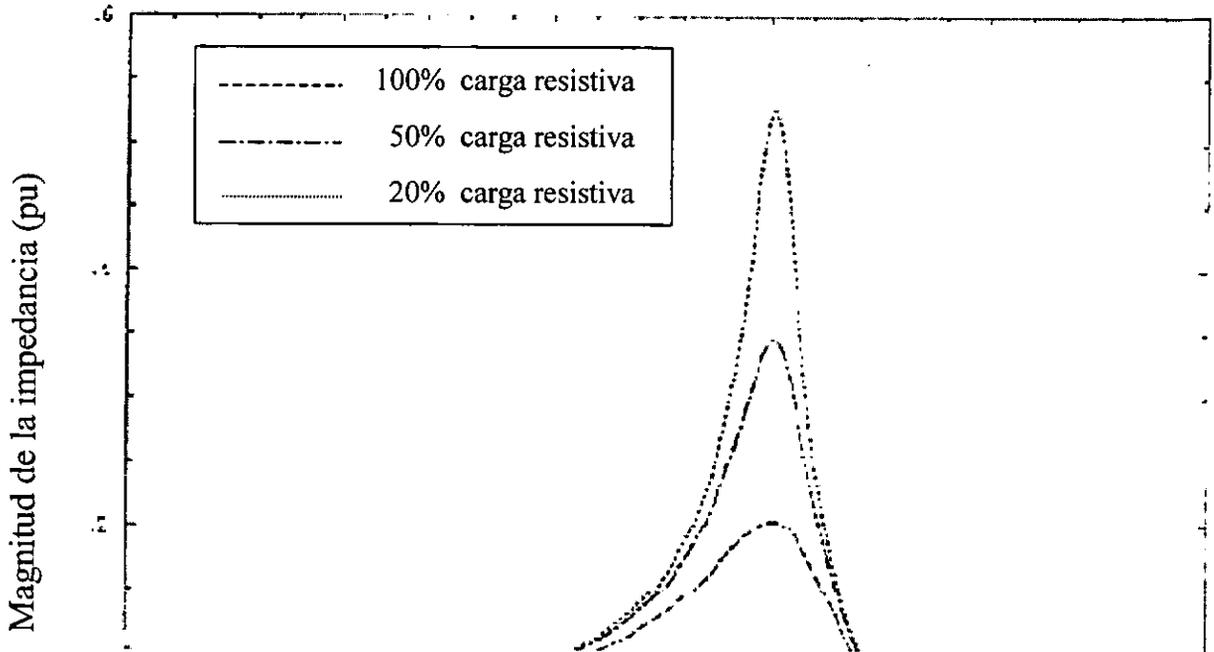
donde  $h_r$  es la resonancia armónica,  $MVA_{cc}$  son los MVA de corto circuito disponibles del transformador, incluyendo la contribución de algún motor, y los  $Mvar_c$  es la proporción de  $Mvar$  del banco de capacitores.

Si la ecuación anterior muestra un bajo nivel de resonancia armónica para el sistema de distribución, entonces hay que utilizar distintas opciones para minimizar los efectos de la resonancia armónica.

Los capacitores pueden ser ajustados para evitar la resonancia. Automáticamente los switches de los bancos de capacitores pueden ser especificados en pasos para que eviten las armónicas cerca de la frecuencia resonante. Además, los lugares estratégicos de los filtros de armónicas para atrapar a las armónicas cerca de la frecuencia de resonancia, puede proteger a los bancos de capacitores de los daños ocasionados por las corrientes armónicas. La colocación de los capacitores presenta dos remedios potenciales para los problemas de la frecuencia resonante. Los capacitores pueden ser distribuidos a lo largo de los sistemas de distribución ayudando a minimizar los problemas relacionados con las armónicas. La ecuación anterior se puede utilizar para hacer cálculos a cada rama que contenga capacitores.

### La componente resistiva.

La componente resistiva de la carga llega a ser muy importante en un sistema de resonancia. La trayectoria de la resistencia (que ofrecen las bajas impedancias) es tomada por las armónicas cuando existe una resonancia en paralelo. Por eso, grandes niveles de carga en el sistema resultan de una muy baja impedancia cerca de una resonancia paralela. La respuesta del sistema con una variación del nivel de carga es ilustrada en la figura 1.9 para un sistema con una resonancia paralela cerca a la cuarta armónica.



Numero de Armonicas

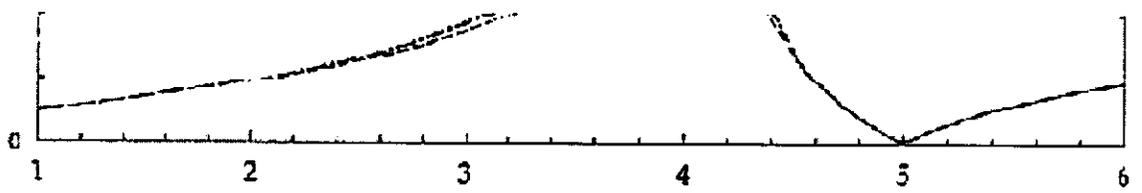
**Figura 1.9**

**Respuesta del sistema que ilustra el efecto de la carga resistiva con la resonancia paralela.**

### **1.3.2 Efectos en Cargas.**

Las corrientes armónicas fluyen por el sistema eléctrico de impedancias producidas por un pequeño voltaje armónico que resulta en los voltajes armónicos vistos en otras cargas.

Si cualquiera de las otras cargas en los sistemas de potencia tiene una baja impedancia, para cualquier armónica en particular, esa carga puede proveer una trayectoria para esas corrientes armónicas. En general, las mayoría de las cargas tienen una alta impedancia que es el camino de las armónicas, asimismo pequeñas corrientes armónicas fluyen hacia las cargas.



## Generadores y Motores.

Las componentes armónicas de voltaje afectan la eficiencia de la máquina y además pueden afectar el torque desarrollado.

Las corrientes armónicas en un motor pueden dar lugar a la emisión del ruido audible mas alto comparado con la excitación senoidal. Las corrientes armónicas también producen una distribución de flujo resultante en vacio, que puede causar o mejorar fenómenos llamados "*cogging*" (la repulsión para arrancar suavemente) ó lentamente (alto deslizamiento) en motores de inducción.

Las corrientes armónicas impares, como la quinta y séptima, tienen el potencial de crear las oscilaciones mecánicas en una turbina-generador o en un sistema con un motor como carga. Las oscilaciones mecánicas resultan cuando el torque varía, causado por la interacción entre las corrientes armónicas y la frecuencia fundamental del campo magnético, excita a una frecuencia resonante mecánica. Por un instante, la 5° y la 7° armónica pueden combinarse para producir un estímulo torsional en el rotor del generador, en la frecuencia de la sexta armónica.

Si una resonancia mecánica existe cerrará la frecuencia de estímulo eléctrico, una alta fuerza mecánica crecerá en las partes del rotor. Adicionalmente, el flujo de las corrientes armónicas en el estator produce pérdidas que ocasionan que la temperatura aumente en el estator y en el rotor. La suma de los efectos e armónicas es un reducción de la eficiencia y vida de la máquina. El calentamiento reduce el desempeño del 90 – 95 % lo cual puede ser experimentado con ondas senoidales fundamentales aplicadas.

## Transformadores.

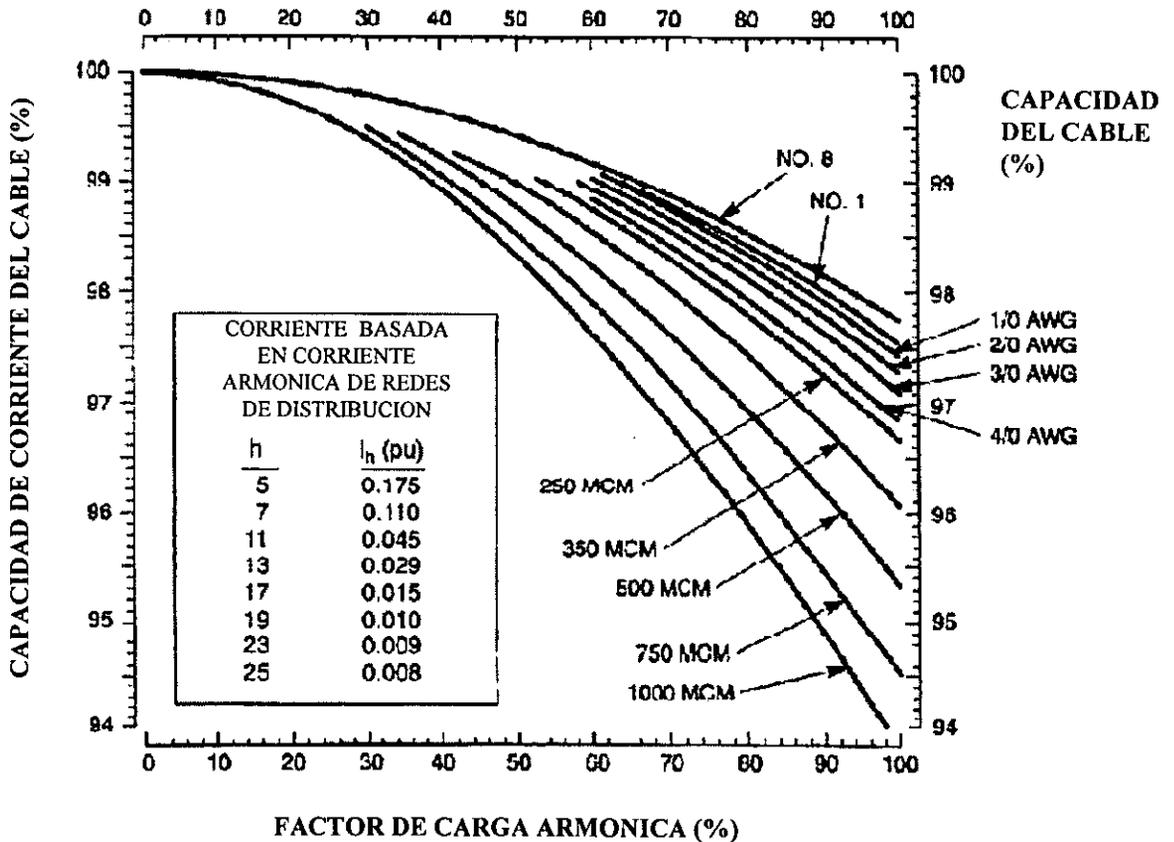
Con la excepción de esas armónicas aplicadas al transformador, pueden resultar incrementos de niveles audibles de ruido, el principal efecto de las armónicas en transformadores surgió del calentamiento parásito. Las corrientes armónicas causan pérdidas adicionales al cobre, y el voltaje armónico causa un incremento en las pérdidas del hierro.

El IEEE Std C57.12.00-1987 [B10], IEEE Std C57.12.01-1989 [B11] propuso un límite más alto para el factor de corriente distorsionada, será de 5% de proporción de corriente. Estos estándares también dan el máximo sobrevoltaje que el transformador puede ser capaz de soportar en estado estable: 5% en proporción a la carga y 10% sin carga. La corriente armónica para el voltaje aplicado puede ser que no resulte en el total del voltaje rms excediendose de esas proporciones.

Desde entonces varias cargas hoy se exceden de corrientes armónicas en el límite de 0.05 *por unidad* especificada por las “*Condiciones Usuales de Servicio*” de transformadores secos o líquidos como lo especifica el IEEE Std C57.12.00-1987 [B10] y en IEEE Std C57.12.01-1989 [B11], el IEEE desarrolló al estándar IEEE Std C57.110-1986 [B12]. En este se recomienda practicar métodos estables para evaluar los efectos de las grandes pérdidas por corrientes de Eddy. Una ecuación desarrollada en la IEEE Std C57.110-1986 produce un valor referido al factor *K* y cómo ayuda en parte al transformador a trasladar las corrientes armónicas.

### Cables de Fuerza

Los cables envuelven un sistema de resonancia, como se describe en el tema de resonancia paralela, pueden ser sujetos a tensiones que pueden conducir a que falle el aislamiento dieléctrico. Los cables que son sujetos a niveles ordinarios de corriente armónica son propensos al calentamiento parásito. La figura 1.10 muestra las capacidades típicas y curvas de cables por tamaños para armónicas en sistemas de distribución.



**Figura 1.10 Los cables vs. Armónicas**

El flujo de la corriente no senoidal puede causar sobrecalentamiento y sobretodo el esperado valor rms de la forma de onda. Estos son dos fenómenos conocidos como "*Efecto Piel*" y "*Efecto de Proximidad*", ambos varían de acuerdo a la frecuencia así como el tamaño del conductor y el espacio. Como resultado de estos dos efectos, la resistencia efectiva de corriente alterna es realizada encima de la resistencia de corriente directa ( $R_{CD}$ ). Cuando la onda de corriente es rica en altas frecuencias, las armónicas están fluyendo dentro del cable, y la resistencia ( $R_{CD}$ ) equivalente para el cable es más alta incrementando  $I^2 R_{CD}$  creciente.

## Capacitores.

Una gran preocupación que se deriva del uso de los capacitores en un sistema de potencia es la posibilidad de la resonancia en el sistema. Este efecto impone voltajes y corrientes que son considerablemente más altos que lo supuesto para el caso de la no resonancia.

La reactancia de un banco de capacitores disminuye con la frecuencia y así el banco actúa como un camino fácil para las corrientes armónicas más altas.

Este efecto incrementa las tensiones dieléctricas y el calentamiento dentro del capacitor. El calentamiento no es un problema, porque de la pérdida del capacitor baja con el uso de capas de lámina. Las tensiones dieléctricas están afectadas porque los voltajes armónicos en el capacitor son un aditivo para los voltajes picos. Estas causas hacen que se disminuya la vida útil del capacitor.

## Equipos electrónicos.

Los equipos electrónicos son susceptibles a una mala operación causadas por distorsión armónica. Estos equipos frecuentemente dependen de la precisión y determinación del cruce del voltaje por cero, u otros aspectos de formas de onda en voltajes.

La distorsión armónica puede resultar en un cambio de voltaje a cero o en el punto en que un voltaje de fase a fase llega a ser muy grande que otro voltaje de fase a fase. Estos son puntos críticos para muchos circuitos electrónicos y la mala operación puede ocasionar estos cambios.

Los equipos de medición pueden ser afectados similarmente, dando lecturas erróneas, de otra manera, teniendo un funcionamiento impredecible. Quizás los más serios de estas mal funciones son los instrumentos médicos.

## Medición.

La medición e instrumentación son afectados también por componentes armónicas, particularmente si las condiciones de resonancia existen como resultado en altos voltajes y corrientes armónicas. Los aparatos de discos de inducción, como los wattorímetros, normalmente ven la corriente fundamental que está en fase con el voltaje fundamental.

Desde entonces más voltajes armónicos están fuera de fase con las corrientes armónicas y por tanto la potencia es pequeña. Los transformadores de instrumentación de 60 Hz., son usados para relevadores y medición, estos no son afectados por niveles de armónicas normalmente encontrados (< 5KHz).

## Conmutadores y relevadores.

Como en otros tipos de equipos, las corrientes armónicas incrementan el calor y las pérdidas en sistemas de conmutación, reduciendo el estado de vida de algunos componentes aislantes.

Los fusibles que son sensibles al verdadero rms, que se dan cuenta que los dispositivos requieren una inspección debido al calor generado por las armónicas durante el funcionamiento "normal".

El Comité de Sistemas Eléctricos de Conmutación, de la Sociedad de Ingenieros Electricistas, han preparado un reporte titulado "*Distorsión de Ondas Senoidales en Sistemas de Potencia y el Impacto en Relevadores de Protección*".

En general, los niveles requeridos para causar esa mala operación de relevadores son mas grandes que los niveles recomendados por los estándares. El factor de distorsión es del 10-20%, son los requeridos para causar problemas de operación de relevadores.

La primera y segunda generación de dispositivos de disparo de estado sólido en circuitos interruptores de bajo voltaje responden a las corrientes pico. Cerca de 1978 estos aparatos han sido diseñados para responder a los valores de corrientes en rms. Lo modelos recientes pueden causar "*fastidiosos*" y continuos disparos en el circuito que llevan corrientes armónicas.

## Convertidores Estáticos de Potencia.

Los convertidores que utilizan diodos, usualmente no son afectados por armónicas, sin embargo, los convertidores que utilizan tiristores, pueden ser afectados cuando bastante distorsión armónica se presenta debido a interferencia con el circuito encendido que controla la salida del convertidor.

### 1.3.3 Efectos en Comunicaciones

#### Conmutación.

La conmutación puede producir armónicas que son cerca de la 43ª armónica donde están los valores picos TIF. Una buena práctica es aislar el circuito de comunicaciones de los circuitos de potencia.

#### Interferencia Telefónica.

Las corrientes y voltajes armónicos asociados con cargas no lineales pueden inducir corrientes y voltajes en circuitos de comunicaciones y paralelamente con circuitos de potencia. Las corrientes armónicas inducen corrientes en los dos conductores del circuito de comunicación, y por tanto estas producen voltajes. Si estos voltajes no son iguales (las corrientes en los dos conductores no son iguales por el espacio u otras diferencias), no podrán cancelarse y el resultado la presencia de ruido en el circuito telefónico.

Dos ecuaciones son utilizadas generalmente en Norte América:

#### *Voltaje del Factor de Influencia Telefónica.*

El voltaje del factor de interferencia telefónica  $V_{TIF}$  es:

$$V_{TIF} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^H (T_h Z_h I_h)^2}}{V_1}$$

Donde:

- $V_1$  = Voltaje fundamental de línea a neutro (rms).
- $I_h$  = Corriente armónica dentro del sistema de potencia.
- $Z_h$  = Impedancia del sistema en el orden armónico  $h$ .
- $T_h$  = Factor de interferencia telefónica (TIF) (curvas de 1960 actualmente en uso).
- $H$  = Límite superior de armónicas, 5000 Hz.

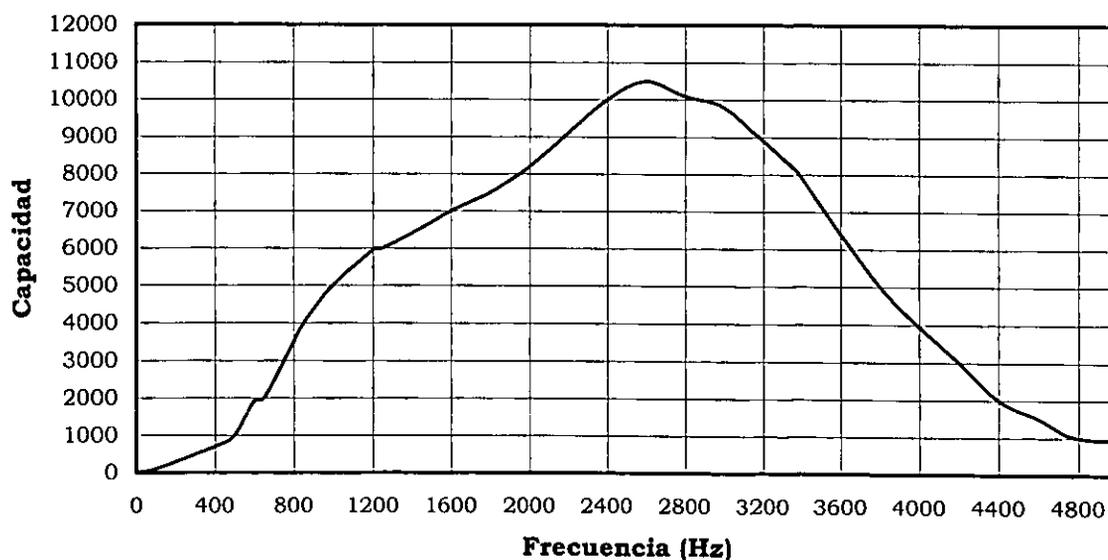
La interferencia puede ser cuantificada por el factor de influencia telefónica (TIF). La tabla 1.2 lista los valores (TIF) basados sobre los valores de 1960.

Frec.	TIF	Frec.	TIF	Frec.	TIF	Frec.	TIF
60	0.5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3300	8090
360	400	1260	6050	2160	9080	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6650	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10600	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10210	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9820	5000	840
1000	5000						

**Tabla 1.2 Valores TIF de 1960 para una sola frecuencia**

La evaluación del problema puede ser establecido en términos de corriente o voltajes. El término de corrientes es I T producto. Es calculado tomando la suma de la raíz cuadrada, valores de la suma de los cuadrados del producto I T. I es la corriente armónica individual, y T es el TIF valor de la frecuencia; los productos I T son menores que 10,000. El valor del voltaje equivalente es el producto de KV T. Esto se calcula en una manera similar. La figura 1.11 es una curva de valores de TIF.

$$I T \text{ PRODUCTO} = \sqrt{\sum_{A=1}^{A=50} [I_a \cdot (TIF)_a]^2}$$



**Figura 1.11 Valores de 1960 para TIF**

Observe que la punta de la curva alcanza hasta 2600 (43° armónica). Esto dice que las armónicas mas bajas asociadas en los convertidores estáticos de potencia, usualmente no son un problema en la interferencia telefónica. La curva esta basada en los valores de 1000 Hz., teniendo un TIF de 5000.

## **1.4 SOLUCIONES**

Existen tres técnicas para reducir o controlar el flujo de las corrientes armónicas de cargas no lineales en sistemas de distribución. Estas son las siguientes:

- a) Usando filtros en derivación.
- b) Usando convertidores estáticos de potencia de multipulsos (también conocido como multiplicación de pulsos) o transformadores cambiadores de fase.
- c) Inyección de corrientes armónicas.

### **1.4.1 Filtros en Derivación.**

Los filtros en derivación, son los métodos mas comunes par controlar el flujo de corrientes armónicas. Estos son diseñados con una serie de combinaciones de reactores (inductancias) y capacitores (capacitancias).

En la figura 1.12 vemos el diagrama de un filtro de armónicas, compuesto por reactores y capacitores para su diseño.

La combinación de los filtros de armónicas y los capacitores, proveen en un solo paquete la solución para mitigar el problema de la frecuencia resonante en los sistemas de distribución.

Los filtros en derivación también son conocidos como “trampas”, porque estos absorben las corrientes armónicas.

La figura 1.13 presenta un reactor de choque, así como su sensor de temperatura.

El diseño más común de un filtro en derivación, es el de un filtro sintonizado.

La figura 1.14, nos muestra las diferentes vistas de un filtro de armónicas sintonizado.

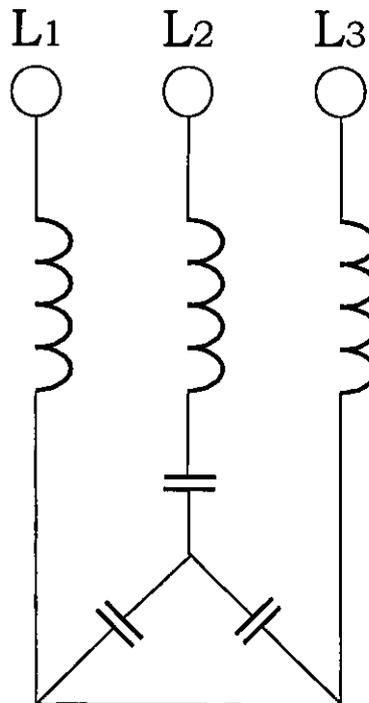
La figura 1.15, nos ilustra las formas de onda antes y después del filtrado.

La frecuencia resonante está dada por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_1 = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

Donde:

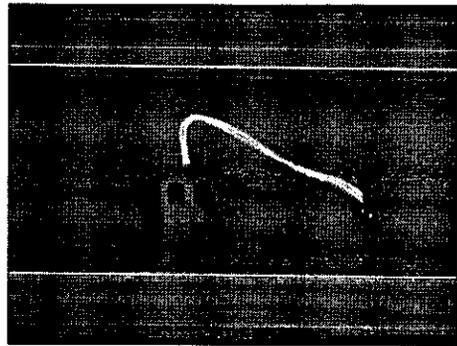
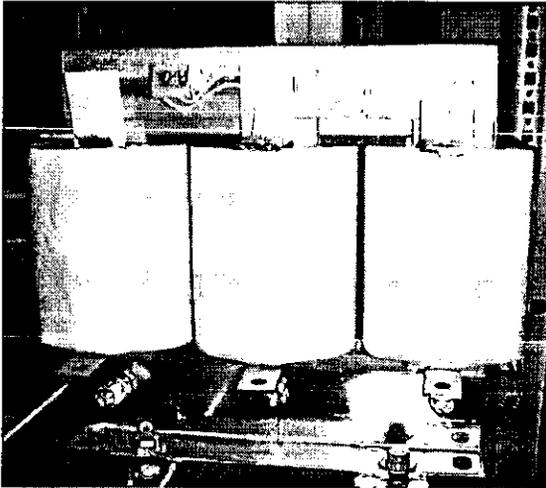
- $f_0$  = Es la frecuencia resonante.
- $L$  = La inductancia del filtro.
- $C$  = La capacitancia del filtro.
- $X_C$  = La reactancia capacitiva del filtro.
- $X_L$  = La reactancia inductiva del filtro.
- $f_1$  = Es la frecuencia fundamental.



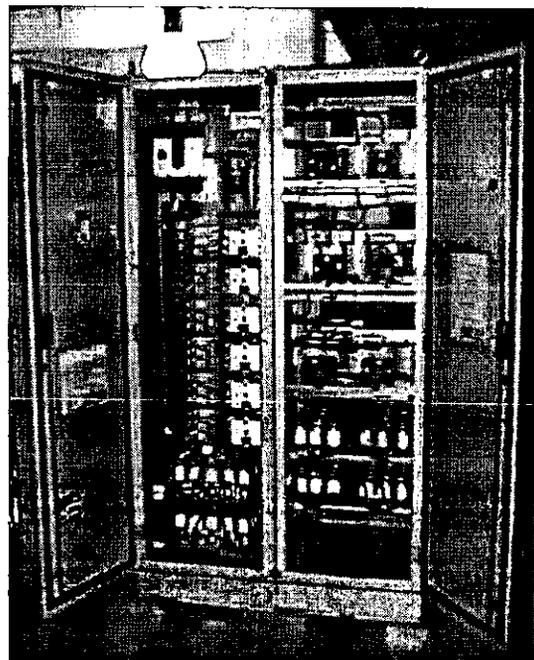
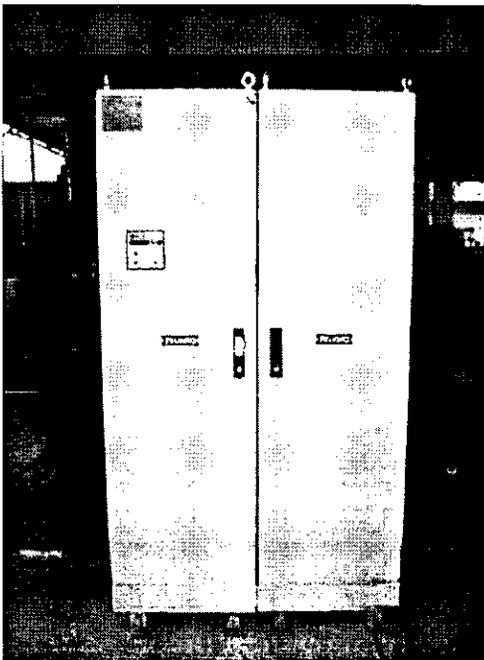
**Figura 1.12 Diagrama del Filtro de armónicas**

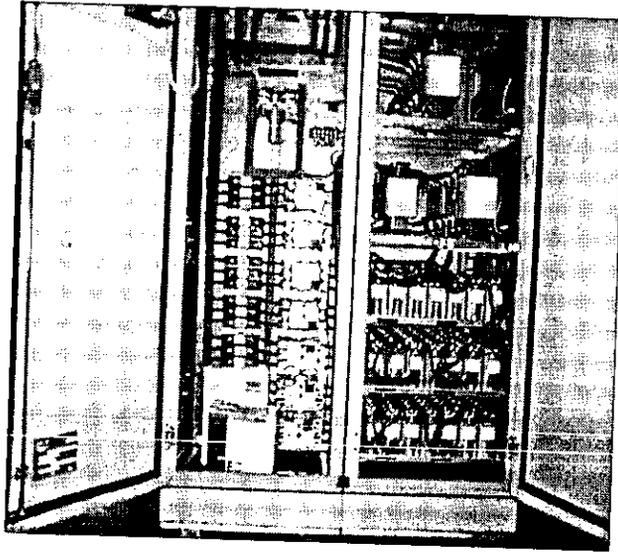
Los pasos para diseñar un filtro son los siguientes:

- a) Escoger el valor de la capacitancia para mejorar el factor de potencia y evitar ser penalizados. Este es alrededor de 0.95.
- b) Seleccionar un reactor en serie con el capacitor para el nivel armónico. Esto usualmente es para la 5° armónica en el sistema donde el origen de la corriente armónica es del convertidor estático de potencia. En aplicaciones de hornos de arco, son usados filtros multisintonizados.
- c) Calcular el voltaje pico a través del capacitor y el total de corriente rms en el reactor.
- d) Escoger componentes estándares para conocer la obligación que tienen.

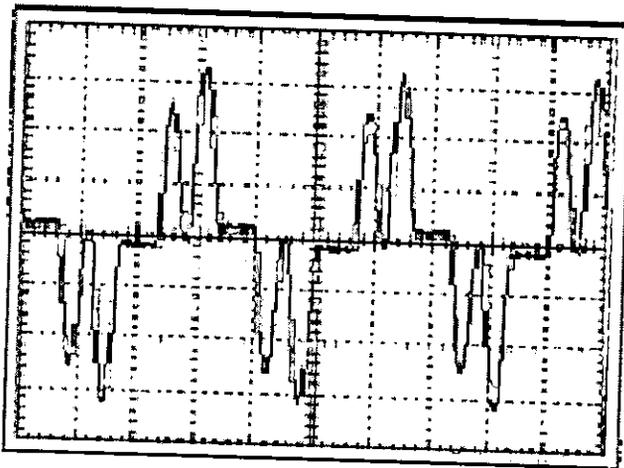


**Figura 1.13 Reactores Hans Von Mangoldt\***

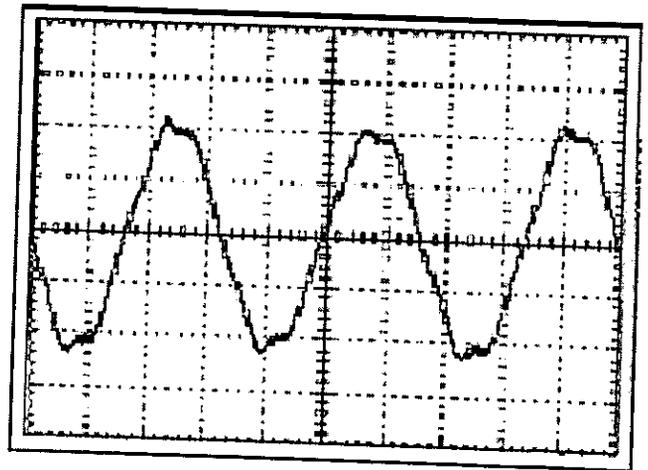




**Figura 1.14 Vistas de un filtro de armónicas\***



Forma de onda sin Filtro



Forma de onda con Filtro

**Figura 1.15 Gráfica de la forma de onda Distorsionada y Filtrada**

\* Fotografías proporcionadas por la empresa INELAP.

### 1.4.2 Convertidores Multipulsos.

Las armónicas pueden ser reducidas mediante la multiplicación de fases. Si  $m$  secciones de un rectificador de 6 pulsos:

- Tienen algunos transformadores proporcionales.
- Tienen transformadores con idénticas impedancias.
- Las fases son cambiadas exactamente  $60^\circ$  una de otra.
- Son controlados exactamente los ángulos retrasados.
- Distribuye las corrientes de carga equitativamente.

Entonces las únicas armónicas presentes pueden ser del siguiente orden:

$$a = kq \pm 1$$

Donde:

- $a$  = Orden de armónicas.
- $q$  = Es ahora  $6m$ .
- $m$  = Es el número de rectificadores de 6 pulsos.
- $k$  = E un número entero (1, 2, 3, ...)

No son idénticas las dos secciones del rectificador en esos aspectos, por lo tanto en la práctica, las características armónicas siempre serán presentadas por el grado que los requerimientos no son conocidos.

Por ejemplo, 2 secciones de rectificadores defasados  $30^\circ$  resulta pues un rectificador de 12 pulsos con las armónicas mas bajas, siendo la  $11^\circ$ , cuando 3 secciones del rectificador están defasados  $20^\circ$  resultan 18 pulsos rectificadas con la armónica más baja siendo la  $17^\circ$ , etc. Esta técnica ha sido usada para eliminar los problemas de armónicas en industrias electroquímicas y electrometalúrgicas por varias décadas.

### 1.4.3 Cancelación de Armónicas por Inyección.

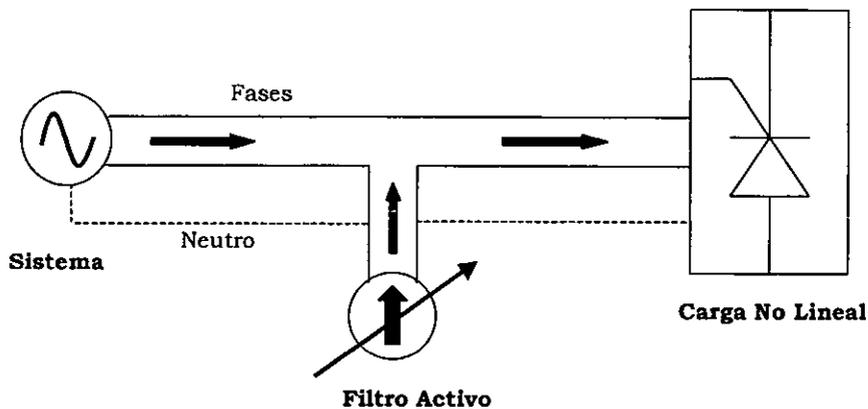
Las corrientes armónicas pueden ser reducidas por inyección de corrientes equivalentes que son defasadas  $180^\circ$ . Esta técnica se llama filtración activa.

El principio de los filtros activos consiste en eliminar corrientes armónicas en un punto específico de un sistema de distribución, al inyectar como una fuente controlada, armónicos de igual magnitud pero defasadas  $180^\circ$  con respecto a las requeridas por la carga (ver Figura 1.16). De acuerdo a sus características de operación, fabricación y en la forma de cómo se conectan al sistema de distribución, los filtros activos se pueden clasificar en:

- Filtros Activos en conexión paralela (shunt)
- Filtros Activos en conexión serie.
- Filtros Activos mixtos o híbridos (filtro activo + filtro pasivo).

Sus principales ventajas son:

- ✓ Pueden compensar corrientes armónicas y factor de potencia en forma simultánea.
- ✓ Un solo filtro activo puede compensar un amplio rango de frecuencias.
- ✓ Tiene rápida respuesta y flexibilidad en el esquema de control.
- ✓ Tienen un tamaño compacto. [ Mino A. Gerardo, 1999 ]



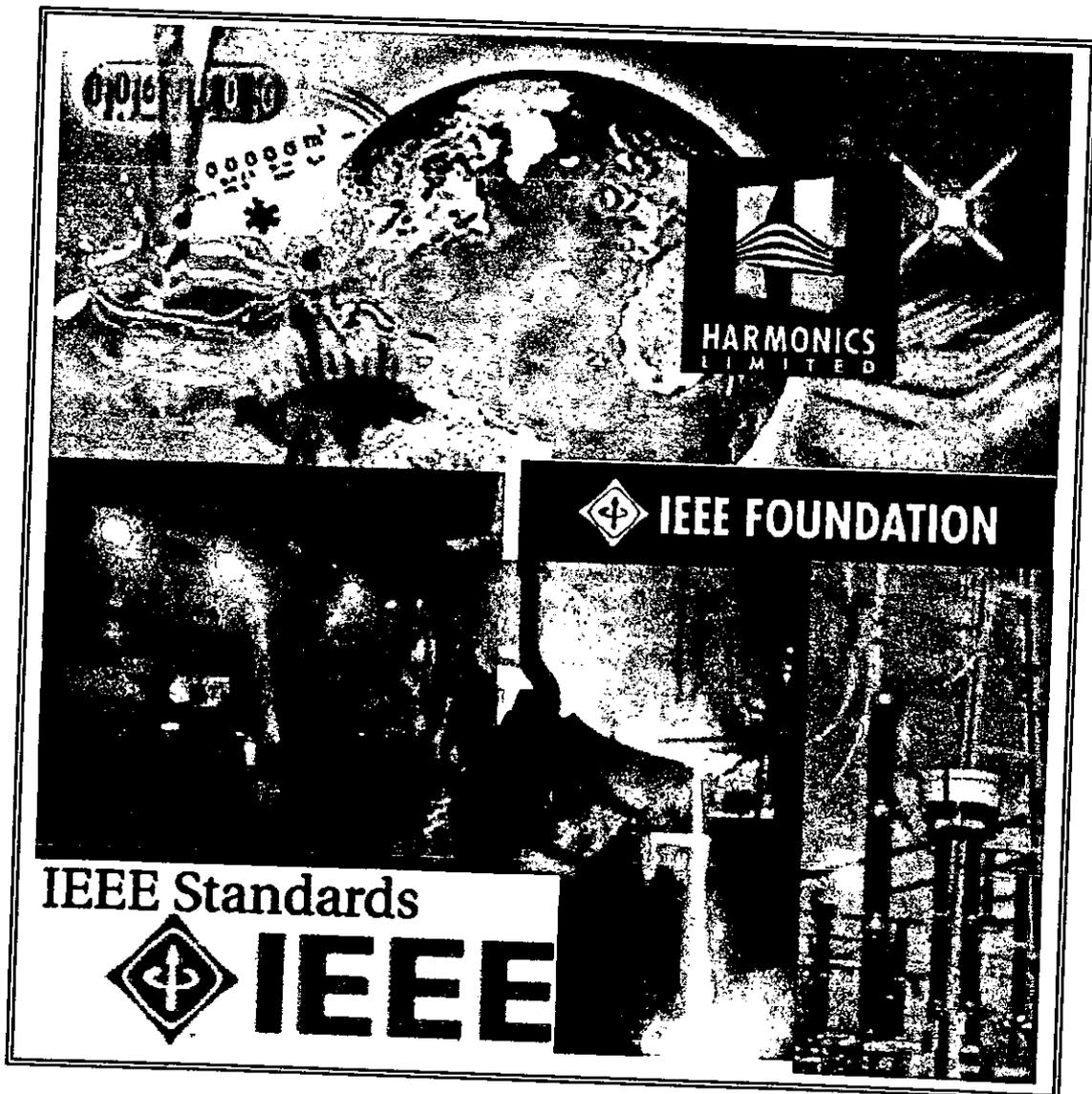
**Figura 1.16 Esquema General de un Filtro Activo**

## CAPITULO 2

---

# REVISION DE LA NORMALIZACION SOBRE NIVELES DE DISTORSION ARMÓNICA RECOMENDADOS PARA REDES DE DISTRIBUCION

---



## **2.1 FILOSOFIA DE LA NORMA IEEE-519**

Uno de los principales estándares industriales usados para armónicas en sistemas de potencia es el IEEE Std 519-1992 [B15]\*.

Este estándar ha sido desarrollado a través de IEEE Sociedad de Aplicaciones Industriales y el IEEE Sociedad de Ingenieros de Potencia a través del esfuerzo de estas dos sociedades.

El estándar [IEEE Std 519-1992] sugiere límites en las corrientes armónicas que los usuarios pueden inducir o provocar dentro de las empresas de energía eléctrica y también especifica la calidad del voltaje que la empresa suministradora debe proveer al usuario.

La filosofía de la norma IEEE-519 se resume de la siguiente manera:

1. Los usuarios deberán responsabilizarse por limitar la cantidad de las corrientes armónicas sobre el sistema de potencia en general.

### ***Usuarios: Limitar la Corriente Armónica***

2. La compañía suministradora deberá responsabilizarse por evitar condiciones de resonancia en el sistema de potencia que puedan crear niveles de distorsión de voltajes inaceptables. Básicamente, la compañía debe suministrar un voltaje de buena calidad.

### ***Compañía: Limitar la Distorsión del Voltaje***

---

\* Referencia tomada por la Norma IEEE 519-1992

## **2.2 El desarrollo de los límites de Distorsión Armónica.**

La filosofía para el desarrollo de los límites de armónicas en estas recomendaciones prácticas son para:

1. Limitar la inyección de armónicas de los clientes individuales, para que ellos no causen niveles de distorsión de voltaje inaceptables para las características normales del sistema.
2. Limitar la distorsión armónica total de voltaje del sistema, suministrado por la compañía eléctrica.

Los índices armónicos son caracterizados por lo siguiente:

1. Los valores dados para los índices armónicos pueden ser físicamente significantes y fuertemente correlacionados a la severidad de los efectos de las armónicas.
2. Debe ser posible determinar si se reúnen o no los límites del índice armónico.
3. Los índices armónicos deben ser simples y prácticos para que puedan ser utilizados ampliamente con facilidad.

Los índices armónicos recomendados son:

1. Distorsión de voltaje, Individual y Total
2. Distorsión de corriente, Individual y Total

El consumidor debe confirmar:

1. Que los capacitores o los filtros de armónicas para la corrección del factor de potencia, no están siendo sobreforzados o sobrecargados.
2. Que la resonancia paralela o serie no esté ocurriendo.
3. Que el nivel de armónica en el PCC y puntos de utilización no sea excesivo.

Esta norma asume que el sistema puede ser caracterizado por una impedancia de corto circuito. El efecto de los capacitores es despreciable. Esta es una opinión dada para altas frecuencias, en que los capacitores pueden proveer bajas impedancias siendo el camino para flujo de la corriente armónica. A bajas frecuencias, las condiciones de resonancia pueden causar en el sistema impedancias que son mayores que las impedancias de cortocircuito. Los efectos de las cargas son también despreciables. El efecto mas importante de las cargas es que proveer un amortiguamiento para las frecuencias resonantes.

La distorsión del voltaje de armónico en el sistema estará en función de la corriente armónica total inyectada y de la impedancia del sistema para cada frecuencia de armónica.

El total de corriente armónica inyectada dependerá del número clientes inyectando corrientes armónicas y del tamaño de cada cliente.

Los clientes más grandes tendrán límites más estrictos porque ellos representan una gran porción del total de la carga en el sistema. En la tabla 2.3, el tamaño del cliente es expresado en proporción de la capacidad de corriente de corto circuito, en el punto común de acoplamiento de los clientes con la empresa eléctrica.

Las corrientes armónicas individuales están expresadas en por ciento de la máxima corriente de carga (demanda).

Los objetivos de limitar la corriente son para restringir la máxima frecuencia de voltaje armónico a 3% de la fundamental y la THD del voltaje al 5% para sistemas sin una gran resonancia paralela a una introducción de frecuencias armónicas.

Los límites desarrollados para la corriente distorsionada asumen que habrá un poco de diversidad entre las corrientes armónicas inyectadas por clientes diferentes. Esta diversidad puede ser en la forma de diferentes componentes armónicos inyectados, diferencias en los ángulos de fase de las corrientes armónicas individuales, o diferencias en la inyección de armónicas vs., los perfiles de tiempo.

En reconocimiento de esta diversidad, los límites de las corrientes son desarrollados para que la frecuencia individual máxima del voltaje armónico causado por un solo cliente no exceda los límites de la Tabla 2.1 para sistemas que pueden ser caracterizados por impedancias de corto circuito.

<b>SCR a PCC</b>	<b>Máxima Frecuencia Individual de Voltaje Armónico (%)</b>	<b>Propuesta Relacionada*</b>
10	2.5-3.	Aplicaciones Especiales <sup>1</sup>
20	2.0-2.5	1 ó 2 clientes grandes
50	1.0-1.5	Algunos clientes relativamente grandes
100	0.5-1.0	5 a 20 clientes de mediano tamaño
1000	0.05-0.10	Muchos clientes pequeños

**Tabla 2.1 Bases para Limitar la Corriente Armónica**

Si los clientes individuales cumplen con los límites de distorsión de corriente, y no hay diversidad suficiente entre las inyecciones armónicas del cliente individual, entonces puede ser necesario llevar a cabo alguna forma de filtrado en el sistema para limitar los niveles de distorsión de voltaje.

Sin embargo, es más probable que los problemas de distorsión de voltaje puedan ser causados por la respuesta en frecuencia del sistema que resulta una magnificación de la corriente armónica, en particular a la frecuencia armónica. Esta situación tiene que ser resuelta por la empresa suministradora de electricidad para cambiar de lugar el capacitor o el tamaño de este, para diseñar un filtro de armónicas.

### 2.2.1 Límites en la Conmutación de las Muecas.

La profundidad de la muesca, el factor de distorsión armónica total (THD), y el área de la muesca del voltaje línea a línea en el PCC serán limitados como se muestra en la Tabla 2.2.

	<b>Aplicaciones Especiales<sup>1</sup></b>	<b>Sistemas Generales</b>	<b>Sistemas Exclusivos<sup>2</sup></b>
<b>Profundidad de la muesca</b>	10%	20%	50%
<b>THD (Voltaje)</b>	3%	5%	10%
<b>Área de la Muesca (<math>A_N</math>)<sup>3</sup></b>	16 400	22 800	36 500

**Tabla 2.2 Clasificación de Sistemas de Bajo Voltaje y Límites de Distorsión**

Estos límites están recomendados para sistemas de bajo voltaje en donde el área de la muesca es fácil medirla con un osciloscopio. Se puede notar que el factor de distorsión de voltaje total está relacionado con el área total de la muesca,  $A_N$ , por la igualdad dada en la ecuación:

$$THD_{\max} = 0.074 \sqrt{\frac{A_n}{P}} \%$$

Donde:

$A_n$  = Área de la muesca.

$P$  = Relación de la Inductancia total con la inductancia común del sistema

<sup>1</sup> Las Aplicaciones Especiales incluyen a Hospitales y Aeropuertos.

<sup>2</sup> Los Sistemas Exclusivos están dedicados solamente a la carga del convertidor.

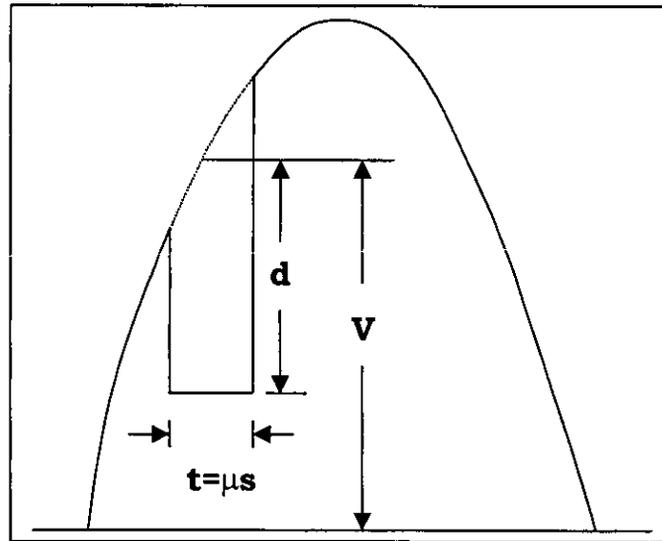
<sup>3</sup> En volt-microsegundos en proporción del voltaje y la corriente.

La figura 2.1 define la profundidad de la muesca y el área.

Donde:

$$\% \text{ Profundidad de la muesca} = \frac{d}{V} * 100$$

$$A_n = t \times d = \mu s \times V$$



**Figura 2.1 Definición de la Profundidad de la Muesca y el Área de la Muesca**

### 2.2.2 Límites de Distorsión de Corriente.

Idealmente, la distorsión armónica causada por un solo consumidor se limita a un nivel aceptable en algún punto en del sistema; y el sistema entero será operado sin distorsión armónica en cualquier parte del sistema.

Los límites de distorsión armónica recomendados aquí establecen la máxima distorsión de corriente permisible para el usuario.

Los límites de distorsión para la corriente recomendados están afectados con el siguiente índice:

- THD I: Distorsión de Demanda Total. Es la distorsión de corriente armónica en % de la máxima demanda de corriente de carga (15 o 30 min. de demanda)

- La THD I esta expresada por:

$$\text{THD I} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I^2}}{I_1}$$

Los límites listados en las tablas 2.3, 2.4 y 2.5 son utilizados como valores en el diseño del sistema para casos extremos de operación normal (condiciones que duran mucho más tiempo que una hora).

Para periodos cortos, durante arranques o condiciones inusuales, los límites pueden exceder por el 50%.

Estas tablas son aplicables a rectificadores de seis pulsos y a situaciones generales de distorsión.

La tabla 2.3 lista los límites de corrientes armónicas basadas en el tamaño de la carga con respecto a el tamaño del sistema de potencia para las cargas que están conectadas.

La proporción  $I_{sc} / I_L$  es la proporción de la corriente de cortocircuito disponible en el punto común de acoplamiento (PCC), para la corriente máxima fundamental.

Se recomienda que la corriente de carga  $I_L$  sea calculada como la corriente promedio de la máxima demanda para los 12 meses anteriores.

De esta manera, como el tamaño de los usuarios la carga decrece con respecto al tamaño del sistema, el porcentaje de corriente armónica que el usuario tiene permitido para inyectar dentro del sistema de la empresa eléctrica puede incrementar.

Esto protege a otros usuarios en el mismo alimentador así como a la empresa eléctrica, que se le exige suministrar una cierta calidad de voltaje a sus clientes.

Toda generación, que es conectada a los sistemas de distribución, subtransmisión o transmisión, es tratada como empresa de distribución por consiguiente se dieron estas recomendaciones prácticas.

<b>Máxima Distorsión de Corriente Armónica en % de <math>I_L</math></b>						
Orden de Armónicas Individuales (Armónicas Impares)						
$I_{sc} / I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD I
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

**Tabla 2.3 Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Generales de Distribución (120 V hasta 69 000 V)**

<b>Máxima Distorsión de Corriente Armónica en % de <math>I_L</math></b>						
Orden de Armónicas Individuales (Armónicas Impares)						
$I_{sc} / I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD I
< 20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

**Tabla 2.4 Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Generales de Subtransmisión (69 001 V hasta 161 000 V)**

<b>Máxima Distorsión de Corriente Armónica en % de <math>I_L</math></b>						
Orden de Armónicas Individuales (Armónicas Impares)						
$I_{sc} / I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD I
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

**Tabla 2.5 Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Generales de Transmisión (>161kV) Generación dispersada y Cogeneración**

\* Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión de corrientes, a pesar de la actual  $I_{sc}/I_L$ .

### 2.2.3 Límites de Distorsión de Voltaje.

Los límites de distorsión recomendados en esta sección establecen la máxima distorsión de voltaje en el punto común de acoplamiento (PCC) con cada consumidor.

Si los límites se exceden, los siguientes pasos deben ser tomados en cuenta:

1. Realizar las medidas de armónicas en puntos seleccionados dentro del circuito de la empresa, incluyendo el PCC, y se busca a los consumidores que operan convertidores con distorsión más allá de los límites. Si son identificados, deben pedirse a tales consumidores guardar la distorsión armónica dentro de los límites recomendados mediante la instalación de filtros, para reducir la generación de armónicas, o a través de otros medios.
2. Instalar filtros para el control de armónicas.
3. Instalar un nuevo alimentador. Esto es eficaz reforzando la fuente y aislando los problemas armónicos. Sin embargo, esto no es siempre factible económicamente.

Debe tomarse en cuenta que puede ser factible que se incrementen las cargas en tales circuitos ya contaminados, es por ello que los filtros se deben diseñar previniendo esas nuevas cargas.

Los límites de voltaje recomendados (ver Tabla 2.6) son relacionados con el siguiente índice:

➤ **THD V:** Distorsión Armónica Total de Voltaje en *por ciento* de la frecuencia nominal de voltaje.

➤ **El THD V** esta dado por:

$$\text{THD V} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V^2}}{V_1}$$

Los límites listados en la Tabla 2.6 son utilizados como valores para diseñar el sistema en "casos extremos" de operación normal (condiciones que duran mucho más tiempo que una hora). Para periodos cortos, durante el arranque o condiciones inusuales, los límites **pueden excederse el 50 %**.

<b>Bus de Voltaje en el PCC</b>	<b>Distorsión de Voltaje Individual (%)</b>	<b>Distorsión de Voltaje Total (%)</b>
69 kV y menores	3.0	5.0
69.001 kV hasta 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV y mayores	1.0	1.5

**Tabla 2.6 Límites de Distorsión de Voltaje.**

NOTA: *Los sistemas de alto voltaje pueden tener arriba del 2.0% de THD cuando la causa es un HDVC terminal eso se atenuará al mismo tiempo que afecta a los usuarios.*

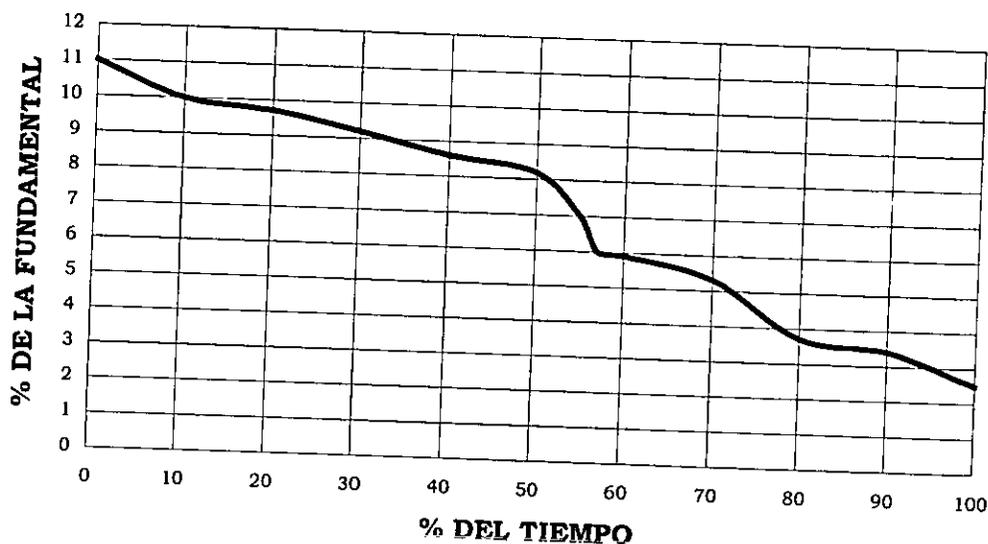
#### **2.2.4 La Aplicación de la Probabilística en Límites de Distorsión Armónica.**

Aunque los efectos de las armónicas en equipos eléctricos, instrumentos, etc., no se entienden totalmente en este momento, se reconoce que los límites de distorsión actuales declarados pueden excederse para los periodos de tiempo sin causar el daño al equipo.

Al evaluar la complacencia del usuario con los límites declarados, se recomienda que la probabilidad de distribución se desarrollen de los datos grabados y sean analizados.

Si los límites sólo se exceden por periodos cortos de tiempo, la condición puede ser considerada aceptable.

La Figura 2.2 describe una probabilidad típica para la corriente armónica en un alimentador de distribución.



**Figura 2.2 Distribución de Probabilidad para la THD de Corriente**

### **2.3 Normatividad en otros Países.**

Algunos países han establecido límites de armónicas en redes eléctricas, generalmente en por ciento de distorsión de la onda de voltaje.

En la tabla 2.7, se muestran los límites establecidos en algunos países, ya sea obtenidos de una norma o por recomendaciones [Velázquez y Sarmiento, 1991].

En nuestro país hasta el momento, no existen regulaciones por parte de las compañías suministradoras de energía eléctrica para limitar la distorsión armónica en el punto de entrega al usuario.

De acuerdo a los problemas que se han venido presentando con el incremento masivo de cargas no lineales, se está contemplando la posibilidad de diseñar una norma mexicana que regule estos límites de distorsión armónica.

<b>País</b>	<b>Referencia</b>	<b>Límites</b>
Alemania	DIN 57160-11	5% Arriba de la 13 <sup>ava</sup> . 1% En la 100 <sup>ava</sup> . 10% Total.
Polonia	Recomendación del Instituto de Ingenieros Eléctricos de Katowice.	9% Para 330/220 V. 5% Para 63 kV. 1.5% Arriba de 110 kV.
Suecia	Recomendación de la Autoridad de Energía Eléctrica.	4% Arriba de 300/250 V. 3% Entre 3.3 y 24 kV. 1% Arriba de 84 kV.
Reino Unido	European Standard en 50006-BS	5% Para 415 V. (4% Armónica impar, 2% Armónica par).
Estados Unidos	IEEE Guide for Harmonic Control (IEEE 519)	5% De 2 a 69 kV. (8% en alimentadores para convertidores únicamente). 1.5 para 115 kV y mayores.
Unión Soviética (CEI)	Gost 13109. Norma del Gobierno	5% En cualquier equipo eléctrico.

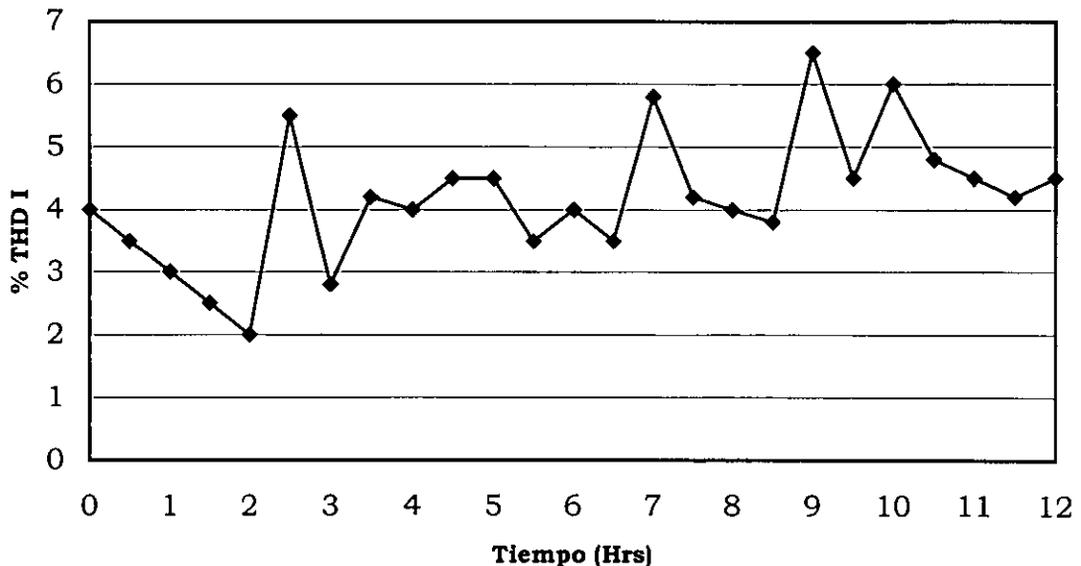
**Tabla 2.7 Límites de distorsión permitidos en diferentes países.**

## 2.4 Discusión sobre las Normas.

Dentro de los límites recomendados por las normas descritas anteriormente, es bueno recalcar algunos puntos que pueden tomarse de una u otra manera a favor del usuario ó de la compañía suministradora de acuerdo con la interpretación de la norma. [Mendoza S. Julián, 1994]

En este caso nos enfocaremos mas a la Norma IEEE-519 ya esta mas enfocada a nuestro estudio de redes de distribución.

En la figura 2.3 se muestra un perfil de distorsión total de corriente, de acuerdo con lo mencionado en la norma IEEE-519, siendo estos valores, los utilizados en el diseño del sistema para "casos extremos" de operación normal cuya duración no debe ser mayor de una hora.



**Figura 2.3 Perfil de THD de corriente en una fase teniendo una relación  $I_{cc}/I_c < 20$  en un sistema de Distribución  $< 69$  kV.**

En la figura 2.3 se ilustra que en cuatro ocasiones el usuario rebasó el límite de distorsión en corriente en un monitoreo de 12 hrs., teniendo una duración de 20, 40, 50 y 55 minutos, respectivamente; o sea que todas fueron inferiores a una hora, entonces el usuario diría que se encuentra dentro de los límites; mientras que la compañía suministradora puede argumentar que el usuario se encuentra fuera de la norma porque en las cuatro veces en que se rebasó el límite, tuvieron un tiempo acumulado de 2 horas 45 minutos durante el monitoreo.

Esta misma norma establece que para periodos cortos, durante condiciones de arranque de motores o condiciones inusuales, pueden ser excedidos en un 50%.

Esta restricción también queda abierta, ya que no se especifica qué tan cortos y qué tan frecuentes pueden ser estos periodos de arranque.

Por ejemplo: el tiempo de arranque de un motor de 8, 000 HP, es más tardado que uno de 60 HP, de igual forma, no es lo mismo tener un arranque a tener 20 arranques en un mismo periodo de tiempo.

Por otra parte, cuando la Norma IEEE-519 se refiere a condiciones inusuales, no se especifica de qué tipo son ó a qué tipo de condiciones se refieren.

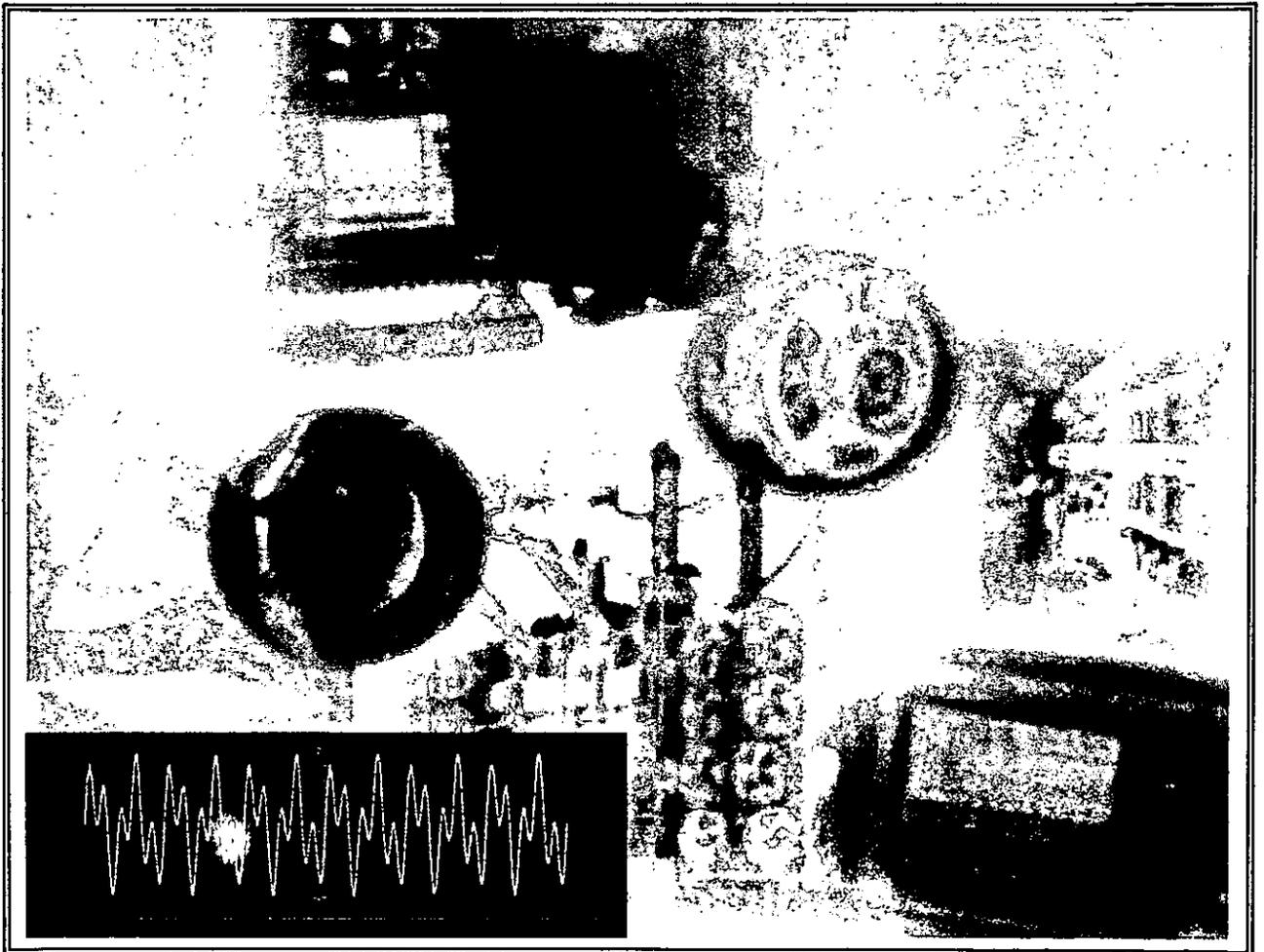
Por estos motivos, sería recomendable que la Norma fuera mas específica en los puntos discutidos en este tema, con el fin de que no surjan diferentes puntos de vista para la apreciación de la misma, de manera que tanto el usuario como la compañía suministradora cumplan con los límites de distorsión armónica establecidos sin entrar en discusiones y problemas por falta de apreciación de la Norma.

## CAPITULO 3

---

# METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA EN REDES DE DISTRIBUCION

---



Para entender lo que se pretende hacer, es necesario que quede bien claro, lo que significa la resonancia, ya que este es el fenómeno ocasionado por la interacción entre las corrientes armónicas y los bancos de capacitores utilizados para regular el voltaje o corregir el factor de potencia.

Los sistemas eléctricos que contienen elementos inductivos y capacitivos, son capaces de presentar este fenómeno en algún valor de la frecuencia para señales de corriente alterna.

Particularmente, los sistemas eléctricos de potencia constituyen un ejemplo. Estos sistemas están integrados por líneas de distribución que se modelan con resistencias, reactancias inductivas y capacitivas (entre líneas o a tierra), transformadores que se representan con reactancias inductivas.

Esta combinación de elementos mas los de los bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia involucran al sistema de potencia, donde el sistema o determinada parte del mismo, se encuentre en resonancia.

### 3.1 La Resonancia

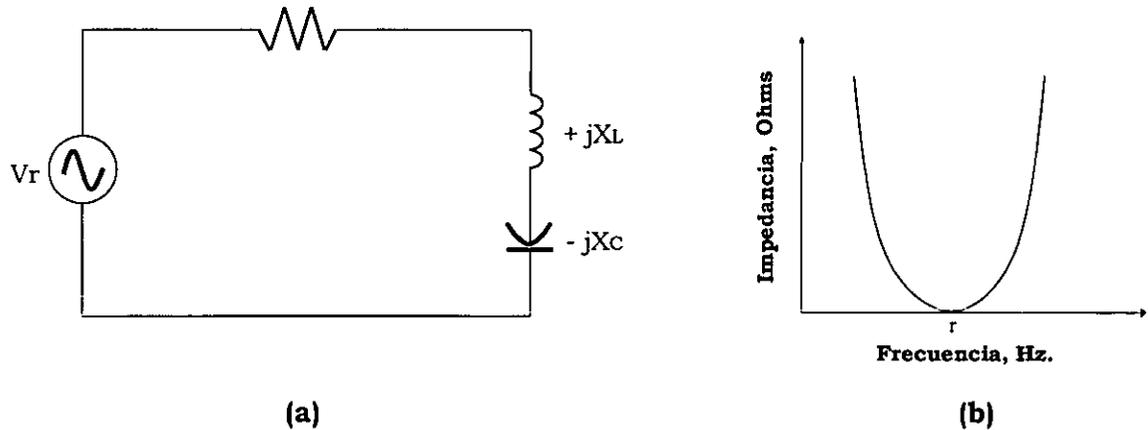
La resonancia generalmente se presenta en los bancos de capacitores originando valores picos altos en la señal de corriente, debido a la presencia de componentes armónicas en la corriente de línea con frecuencias cercanas o igual al valor de la frecuencia de resonancia [Velázquez, Sarmiento y De la Rosa, 1991 y 1994]

En la generación de señales distorsionadas es necesario considerar el fenómenos de resonancia sobre los capacitores de corrección del factor de potencia, las componentes de frecuencia aumentarán provocando daños en los elementos del sistema.

La reactancia inductiva se incrementa directamente con el crecimiento del valor de frecuencia y la capacitiva sufre el efecto contrario. La frecuencia de resonancia en cualquier circuito LC, se origina cuando la reactancia inductiva se hace igual al de la capacitiva, entonces pueden existir dos tipos de resonancia: **serie** o **paralelo**. [Velázquez S. Raúl, 1994]

### 3.1.1 Resonancia Serie

Para la Resonancia Serie, la impedancia total del circuito se reduce al valor de la resistencia por lo que pueden fluir corrientes de valor muy alto. (Figura 3.1)



a) Circuito Resonante Serie

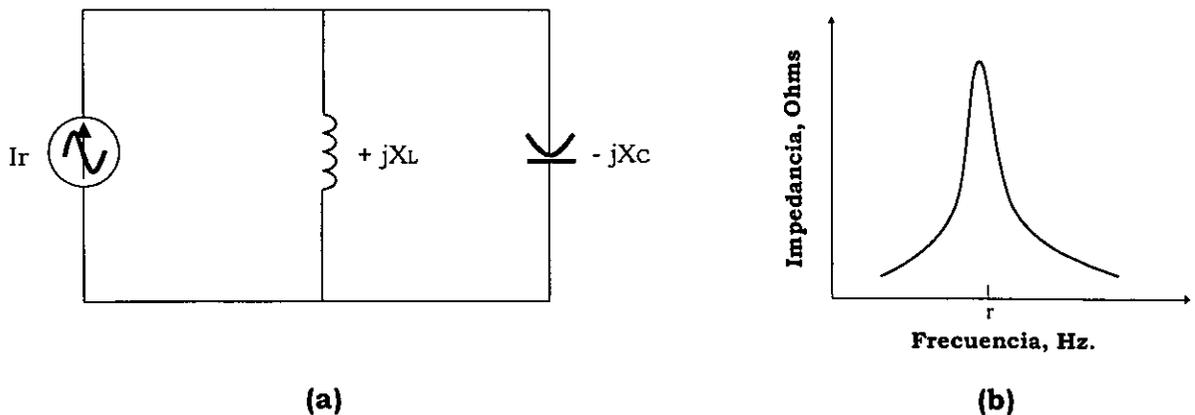
b) Representación gráfica de Impedancia Vs. Frecuencia

**Figura 3.1 Resonancia Serie**

### 3.1.2 Resonancia Paralelo

La resonancia paralelo es similar a la resonancia serie, en la cual a esta frecuencia, la reactancia capacitiva son iguales.

En resonancia la impedancia  $Z$  es muy alta; al excitarse con una fuente a esa frecuencia una corriente muy alta puede circular por el lazo de la inductancia  $L$  y la capacitancia, porque la fuente en realidad suministra valores bajos. (Figura 3.2)



a) Cto. Resonante Paralelo

b) Representación gráfica Impedancia Vs. Frecuencia

**Figura 3.2 Resonancia paralelo**

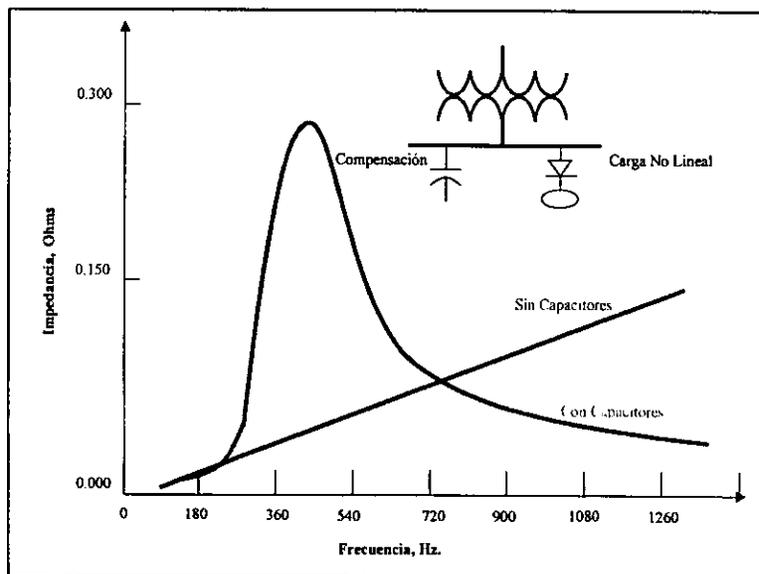
### 3.2 Identificando los Objetivos del Análisis Armónico.

El procedimiento total para el análisis armónico dependerá de los objetivos específicos para realizar su estudio [IEEE Std 519-1992]. Los objetivos incluyen lo siguiente:

1. Para caracterizar la existencia de los niveles armónicos.
2. Para evaluar problemas en el sistema (fallas, interferencia telefónica) que pueden estar relacionados con las armónicas.
3. Para evaluar el impacto de una nueva carga producida por armónicas, artefactos, o generadores dispersados en el sistema.
4. Para diseñar equipos de control de armónicas.

### 3.3 Metodología para el diagnóstico y control de armónicas.

El primer paso consiste en calcular las frecuencias resonantes, a partir de las cuales se puede construir un modelo preliminar que permite inferir la respuesta característica de un sistema en términos de la impedancia dependiente de la frecuencia (figura 3.3). En general, para un análisis detallado se requiere del uso de programas de computo. Una estimación inicial se puede realizar a partir de las corrientes armónicas inyectadas a la red y de la respuesta en frecuencia característica en el punto de inyección. [Velázquez S. Raúl, 1994]



**Figura 3.3**

**Fig. 3.3 Efecto de la resonancia en paralelo originada por la instalación de capacitores en derivación.**

### 3.3.1 Mediciones de la distorsión armónica

Una vez que el problema de armónicas ha sido establecido, mediante análisis preliminar simplificado o mediante la evaluación del malfuncionamiento de la instalación, las mediciones reales permitirán validar cálculos y establecer el tipo de carga no lineal responsable de la generación de las corrientes armónicas.

Las mediciones reales utilizadas conjuntamente con programas de computo, permitirán simular las condiciones de operación de la instalación. Las mediciones constituyen una herramienta muy poderosa para caracterizar el problema de armónicas, sin embargo, considerando su elevado costo, se recomienda establecer un plan bien estructurado, apoyado en evaluaciones preliminares sobre resonancia serie o paralelo para diferentes puntos de la instalación, con el fin de lograr una selección de puntos de medición que permita los mejores resultados al mínimo costo.

Para simplificar los cálculos, las cargas de los motores son ignoradas dentro del circuito equivalente. El análisis básico para hacer esto es el siguiente:

- Calcule la inductancia y capacitancia del circuito con los parámetros proporcionados en la placa de datos, y con la capacidad del voltaje suministrado.
- Calcule la impedancia equivalente de cada rama en función de la frecuencia.
- Después las ramas formarán una  $Z_h$  equivalente.
- Para cada corriente armónica inyectada, calcule el voltaje armónico resultante como:  $V_h = Z_h * I_h$ .
- Para cada voltaje armónico, calcule la corriente armónica en cada rama como:  $I_{h(\text{rama})} = V_h / Z_{h(\text{rama})}$ .
- Para cada corriente armónica en cada rama, calcule el voltaje armónico a través de cada elemento de la rama.

Este método de análisis puede implementarse fácilmente en una hoja de cálculo.

### **3.4 Modelado y simulación de armónicas**

La meta de los estudios armónicos es para cuantificar la distorsión de las formas de onda para el voltaje y la corriente sobre varios puntos en el sistema de potencia. Los resultados son útiles para evaluar las medidas correctivas y la localización de fallas causados por problemas de las armónicas. El estudio de armónicas puede determinar la existencia de resonancia peligrosa y verificar que las armónicas se encuentren dentro de los límites permisibles. La necesidad de estudiar a las armónicas puede ser indicado por la excesiva distorsión medida en sistemas existentes o por la instalación del equipos que producen armónicas. El estudio de las armónicas puede ser similar a los de sistemas de potencia, consiste en los siguientes pasos:

- Definición de los equipos que producen armónicas y determinación de los modelos para su representación.
- Determinación de los modelos para representar otros componentes en el sistema incluyendo a redes externas.
- Simulación de el sistema para varios escenarios.

#### **3.4.1 Modelación de las Fuentes Armónicas**

El modelo más común para las fuentes armónicas son representarlas como fuentes de corrientes armónicas, especificadas por su espectro en magnitud y fase.

La fase es usualmente definida con respecto a la componente fundamental del voltaje terminal. Los datos pueden ser obtenidos idealizando modelos teóricos o por una medición actual. En muchos casos, la medición de las formas de onda, proveen una representación mas real de las fuentes de armónicas para ser modeladas.

Cuando un sistema contiene una fuente de armónicas dominante el espectro de la fase no es importante. Sin embargo, los ángulos de fase pueden ser representados cuando están presentes varias fuentes.

### 3.5 Sistemas de distribución y otros elementos de modelación

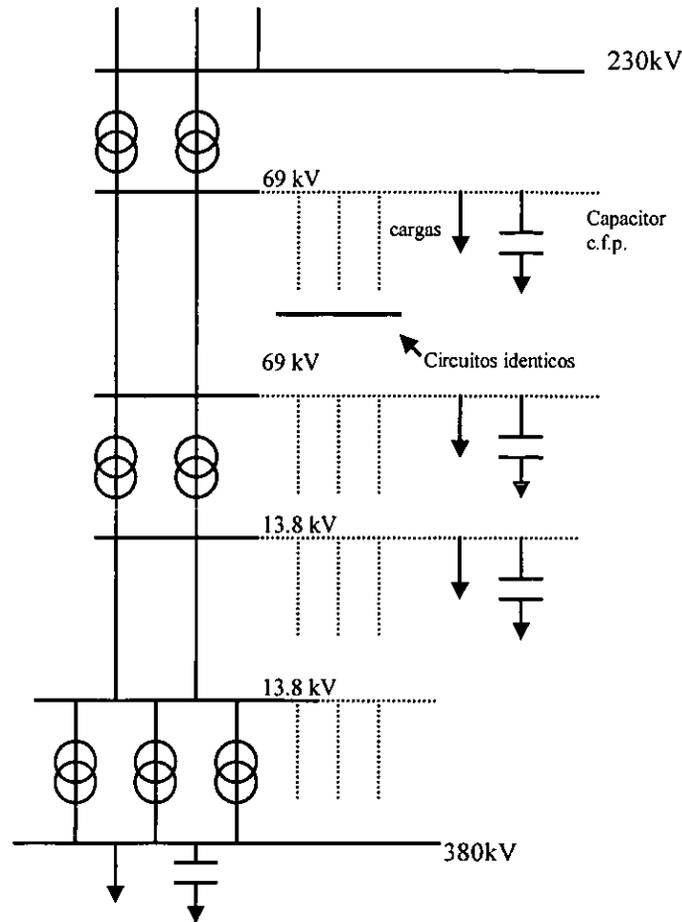
#### 3.5.1 Consideraciones Generales

Las consideraciones básicas son [IEEE Catalog number 98TP125-0]:

- Líneas de distribución y cables (de 69-33kV, por ejemplo), pueden ser representados por un equivalente *pi*. Para líneas cortas, se estima el total de capacitancia a cada nivel de voltaje y en las terminales de los buses.
- Los transformadores de distribución de voltaje pueden ser representados por un elemento equivalente.
- Como la potencia activa absorbida por las máquinas rotatorias no corresponden a un valor dado, la potencia activa y reactiva demandadas a la frecuencia fundamental no pueden ser usadas directamente. Modelos alternativos para la representación de la carga pueden ser usados acordando su composición y características.
- La corrección del Factor de Potencia (CFP), la capacitancia puede ser estimada tan exactamente como sea posible y asignar el nivel correspondiente del voltaje.
- Otros elementos, como son las inductancias en las líneas de transmisión, filtros y generadores pueden ser representados acordando su actual representación y configuración.
- La representación puede ser mas detallada a los puntos de interés. Equivalencias más simples, ya sea para sistemas de transmisión y distribución pueden utilizarse únicamente para puntos muy remotos.
- Para el estudio de sistemas de distribución todos los elementos pueden ser asumidos como tres fases desbalanceadas, pero permitiendo parámetros por fase.

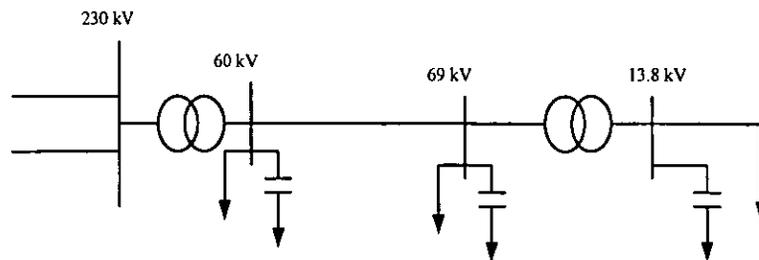
Un sistema de distribución comprende a un número de cargas convenientemente alimentadas por circuitos en el punto más cercano de la distribución.

En general, un considerable número de cargas son localizadas muy juntas y alimentadas por el punto principal de la distribución todas ellas se pueden considerar como una carga total. Para la mayoría de instalaciones, si suministran a una fábrica pequeña, consumidores doméstico o comercial, o a una gran planta, un simple sistema radial es utilizado. Una típica red de distribución se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4. Configuración típica de un Sistema de Distribución**

Una configuración dominante simplificada se puede derivar como se ilustra en la Figura 3.5. Este arreglo representa las características dominantes (impedancias) del circuito alimentador alimentado a cada bus.

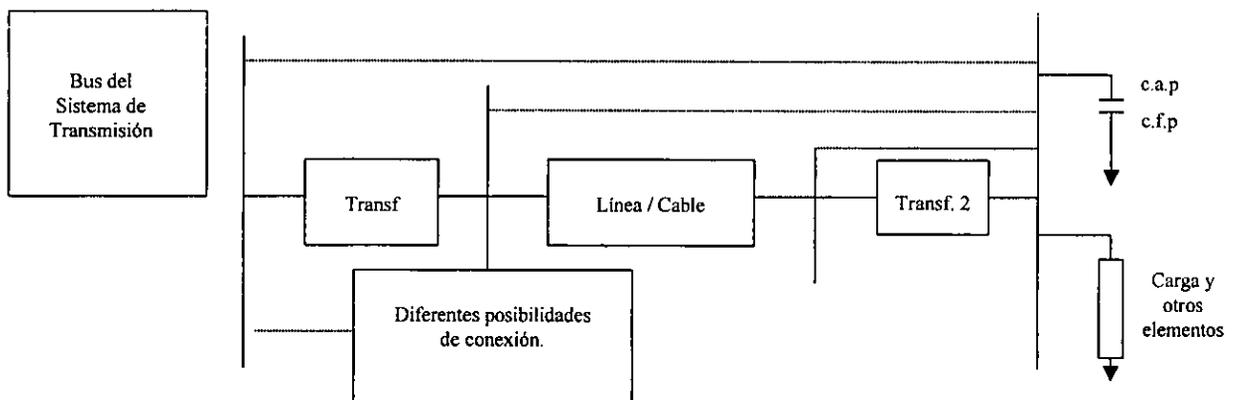


**Figura 3.5. Arreglo Dominante**

Para simplificar la manipulación de los sistemas de distribución, cargas y otros elementos, el siguiente procedimiento basado en la configuración de la Figura 3.5 se sugiere.

Las líneas punteadas en la figura 3.6 dan diferentes posibilidades de conectar las cargas u otros elementos así como filtros compensadores, generadores, etc. La impedancia total equivalente es entonces calculada para cada frecuencia armónica en la estrella aterrizada y conectada al bus de transmisión como un elemento en derivación.

Vease la ilustración de la Figura 3.6 y 3.7. Una composición de diferentes arreglos pueden ser representados en el mismo bús.

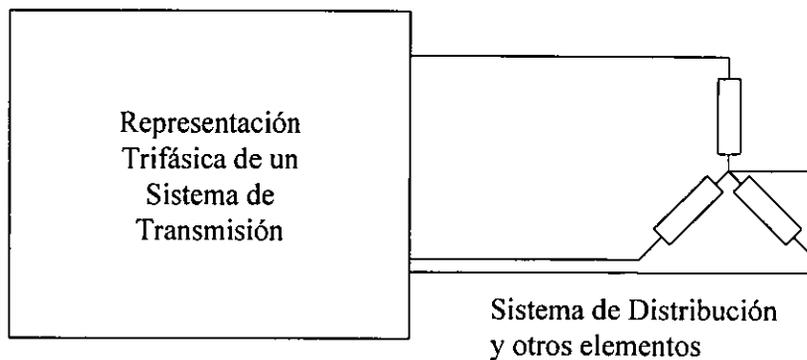


**Figura 3.6 Sistema de Distribución, cargas y otros elementos**

### **3.5.2 Modelado de las Cargas.**

Las cargas de los consumidores juegan una papel importante en las características de la red armónica. Ellos pueden afectar a las condiciones de resonancia, particularmente a altas frecuencias.

Consecuentemente, una adecuada representación de las cargas del sistema es necesario. Sin embargo, es muy difícil obtener información detallada acerca de ello. Es mas, como las cargas consisten en agregar un número de componentes, esta es la dificultad para establecer un modelo basado en el análisis teórico.



**Figura 3.7 Representación total del Sistema**

La necesidad de las mediciones prácticas en los puntos de distribución, en 13.8 kV por ejemplo, junto con información detallada de la red bajo su estudio, es vital para el entendimiento y establecimiento de un modelo real.

Aunque en la práctica es insuficiente para garantizar un mejor modelo, los estudios del sistema se tienen que hacer con cualquier información que esté disponible. De este modo, las características de la carga se observan con todo detalle.

Una típica composición de una planta de consumidores pueden ser como se muestran en la Tabla 3.1.

De la Tabla 3.1, parece evidente que son básicamente dos tipos de cargas: resistiva y motriz. Eso implicaría una combinación sencilla de resistencias e inductancias. Sin embargo, la dificultad en la información obtenida acerca de la composición, potencia y la variación con tiempo hace la tarea muy difícil.

No obstante, esto es posible para aprovechar el problema de la representación de las cargas para el estudio de las armónicas utilizando modelos de acuerdo las características de las cargas y de la información disponible.

### **3.5.3 Modelos Recomendados.**

Las cargas son generalmente expresadas por su potencia activa y reactiva  $P$  y  $Q$ , respectivamente, que son utilizadas para calcular la impedancia equivalente para el estudio de flujos de carga a la frecuencia fundamental.

Sin embargo, en las frecuencias armónicas, P y Q no pueden ser usadas directamente porque la potencia activa absorbida por una máquina rotatoria no corresponde exactamente a un valor “damping”, y es necesario una información adicional.

Los siguientes modelos A-D pueden ser utilizados acordando las características de las cargas y la información disponible:

CLASE	TIPO DE CARGA	CARACTERISTICAS ELECTRICAS
Domésticos	Lámparas incandescentes Compactas Fluorescentes Motores pequeños Computadoras Electrodomésticos	Resistencia Pasiva No Lineal Inductancia Pasiva No Lineal No Lineal (*)
Comercial	Lámparas Incandescentes Aire Acondicionado Calentadores de Resistencia Refrigeración Máquinas de Lavado Lámparas Fluorescentes (STD) ASD´s Fluorescentes (Electrónicos) Computadoras Otras cargas Electrónicas	Resistencia Pasiva Inductiva Pasiva Resistencia Pasiva Inductiva Pasiva Inductiva Pasiva No Lineal (*) No Lineal (*) No Lineal (*) No Lineal (*) No Lineal (*)
Pequeñas Plantas Industriales (Bajo Voltaje)	Ventiladores Bombas Compresores Calentadores de resistencia Hornos de Arco ASD´s Otras cargas Electrónicas	Inductancia Pasiva Inductancia Pasiva Inductancia Pasiva Resistencia Pasiva No Lineal (*) No Lineal (*) No Lineal (*)

**Tabla 3.1 Composición de las Cargas**

\* Estas cargas producen armónicas. De aquí en adelante, estas no exhiben una constante R, L ni C; ellas son no lineales y por lo tanto no pueden ser incluidas en una red equivalente de impedancias. Afortunadamente, hay una razón para crear un efecto insignificante (circuito abierto) en la impedancia armónica y puede ser despreciable.

- A. A frecuencias armónicas, la potencia reactiva estimada puede tener un efecto despreciable en algunos casos. De esta manera, la P es considerada equivalente a una resistencia del valor  $R = V^2 / P$ , siendo V el voltaje nominal a la frecuencia nominal (ver Figura 3.8). esta representación es usada cuando los motores son muy pequeños, por ejemplo para las cargas comerciales y domésticas en las que las partes rotatorias son particionadas que los efectos resistivos son predominantes.
- B. La resistencia equivalente anterior es estimada, pero con una inductancia en paralelo. Esto podría ser evaluado usando una estimación del número de motores en servicio, su potencia unitaria instalada (no demanda), y su inductancia de secuencia negativa. Sin embargo, es precisa la información en el número de motores, etc. Este modelo es una combinación de prácticas comunes. Por lo tanto, nosotros tendremos que:

$$R = \frac{V^2}{P(1-K)} \quad L = \frac{V^2}{1.2(K + K_E) K_1 P \omega}$$

- Donde
- P = MW de Demanda Total
  - K = Fracción del motor del total de MW
  - $K_E$  = Controlador Electrónico de la fracción de carga total de MW
  - $K_1$  = Condición severa de arranque
  - $\omega$  = Radian

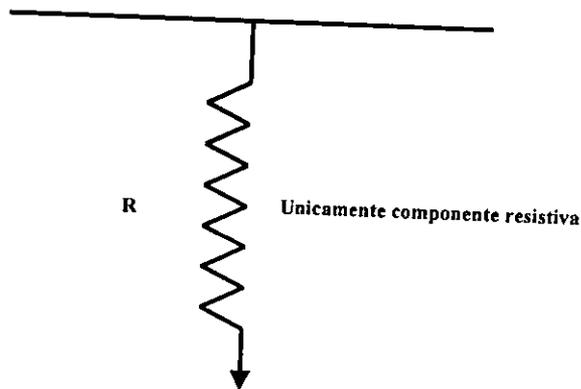
K asume valores alrededor de 0.80 para cargas industriales y de 0.15 para cargas comerciales y domésticas.  $K_1$  asume valores entre 4 y 7.  $K_E$  puede asumir valores alrededor de 0.

Puede ser suficiente precisión para ignorar la componente resistiva del motor. Sin embargo, una representación adicional de la resistencia del motor “damping” puede ser incluida como  $R_1 = L/K_2$ , donde  $K_2$  es una fracción de la inductancia de secuencia negativa cerrada del rotor.  $K_2$  asume valores alrededor de 0.20.

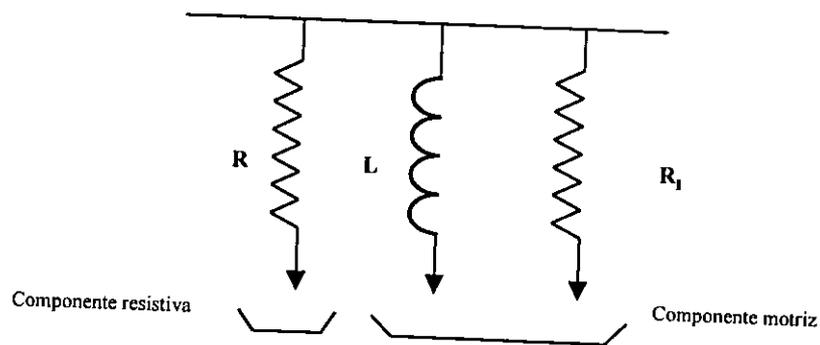
- C. Cuando una gran inducción del motor o grupo de motores estan conectados directamente a un nivel de voltaje que es el caso de las plantas industriales, las partes motrices son mejor representadas por una resistencia en serie con la inductancia de secuencia negativa del motor. El modelo puede ser valorado como sigue: La resistencia equivalente, la parte de la resistencia, y la inductancia de secuencia negativa de el motor es estimada como una B, y la resistencia en serie estimada por  $R = \omega L/K_3$ , donde:  $K_3$  es la Q efectiva del circuito del motor,  $\omega$  es la frecuencia fundamental en radianes. Alternativamente, una serie de inductancias  $L_T$  para representar la reactancia de los transformadores

de distribución a bajo voltaje conectándole la resistencia de carga para ser incorporada. Un valor de  $\omega L_T = 0.1R$  puede ser asumido.

- D. Este modelo fue desarrollado de experimentos realizados con mediano voltaje, utilizando radiofrecuencias, generadores de control de Ripple a EDF. El circuito sugerido fue una inductancia en serie con una resistencia. Esta rama fue conectada en paralelo con otra inductancia. La P y Q fueron utilizadas en fórmulas empíricas para calcular las impedancias equivalentes. De esta manera,  $R = V^2/P$ ,  $L_1 = 0.073R/\omega$ ;  $L_2 = R/(6.7 \tan(\pi) - 0.74)\omega$ ;  $\tan(\pi) = Q/P$  (Ver Figura 3.9). Aunque este modelo fue obtenido basado en dos frecuencias solamente, 175 y 495 Hz, y la información disponible no es suficientemente clara en cuanto a cómo se derivó el circuito equivalente, los parámetros no difieren sustancialmente de los modelos B y C.  $L_2$  parece equivalente para la parte de la inductancia del motor y  $R/L_1$  para la resistencia del circuito.



**Figura 3.8 Modelo de Carga A**



**Figura 3.9 Modelo de Carga B**

detallados de todos los componentes del sistema. Los sistemas de potencia interconectados típicamente incluyen cientos de generadores y líneas de transmisión, e incluso más líneas de distribución y clientes. Incluso los sistemas solos tienen más cargas que pueden ser modeladas individualmente.

Todos los estudios armónicos comienzan con la determinación de el rango de frecuencia de interés y la selección de los componentes del sistema cuales serán modelados.

## Modelado de los Sistemas de Distribución.

Mientras los sistemas de distribución y sistemas de transmisión tienen los mismos componentes: líneas, transformadores y máquinas, estos son prácticamente diferentes en el desarrollo del modelo del sistema para ambos tipos.

Los sistemas de distribución, en realidad están divididos en dos niveles distintos: Distribución Primaria y Distribución Secundaria.

La Distribución Secundaria está muy a menudo debajo de 600 voltios, y es típicamente utilizada por los consumidores. La Distribución Primaria generalmente está en un rango de los 4 kV a los 36 kV y es típicamente utilizada por la empresa de electricidad.

Existen dos razones para emprender un estudio de armónicas en los sistemas de distribución: el primero es debido al impacto que han causado las armónicas debido a nuevas fuentes de generación, segundo, para examinar el problema de armónicas en un sistema existente.

## Modelado para tres fases o una sola fase.

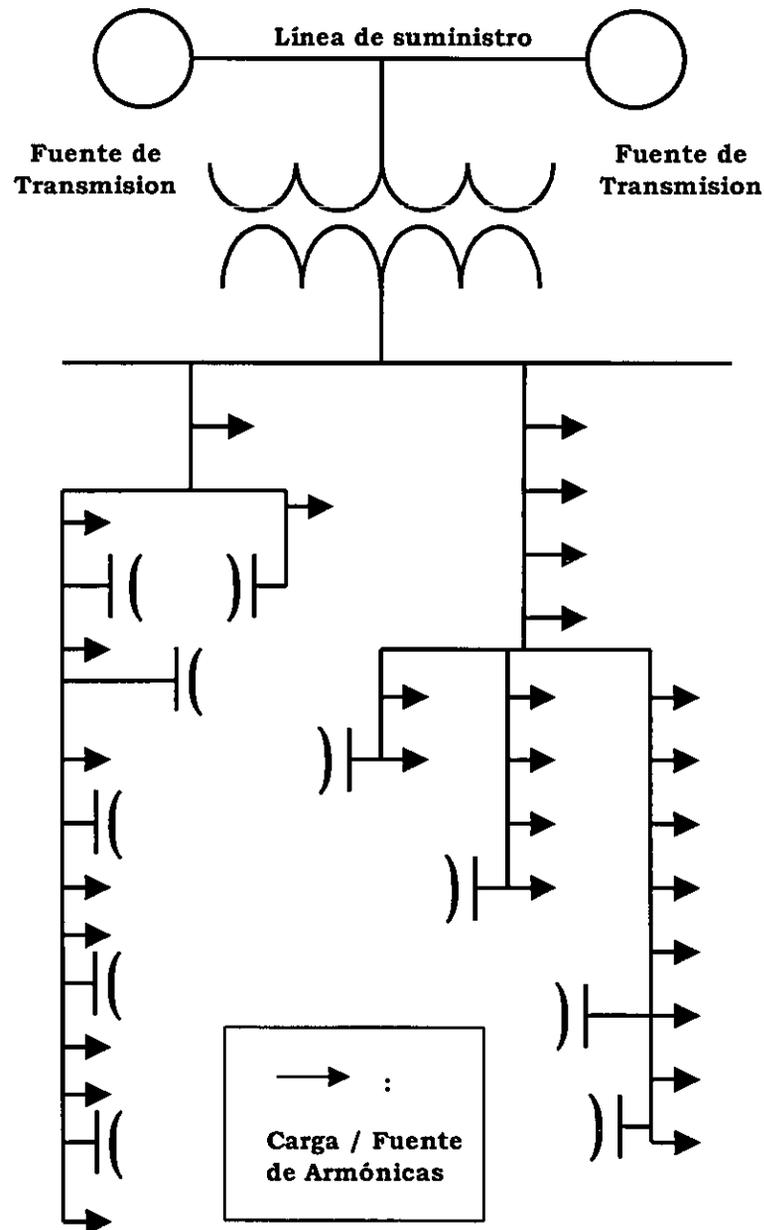
La primera decisión para hacer un estudio de armónicas en un sistema de distribución si es requerido un modelo trifásico o si un modelo monofásico es suficiente. El modelado trifásico se requiere cuando:

- Una combinación de los transformadores Estrella-Estrella y/o Delta-Estrella dirigen la cancelación de armónicas.
- Una fase o capacitores desbalanceados están presentes.
- La tierra o corrientes residuales son importantes en el estudio.
- La carga significativamente desbalanceada está presente.

Como uno o más de estos casos está presente en muchos de los sistemas de distribución, es a menudo recomendado implementar un modelo de tres fases en el estudio de un sistema de distribución. Los instantes en que el modelo de una fase puede ser suficiente son:

- Que una de las tres fases de la fuente armónica es el caso del estudio.
- El sistema esta bien balanceado.
- No son un asunto de las corrientes a tierra.

Los modelos de una fase del sistema pueden ser atractivos como es la tercera parte de el modelo de tres fases y los resultados pueden ser mas compactos y más fáciles de interpretar.



**Figura 3.12 Diagrama Unifilar de un Sistema Primario de Distribución.**

## La extensión del Sistema modelado.

Más sistemas de distribución están unidos a la interconexión de la red de potencia. Las excepciones son ciertos sistemas como los que se encuentran en las plataformas pozos petroleros. En este tipo de sistemas, puede ser factible modelar el sistema de potencia completo. En otros casos, sin embargo, los sistemas son muy largos y los modelos muy completos.

Un sistema de distribución primaria es mostrado en la Figura 3.12. El sistema es radial, con la energía suministrada por el sistema a través de un transformador retirado de la red de transmisión.

En muchos casos, esto es suficientemente preciso para representar la red de transmisión a 60 Hz en corto circuito la resistencia con la inductancia equivalente. Debe existir la consideración del hecho que la fuerza del corto circuito del sistema que suministra puede cambiar dependiendo de la configuración de sistema.

Un modelo más detallado es necesario cuando los capacitores para la corrección del factor de potencia están presentes en los sistemas de transmisión cerca a los transformadores.

Para estudios de propagación de armónicas en sistemas primarios, los componentes del sistema pueden ser modelados de acuerdo a la apropiado rango de frecuencia para su estudio. Típicamente, la capacitancia de las líneas sobrecalentadas y los transformadores, no es necesarios incluirlos en los estudios implicados al bajo orden las armónicas.

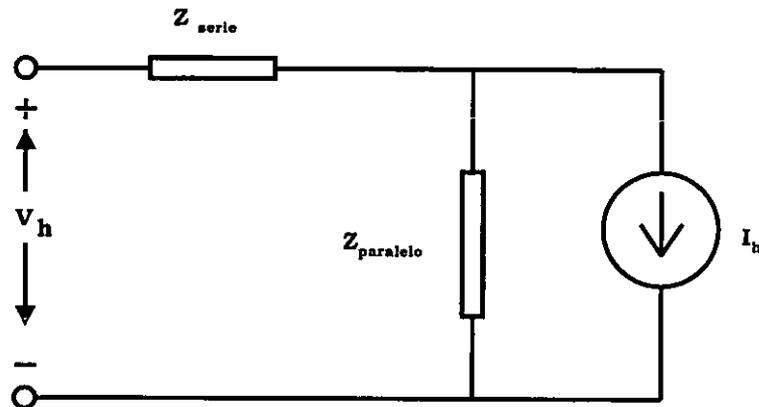
La iteración de los capacitores del factor de potencia, la línea y las inductancias de la fuente son estos muy necesarios para se modelados con cuidado. El incremento de la resistencia en la línea debido al efecto piel, hace que se incremente el damping en los puntos resonantes del sistema y pueden ser incorporados dentro del modelo.

La componente final del modelo del sistema de distribución es la carga. El modelado de la carga es difícil, debido a que no es posible identificar exactamente dónde esta la carga en algún punto dado.

Como se indica en la Figura 3.12, la mayoría del casi todas cargas del sistema generan corrientes armónicas hasta cierto punto. Un modelo genérico de la carga incluye una fuente armónica y la impedancia armónica.

Un ejemplo del modelo de carga es mostrado en la Figura 3.13. La impedancia en serie es a menudo tomada para incluir los efectos del transformador de distribución.

Varios métodos se han usado para escoger los valores de la impedancia en derivación para una carga dada. Un método es modelar la carga del motor separadamente de las otras cargas. La carga pasiva MVA se convierte en una impedancia equivalente RL. La carga del motor es modelada como una sola inductancia del motor agrupada con reactancias apropiadas y con las resistencias del estator y rotor.



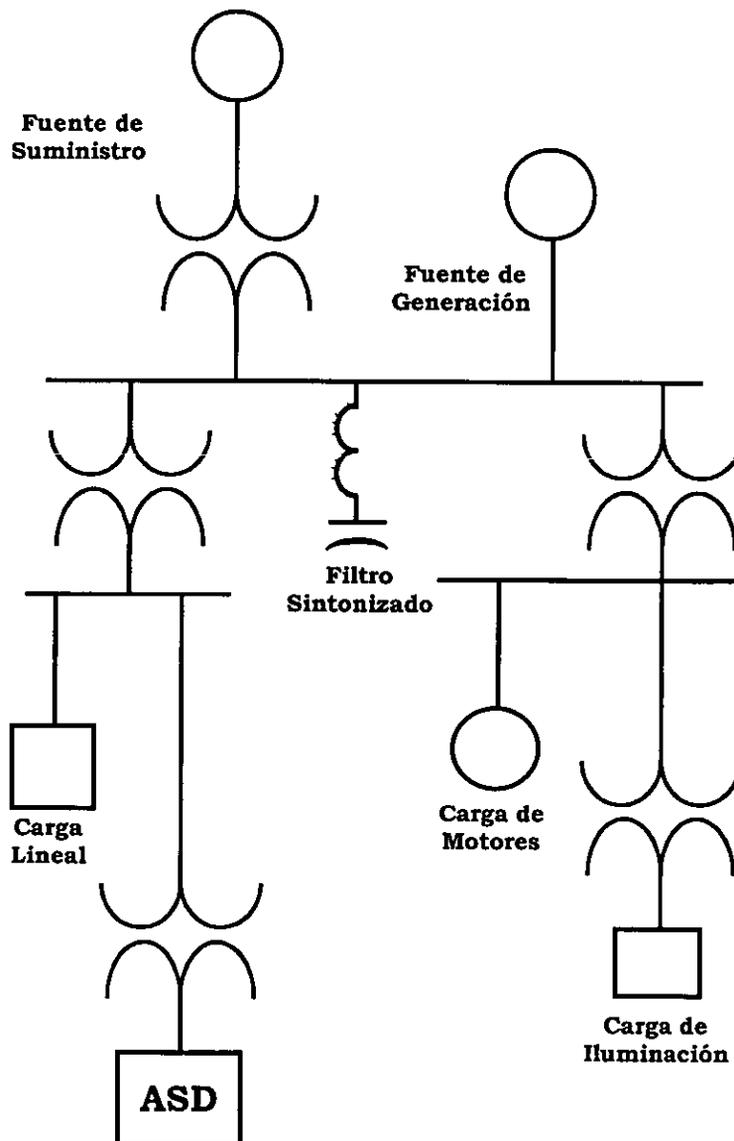
**Figura 3.13 Modelo Genérico de la carga por fase**

## Sistemas de Distribución Secundarios.

Estudios de sistemas de distribución secundarios abarcan estudio de una planta o de instalaciones comerciales. Varias de las características del modelado de los sistemas de distribución primarios son ocupadas también para los sistemas secundarios.

El diagrama unifilar para sistemas industriales se muestra en la Figura 3.14.

La capacitancia de la línea y del transformador, son típicamente despreciables, como es también el caso de los cables cortos. En muchos casos, las mediciones son fáciles para desarrollar sistemas secundarios, y los datos de las cargas pueden ser mas disponibles para leerlos.



**Figura 3.14 Diagrama Unifilar de una Planta Industrial**

### **3.6 Preparación de Datos.**

En el presente, muchos estudios son desarrollados con un software comercial para Análisis de armónicas. Los datos de entrada y la síntesis del modelo utilizados en estos programas son tomados convenientemente. Los datos típicos que se necesitan para los estudios son resumidos en la Tabla 3.2.

<b>Artefacto</b>	<b>Datos necesarios</b>
Transformador	Proporción actual, Diagrama de Conexión, Impedancia de Corto circuito
Bancos de Capacitores	Voltaje, VAR, configuración (Estrella aterrizada, Estrella o Delta)
Líneas aéreas y Cables	Medidas de los conductores de la fase y del neutro, arreglo, longitud, o impedancias de corto circuito, capacitancia (cuando es necesario).
Filtros Sintonizados	Frecuencia sintonizada, Voltaje, VARS, Configuración.
Generadores/ Motores grandes	Impedancia subtransitoria, configuración.
Cargas lineales	Watts, Factor de potencia, composición, balance.
Cargas No Lineales	Nivel de armónicas inyectadas esperadas, magnitud y fase del ángulo.

**Tabla 3.2. Datos típicos necesarios para estudios de armónicas en redes de distribución.**

### 3.7 Simulación.

Una vez realizadas las mediciones, los cálculos numéricos que emplean los programas de computo para simular el fenómeno de la distorsión armónica, se utilizan para lograr una buena representación del sistema real.

Las simulaciones de la impedancia en función de la frecuencia permiten identificar las configuraciones que crean situaciones de resonancia armónica; las simulaciones sobre niveles de distorsión armónica, permitirán evaluar la eficiencia de los filtros como medio de control.

Las simulaciones preliminares deben ser desarrolladas para identificar supuestos niveles de armónicas y las características de la respuesta del sistema. Para entender un poco mas acerca de lo que es la simulación, basada en algoritmos matemáticos y probabilidad de resultados, se puede consultar el **Anexo A**.

Cómo ya se había mencionado con anterioridad, necesitamos de un programa de computadora como una valiosa herramienta para poder simular el efecto de la resonancia armónica en redes de distribución.

Para dicho efecto, se utilizó el programa SPS, por sus siglas en ingles [**Software for Power Systems**]. Este programa, nos permite:

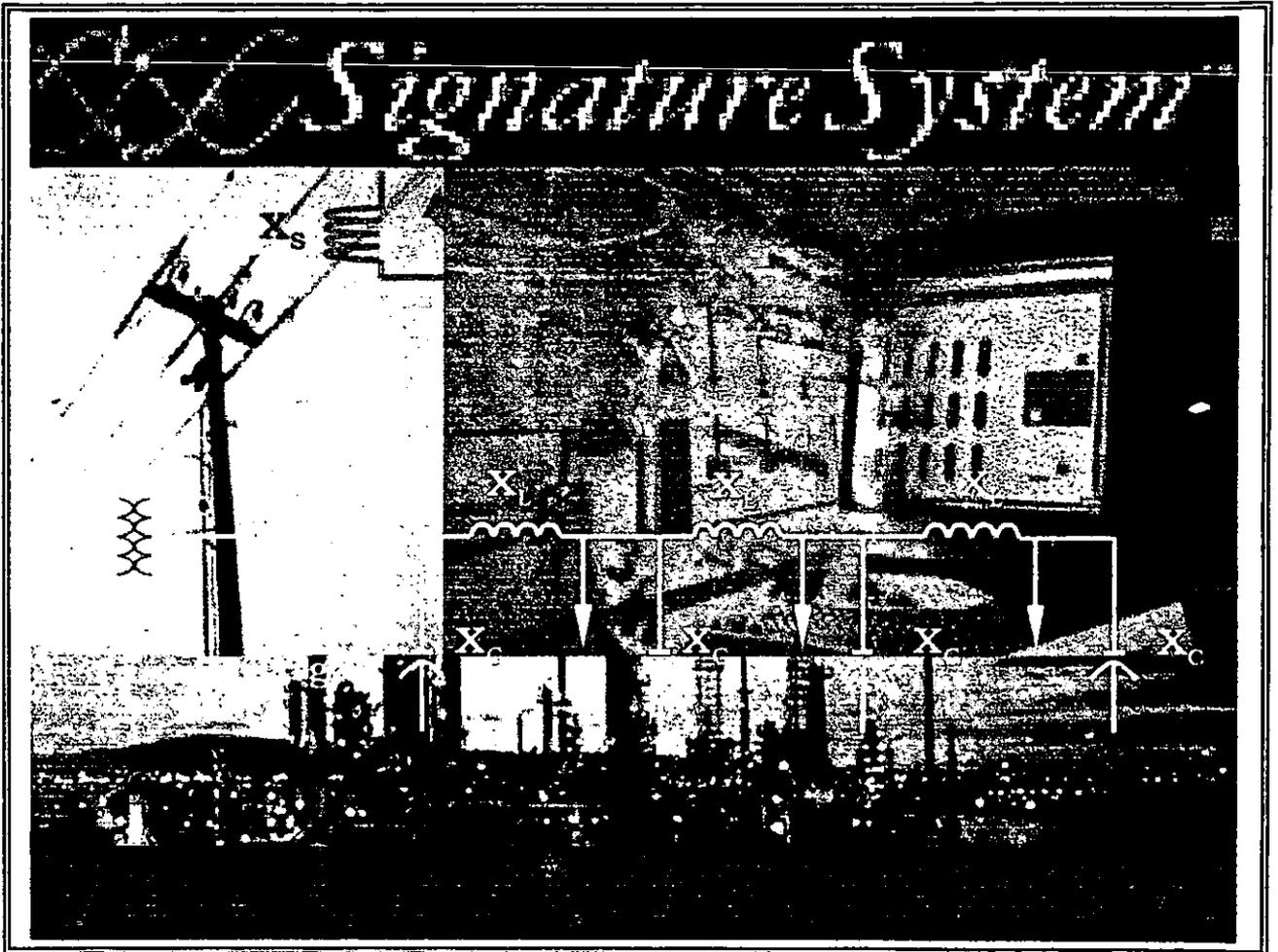
- Calcular los efectos de las armónicas de los sistemas eléctricos de potencia.
- Calcula también, corrientes balanceadas y desbalanceadas en sistemas eléctricos de potencia.
- Desarrolla cálculos de flujo de cargas en sistemas eléctricos de potencia.
- Calcula la impedancia de líneas de Transmisión y Distribución.
- Calcula la aceleración de motores en conjunto con los flujos de carga.
- Desarrolla y calcula los parámetros del circuito del motor.

En nuestro caso, este programa nos sirvió para realizar pruebas y comparaciones de problemas que sufren los sistemas de distribución, para poder observar, concluir y deducir los puntos en los cuales el sistema entra en resonancia armónica y así finalmente poder determinar una mejor solución para el caso que se esté estudiando.

De aquí en adelante, los problemas, ejemplos y gráficas, serán tomados y realizados con el mismo programa de simulación, con la finalidad de mostrar lo valioso que son estos programas como herramienta de primera necesidad para los futuros y actuales Ingenieros de diseño en el ámbito eléctrico.

# CAPITULO 4

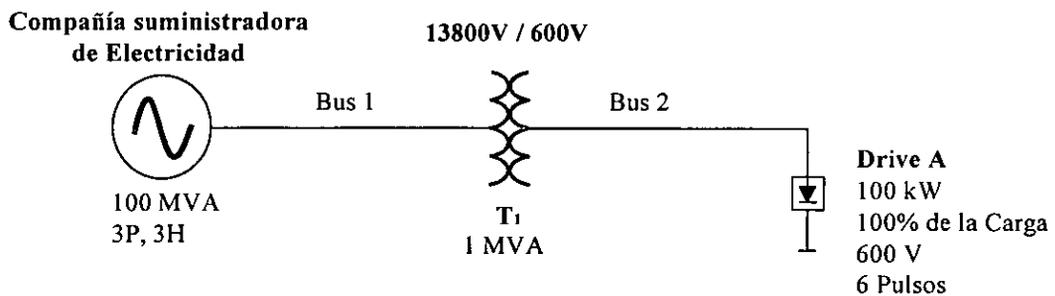
## EJEMPLOS DE APLICACIÓN



Para entender bien lo que se recomienda en la práctica, se discutirán aplicaciones reales, tomados de alimentadores de una Red de Distribución, aplicando también el programa de simulación SPS.

#### 4.1 Ejemplo I

De acuerdo al siguiente diagrama (Figura 4.1), se hicieron cambios a la configuración del transformador, teniéndose una carga No lineal conectada a este; todo esto se hizo con la finalidad de comparar los efectos sufridos en la forma de onda del voltaje y de la corriente, así también comparamos la impedancia de la red con respecto a la frecuencia para distintas configuraciones en la red.



**Figura 4.1 Diagrama de Prueba**

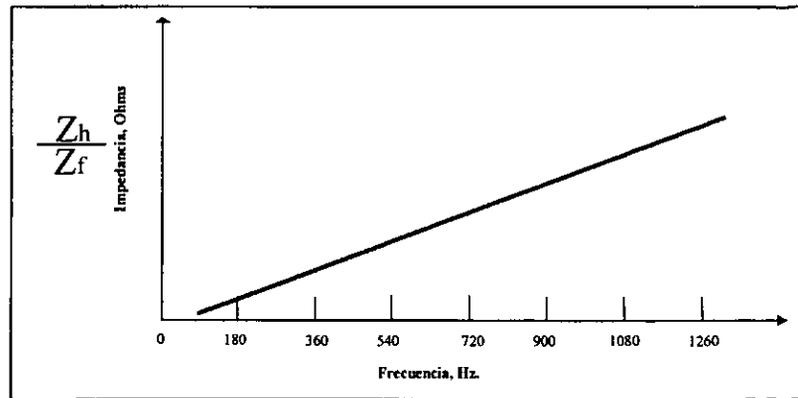
Para las siguientes configuraciones del transformador tuvimos los siguientes resultados:

<b>Config. T<sub>1</sub></b>	$\Delta - Y_{\rightarrow}, Y_{\rightarrow} - \Delta, \Delta - Y, Y - \Delta, \Delta - \Delta, Y_{\rightarrow} - Y_{\rightarrow}$ $Y - Y_{\rightarrow}, Y - Y$
------------------------------	--

	<b>V<sub>THD</sub> %</b>	<b>V<sub>RMS</sub> %</b>	<b>I<sub>THD</sub> %</b>	<b>I<sub>RMS</sub> %</b>
<b>BUS 1</b>	0.425	100.012	29.928	104.382
<b>BUS 2</b>	2.974	99.954	29.928	104.382

**Tabla 4.1 Lecturas obtenidas de la Figura 4.1**

En la Figura 4.2, vemos la gráfica de Impedancia contra Frecuencia, podemos observar que no se presenta resonancia en la red.



**Figura 4.2 Grafica de Impedancia vs. Frecuencia para la Figura 4.1**

Con esto pudimos observar que para todas las configuraciones de  $T_1$ , los valores de Voltajes y Corrientes no cambiaron, pero ahora hicimos cambios en la potencia del transformador  $T_1$ , lo reducimos a 500 VA, teniéndose las siguientes lecturas:

Config. $T_1$	$\Delta - Y \rightarrow, Y \rightarrow - \Delta, \Delta - Y, Y - \Delta, \Delta - \Delta, Y \rightarrow - Y \rightarrow$ $Y - Y \rightarrow, Y - Y$			
	$V_{THD} \%$	$V_{RMS} \%$	$I_{THD} \%$	$I_{RMS} \%$
<b>BUS 1</b>	0.425	100.012	29.928	104.382
<b>BUS 2</b>	5.536	99.954	29.928	104.382

**Tabla 4.2 Lecturas obtenidas al cambiar los VA de  $T_1$  de la Figura 4.1**

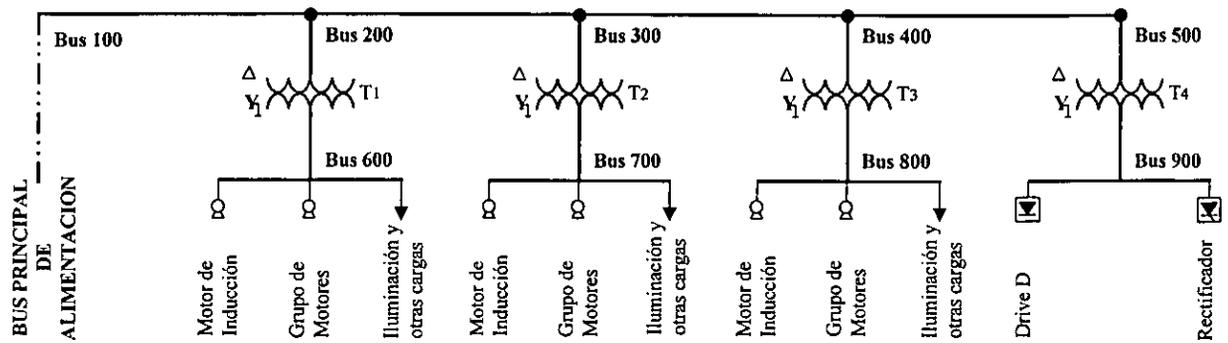
Pudimos observar que para el **BUS 2** el  $V_{THD}$  aumentó a casi el doble de su valor inicial, y para los demás valores no cambiaron. Esto cumple con la siguiente expresión:

$$\frac{I_{cc}}{I_c} = \frac{\text{Entre mayor sea, menor distorsión armónica}}{\text{Si es menor esta, menor distorsión armónica y viceversa}}$$

#### 4.2 Ejemplo II

Tenemos el siguiente diagrama de alimentadores, con un voltaje de alimentación de 230000 V, con cuatro transformadores de 1500 kVA y una longitud total de la línea de 20 km, entre cada bus hay 5 kilómetros de distancia. Los datos de los elementos utilizados en la simulación, son presentados en el **Anexo B**.

Lo que se pretende hacer, es identificar en qué puntos de la red se generan mayor Distorsión Armónica, intercambiando la carga No Lineal entre cada bus.



**Figura 4.3 Red de Distribución con cargas No Lineales en el bus 900**

Una vez teniendo los datos dentro del Programa **SPS**, obtuvimos las siguientes lecturas:

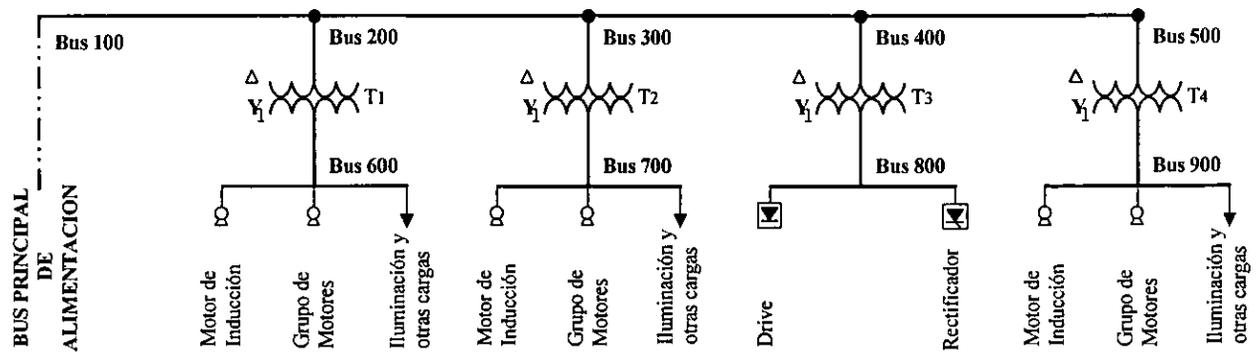
Bus	Voltaje	V <sub>THD</sub> %	V <sub>RMS</sub> %
100	23000	3.879	99.839
200	23000	4.022	99.143
300	23000	4.180	98.634
400	23000	4.351	98.312
500	23000	4.536	98.178
600	480	3.217	95.457
700	480	3.343	94.944
800	480	3.481	94.619
900	480	13.090	97.939

**Tabla 4.3 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.3**

Bus	Voltaje	I <sub>THD</sub> %	I <sub>RMS</sub> %	I AMP
100 - 200	23000	1.942	100.019	148
200 - 300	23000	3.036	100.046	110
200 - 600	23000 / 480	1.276	100.008	38
300 - 400	23000	5.258	100.138	73
300 - 700	23000 / 480	1.318	100.009	38
400 - 500	230000	11.799	100.694	37
400 - 800	23000 / 480	1.368	100.009	38
500 - 900	230000 / 480	11.799	100.694	37

**Tabla 4.4 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.3**

Ahora cambiamos la carga No Lineal al **Bus 800**, como se muestra en la figura siguiente:



**Figura 4.4 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 800**

Con esta configuración obtuvimos los siguientes datos:

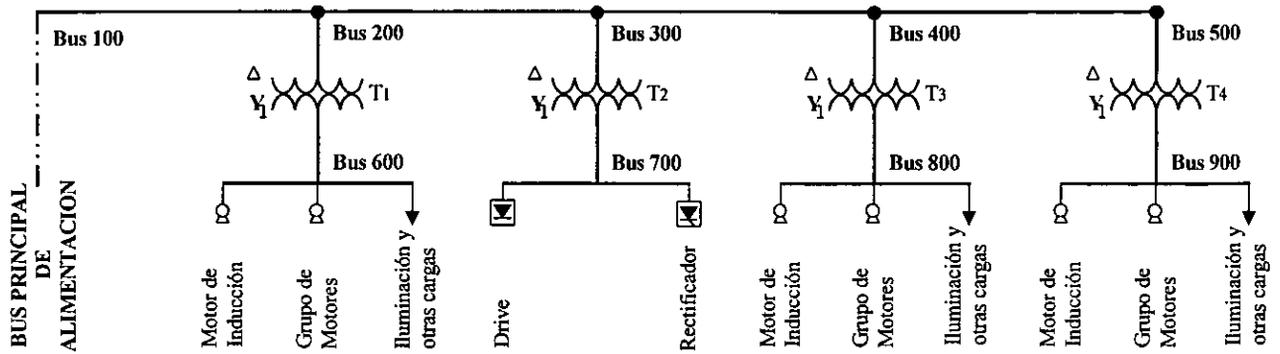
Bus	Voltaje	$V_{THD}$ %	$V_{RMS}$ %
100	23000	4.897	99.884
200	23000	5.078	99.191
300	23000	5.277	98.686
400	23000	5.493	98.368
500	23000	5.476	98.182
600	480	4.059	95.487
700	480	4.218	94.976
800	480	16.272	98.536
900	480	4.379	94.466

**Tabla 4.5 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.4**

Bus	Voltaje	$I_{THD}$ %	$I_{RMS}$ %	$I_{AMP}$
100 - 200	23000	2.079	100.022	148
200 - 300	23000	3.254	100.053	110
200 - 600	23000 / 480	1.371	100.009	38
300 - 400	23000	5.640	100.159	73
300 - 700	23000 / 480	1.417	100.010	38
400 - 500	23000	1.463	100.011	38
400 - 800	23000 / 480	12.661	100.798	37
500 - 900	23000 / 480	1.463	100.011	38

**Tabla 4.6 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.4**

Ahora cambiamos la carga No Lineal al **Bus 700**, como se muestra en la figura siguiente:



**Figura 4.5 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 700**

Teniendo las siguientes lecturas:

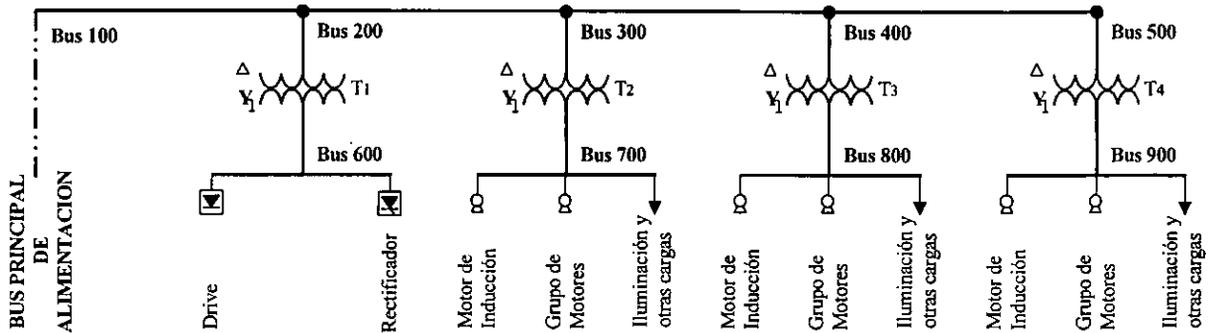
Bus	Voltaje	V <sub>THD</sub> %	V <sub>RMS</sub> %
100	23000	4.916	99.890
200	23000	5.097	99.194
300	23000	5.297	98.687
400	23000	5.265	98.318
500	23000	5.249	98.132
600	480	4.074	95.490
700	480	16.019	98.764
800	480	4.205	94.716
900	480	4.198	94.422

**Tabla 4.7 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.5**

Bus	Voltaje	I <sub>THD</sub> %	I <sub>RMS</sub> %	I AMP
100 - 200	23000	2.076	100.022	149
200 - 300	23000	3.241	100.052	111
200 - 600	23000 / 480	1.377	100.009	38
300 - 400	23000	1.426	100.010	74
300 - 700	23000 / 480	11.988	100.716	39
400 - 500	23000	1.402	100.010	38
400 - 800	23000 / 480	1.450	100.011	37
500 - 900	23000 / 480	1.402	100.010	38

**Tabla 4.8 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.5**

Ahora cambiamos la carga No Lineal al **Bus 600**, como se muestra en la figura siguiente:



**Figura 4.6 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600**

Teniendo las siguientes lecturas:

Bus	Voltaje	$V_{THD}$ %	$V_{RMS}$ %
100	23000	4.947	99.914
200	23000	5.130	99.220
300	23000	5.085	98.665
400	23000	5.055	98.297
500	23000	5.040	98.110
600	480	15.731	99.276
700	480	4.065	94.960
800	480	4.037	94.699
900	480	4.030	94.405

**Tabla 4.9 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.6**

Bus	Voltaje	$I_{THD}$ %	$I_{RMS}$ %	$I_{AMP}$
100 - 200	23000	2.093	100.022	148
200 - 300	23000	1.368	100.009	112
200 - 600	23000 / 480	11.983	100.715	39
300 - 400	23000	1.369	100.009	74
300 - 700	23000 / 480	1.366	100.009	38
400 - 500	23000	1.346	100.009	38
400 - 800	23000 / 480	1.392	100.010	37
500 - 900	23000 / 480	1.346	100.009	38

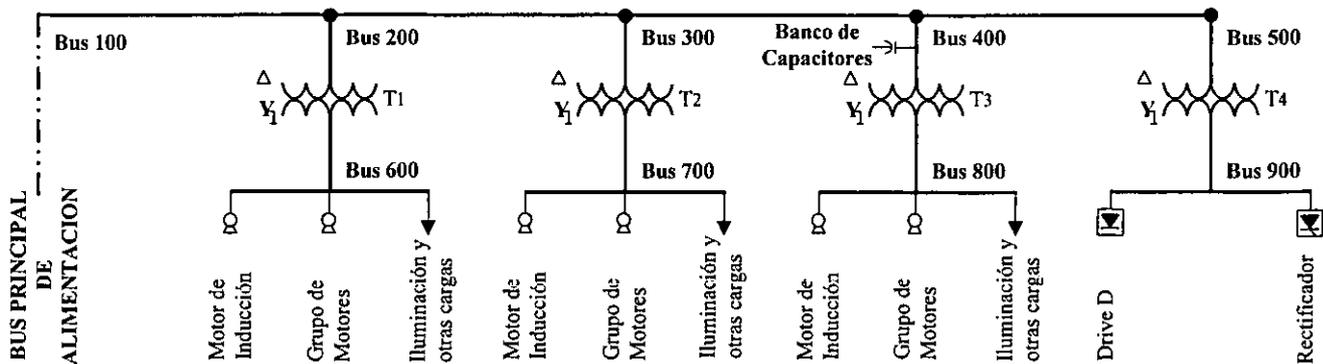
**Tabla 4.10 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.6**

Una vez que intercalamos la carga No Lineal en cada uno de los buses de carga, pudimos observar lo siguiente:

- Cuando la carga No Lineal esta ubicada en el punto mas lejano del alimentador principal, la  $I_{THD}$  de mayor cantidad se presenta no solamente en el lado donde se ubica la carga No Lineal, sino que también este mismo valor se encuentra en el lado de alta para los buses 400 - 500.
- La mayor magnitud de  $I_{THD}$  se presenta cuando la carga No Lineal esta en el bus 800.
- Para el  $V_{THD}$  de mayor orden este se encuentra en el bus donde esta conectada la carga No Lineal.
- La mayor magnitud de  $V_{THD}$  se presenta cuando la carga No Lineal esta en el bus 800.
- Se sobrepasan los límites permisibles de THD tanto para Corrientes como para Voltajes.

### 4.3 Ejemplo III

El siguiente caso consiste en tomar las lecturas anteriores, pero colocando un Banco de Capacitores para corregir el factor de potencia del bus principal, este mismo se ajustó a 1500 kVAR de compensación, logrando obtener un FP de 90% a 98.5% actualmente.



**Figura 4.7 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 900 y Compensación en el Bus 400**

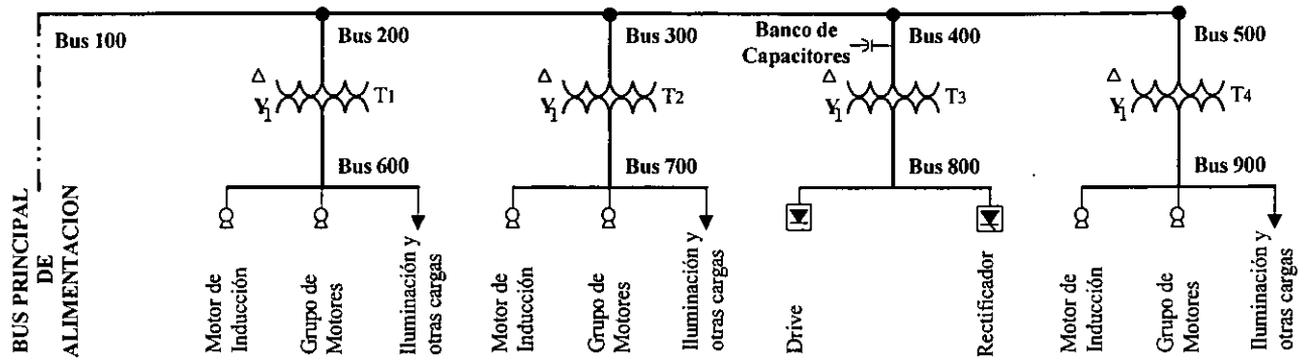
Teniendo las siguientes lecturas:

Bus	Voltaje	$V_{THD} \%$	$V_{RMS} \%$
100	23000	8.879	104.625
200	23000	9.196	104.062
300	23000	9.544	103.701
400	23000	9.924	103.542
500	23000	9.967	103.386
600	480	7.396	100.075
700	480	7.678	99.694
800	480	7.975	99.625
900	480	14.799	102.898

**Tabla 4.11 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.7**

Bus	Voltaje	$I_{THD} \%$	$I_{RMS} \%$	$I_{AMP}$
100 - 200	23000	9.545	100.454	146
200 - 300	23000	14.835	101.094	110
200 - 600	23000 / 480	5.838	100.170	39
300 - 400	23000	24.421	102.939	78
300 - 700	23000 / 480	6.026	100.181	40
400 - 500	23000	10.884	100.591	41
400 - 800	23000 / 480	6.422	100.206	39
500 - 900	23000 / 480	10.884	100.591	41

**Tabla 4.12 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.7**



**Figura 4.8 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 800 y Compensación en el Bus 400**

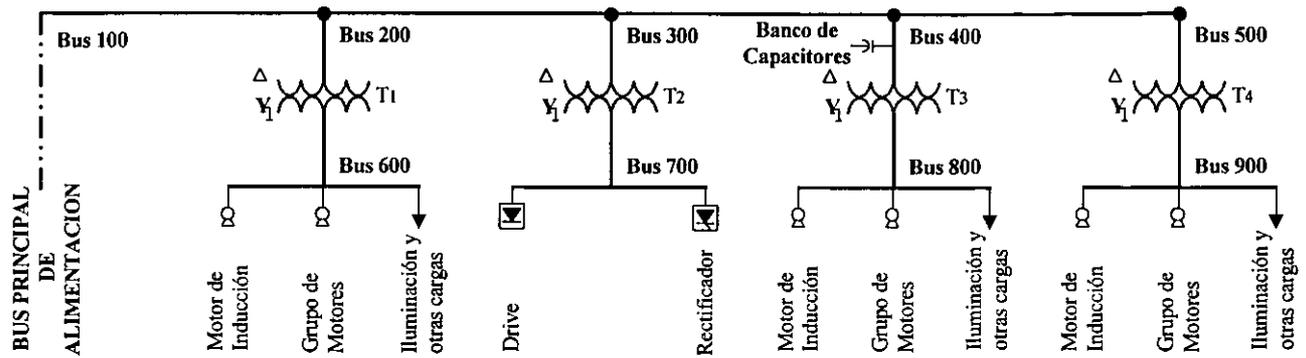
Teniendo las siguientes lecturas

Bus	Voltaje	V <sub>THD</sub> %	V <sub>RMS</sub> %
100	23000	8.880	104.647
200	23000	9.197	104.090
300	23000	9.545	103.733
400	23000	9.924	103.577
500	23000	9.884	103.378
600	480	7.397	100.101
700	480	7.678	99.725
800	480	14.584	103.139
900	480	7.961	99.550

**Tabla 4.13 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.8**

Bus	Voltaje	I <sub>THD</sub> %	I <sub>RMS</sub> %	I <sub>AMP</sub>
100 - 200	23000	9.633	100.463	145
200 - 300	23000	15.023	101.122	109
200 - 600	23000 / 480	5.838	100.170	40
300 - 400	23000	24.866	103.045	77
300 - 700	23000 / 480	6.026	100.181	40
400 - 500	230000	6.213	100.193	40
400 - 800	23000 / 480	11.598	100.659	39
500 - 900	230000 / 480	6.213	100.193	40

**Tabla 4.14 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.8**



**Figura 4.9 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 700 y Compensación en el Bus 400**

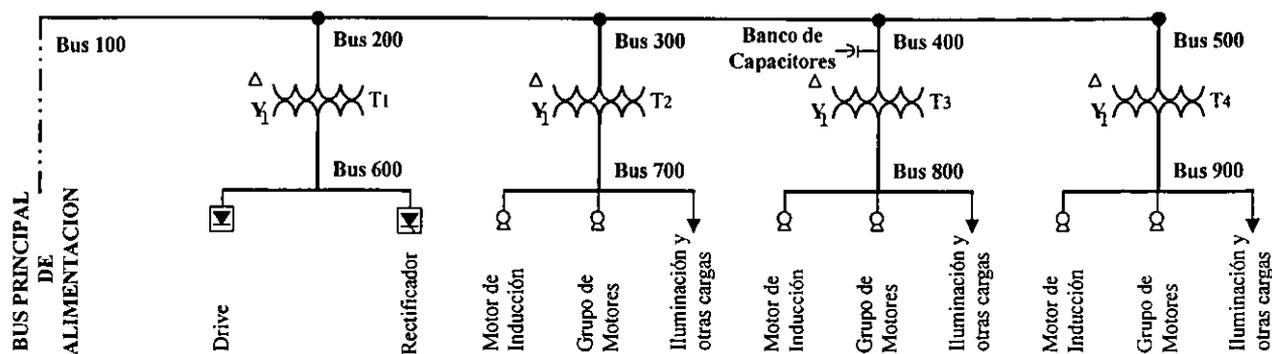
Teniendo las siguientes lecturas:

Bus	Voltaje	V <sub>THD</sub> %	V <sub>RMS</sub> %
100	23000	8.313	104.598
200	23000	8.610	104.035
300	23000	8.936	103.671
400	23000	9.221	103.464
500	23000	9.194	103.266
600	480	6.924	100.066
700	480	14.016	103.182
800	480	7.411	99.574
900	480	7.398	99.265

**Tabla 4.15 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.9**

Bus	Voltaje	I <sub>THD</sub> %	I <sub>RMS</sub> %	I <sub>AMP</sub>
100 - 200	23000	8.964	100.401	145
200 - 300	23000	13.942	100.967	110
200 - 600	23000 / 480	5.470	100.149	39
300 - 400	23000	20.510	102.082	69
300 - 700	23000 / 480	10.919	100.594	41
400 - 500	23000	5.770	100.166	40
400 - 800	23000 / 480	5.964	100.178	39
500 - 900	23000 / 480	5.770	100.166	40

**Tabla 4.16 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.9**



**Figura 4.10 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400**

Teniendo las siguientes lecturas:

Bus	Voltaje	V <sub>THD</sub> %	V <sub>RMS</sub> %
100	23000	7.838	104.582
200	23000	8.118	104.017
300	23000	8.354	103.608
400	23000	8.623	103.398
500	23000	8.597	103.200
600	480	13.532	103.545
700	480	6.721	99.641
800	480	6.930	99.529
900	480	6.917	99.220

**Tabla 4.17 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.10**

Bus	Voltaje	I <sub>THD</sub> %	I <sub>RMS</sub> %	I <sub>AMP</sub>
100 - 200	23000	8.476	100.359	145
200 - 300	23000	10.685	100.569	105
200 - 600	23000 / 480	10.947	100.597	41
300 - 400	23000	19.243	101.835	69
300 - 700	23000 / 480	5.277	100.139	40
400 - 500	23000	5.392	100.145	40
400 - 800	23000 / 480	5.574	100.155	39
500 - 900	23000 / 480	5.392	100.145	40

**Tabla 4.18 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.10**

Después de ver los efectos producidos por la carga No lineal y el Banco de Capacitores instalado en el lado de alta, nos dimos cuenta que:

- Existe una resonancia paralela en todos los buses, siendo la 5ª armónica la de mayor magnitud y la del punto resonante.
- Observamos que existe una resonancia en paralelo en todos los buses del diagrama, lo que va cambiando para cada caso es la magnitud de distorsión armónica tanto para corrientes como para voltajes.
- Para la distorsión armónica total en Voltajes  $V_{THD}$ , observamos que el único punto en donde se dispara este dato es en el bus donde se encuentra conectada la carga No Lineal, para los demás buses existe una magnificación de los voltajes en comparación a la configuración anterior, sin conectar el banco de capacitores.
- Vemos también que la distorsión armónica total THD en corriente, se magnifica en los buses de lado de alta de los transformadores, siendo la de mayor magnitud la que se encuentra entre los buses 300 y 400; esto es para la conexión de la carga No Lineal en cualquiera de las cuatro cargas de los transformadores.

#### 4.4 Ejemplo IV

Ahora intentamos hacer que este punto resonante caiga en una armónica de mayor orden, ( de la 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> en adelante), ya que los efectos producidos por armónicas de este tipo, no causan grandes problemas como la 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> y 11<sup>a</sup>. Para lograr este objetivo sin utilizar filtros de armónicas, ni reactores, se dividirá el Banco de Capacitores en pasos desde el 0 al 100% para determinar en qué paso logramos que la resonancia no sea tan drástica.

El arreglo de la red es el mismo, con el banco de capacitores de 1500 kVAR colocado en el bus 400, pero la carga se mantiene fija en el bus 600. Como se ilustra en la Figura 4.10.

Tuvimos las siguientes lecturas:

FP %	% Pasos	Frec. Armónica Resonante	Bus 100	Bus 200	Bus 300	Bus 400	Bus 500	Bus 600	Bus 700	Bus 800	Bus 900
91.4	1	52 <sup>a</sup>	10.022	10.391	10.615	10.875	10.843	18.892	9.479	8.678	8.663
92.2	10	17 <sup>a</sup>	22.329	23.151	23.944	24.820	24.746	25.616	19.130	19.810	19.775
93.1	20	12 <sup>a</sup>	17.462	18.103	18.675	19.311	19.253	22.825	14.932	15.425	15.398
93.9	30	10 <sup>a</sup>	7.772	8.057	8.441	8.859	8.833	9.283	6.752	7.079	7.066
94.7	40	8 <sup>a</sup>	4.249	4.404	4.619	4.858	4.844	9.844	3.700	3.887	3.880
95.5	50	7 <sup>a</sup>	5.586	5.789	5.989	6.215	6.197	11.599	4.801	4.977	4.969
96.2	60	5 <sup>a</sup>	7.518	7.791	8.075	8.391	8.366	12.035	6.474	6.725	6.709

**Tabla 4.19 Valores de  $V_{THD}$  para la Figura 4.10, aplicando el banco de capacitores por pasos.**

% Pasos							
Bus	1	10	20	30	40	50	60
100-200	2.352	7.093	8.033	4.608	2.922	4.329	5.924
200-300	1.596	9.260	9.784	7.554	5.169	5.933	8.956
200-600	11.973	11.878	11.772	11.668	11.563	11.459	11.356
300-400	2.146	16.358	17.629	12.875	8.678	10.423	15.847
300-700	1.548	4.806	5.375	2.675	1.902	2.793	3.820
400-500	1.537	4.925	5.499	2.763	1.945	2.850	3.920
400-800	1.589	5.091	5.684	2.856	2.010	2.946	4.052
500-900	1.537	4.925	5.499	2.763	1.945	2.850	3.920

**Tabla 4.20 Valores de  $I_{THD}$  para la Figura 4.10, aplicando el banco de capacitores por pasos.**

Después de terminar con este caso, observamos que:

- En las dos tablas anteriores, logramos un Factor de potencia de casi el 95%, sin llegar a la 5ª armónica como punto crítico de resonancia, aunque la resonancia existe no es tan crítica porque se presenta para en la 8ª armónica, y no es tan perjudicial como la 5 o 7ª.
- Otra característica que llama la atención es que precisamente en el 40% de los pasos, existe un punto en el que es tomado como ideal, ya que la Distorsión Armónica Total (THD) aumenta por encima y por debajo del 40% de los pasos del banco de capacitores, podemos decir que este punto es ideal para nuestro caso, es decir, aunque no logramos un factor de potencia muy cercano a la unidad, vemos que el 95% de FP es bueno.

## Memoria de Cálculo

Algunos cálculos que se hicieron para seleccionar el banco de capacitores, fueron los siguientes:

Los datos que a continuación se muestran, fueron tomados del flujo de cargas que el programa SPS nos facilita para cualquier comprobación que se requiera hacer, o algunos ajustes que sean necesarios.

$$P_1 = 5349.440 \text{ kW}$$

$$Q_1 = 2393.020 \text{ kVARs}$$

$$S_1 = 5860.295 \text{ kVA}$$

$$FP_1 = 91.3 \%$$

$$FP = \cos \theta = 91.3$$

$$\theta = \text{Cos}^{-1} (0.913)$$

$$\theta = 24.076^\circ$$

Para obtener un  $FP = 95\%$

Hacemos que:

$$FP_2 = \frac{P_1}{S_2} \therefore S_2 = \frac{P_1}{FP_2}$$

Sustituyendo valores, tenemos:

$$S_2 = \frac{5349.440 \text{ kW}}{0.95} = 5630.9894 \text{ kVA}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \Rightarrow Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_1^2}$$

Sustituyendo valores:

$$Q_2 = \sqrt{(5630.9894 \text{ kVA})^2 - (5349.440 \text{ kW})^2}$$

$$Q_2 = 1758.2758 \text{ kVAR}$$

$$\text{Entonces, } Q_c = Q_1 - Q_2 = 2393.020 - 1758.2758 = \mathbf{634.7441 \text{ kVAR}}$$

Ya tenemos los VAR que necesitamos para compensar el sistema y así lograr un **FP de 95%**.

### 4.5 Ejemplo V

En el siguiente caso, será necesario ver qué ocurre cuando algún cliente instala Bancos de capacitores en el lado de las cargas.

Veremos qué tanto afecta nuestra red de distribución, al igual que la compensación que tenemos en el Bus 400.

Para ello, tomamos las lecturas del FP para cada bus y poder así calcular los kVAR necesarios para lograr un factor de potencia de aproximadamente el 95%.

Nuevamente recurrimos a nuestro programa SPS, específicamente tomamos las lecturas del Flujos de Carga, teniendo los siguientes datos:

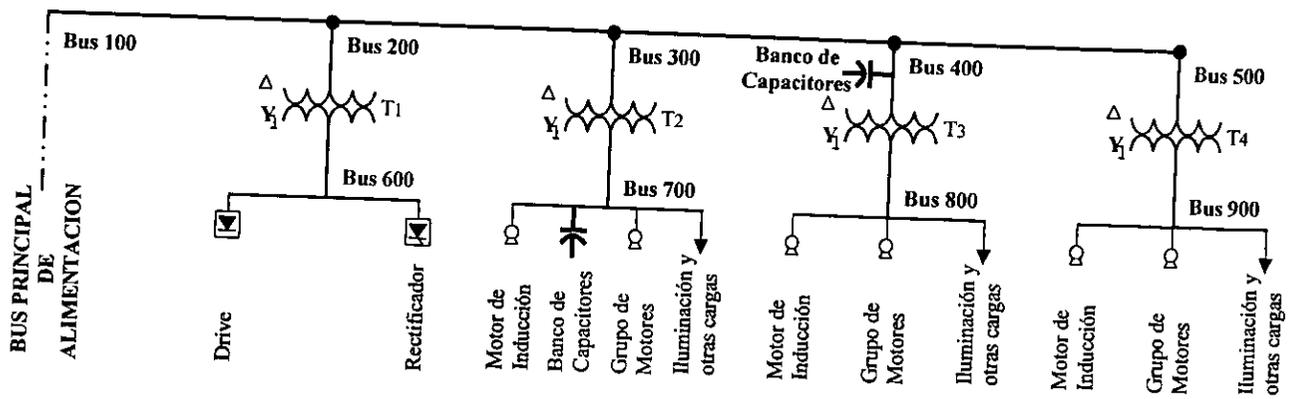
Bus-Bus	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	FP (%)
100-200	5350.154	1775.996	5637.225	94.9
200-300	3886.203	1589.317	4198.631	92.6
200-600	1436.327	155.292	1444.698	99.4
300-400	2579.839	844.000	2714.651	95.0
300-700	1290.842	726.838	1481.407	87.1
400-500	1286.429	726.032	1477.166	87.1
400-800	1286.856	724.943	1477.004	87.1
500-900	1284.476	723.813	1474.375	87.1

**Tabla 4.21 Datos necesarios para la corrección del FP, obtenidos del Flujo de Carga**

Como se ve en la tabla de datos, en los buses 700, 800 y 900 tenemos un FP muy bajo, lo que necesitamos son kVAR para compensar el FP.

Los cálculos correspondientes, se hicieron de acuerdo a la memoria de cálculo anterior.

*Para el **Bus 700, 800 y 900** se necesitan **303.2031 kVAR** para ajustar el FP al 95 %, entonces colocamos un banco de capacitores en este bus, y vemos qué es lo que sucede en los demás buses.*



**Figura 4.11 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400 y Bus 700**

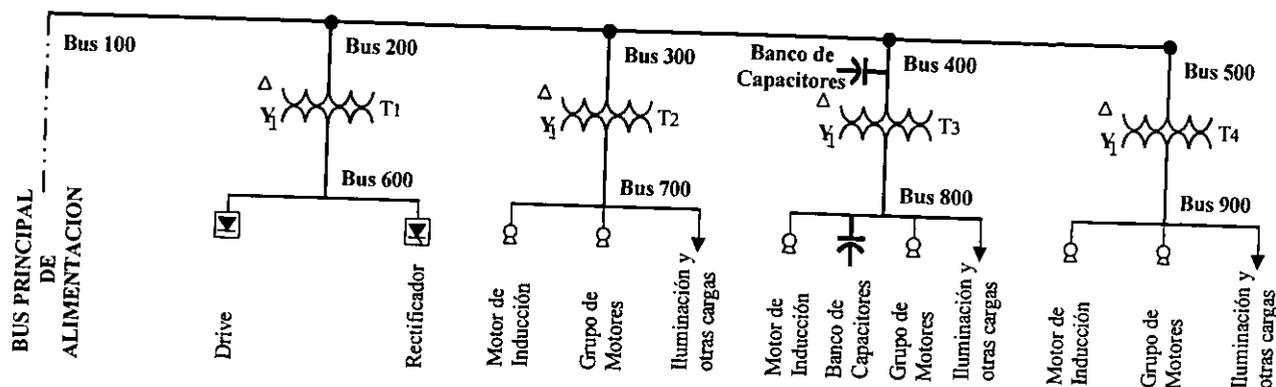
Bus	V <sub>THD</sub>
100	6.481
200	6.716
300	6.955
400	7.155
500	7.134
600	9.907
<b>700</b>	<b>11.356</b>
800	5.731
900	5.721

**Tabla 4.22 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.11**

Bus-Bus	I <sub>THD</sub>	FP
100-200	5.123	96.4
200-300	7.799	94.9
200-600	10.576	99.4
300-400	9.147	95.0
<b>300-700</b>	<b>11.457</b>	<b>94.8</b>
400-500	3.360	87.1
400-800	3.473	87.1
500-900	3.360	87.1

**Tabla 4.23 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.11**

Ahora cambiamos el banco de capacitores hacia el **Bus 800**, teniendo la siguiente configuración



**Figura 4.12 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400 y Bus 800**

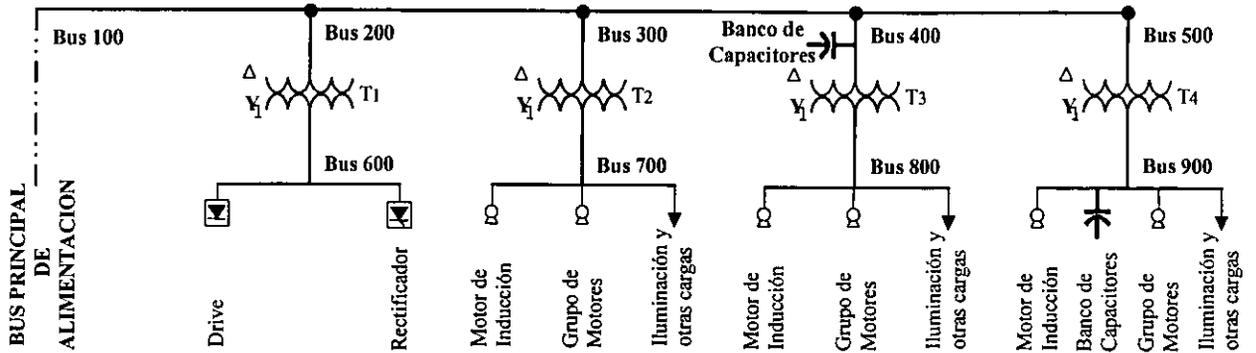
Bus	$V_{THD}$
100	5.950
200	6.165
300	6.385
400	6.631
500	6.611
600	9.585
700	5.120
<b>800</b>	<b>10.588</b>
900	5.303

**Tabla 4.24 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.12**

Bus-Bus	$I_{THD}$	FP
100-200	4.731	96.4
200-300	7.219	94.9
200-600	10.577	99.4
300-400	12.633	97.8
300-700	3.058	87.1
400-500	3.135	87.1
<b>400-800</b>	<b>11.109</b>	<b>94.7</b>
500-900	3.135	87.1

**Tabla 4.25 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.12**

Finalmente para este caso, cambiamos el banco de capacitores a el **Bus 900**, teniendo la siguiente configuración:



**Figura 4.13 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400 y Bus 900**

Bus	$V_{THD}$
100	5.902
200	6.116
300	6.333
400	5.574
500	6.605
600	9.627
700	5.078
800	5.266
<b>900</b>	<b>10.636</b>

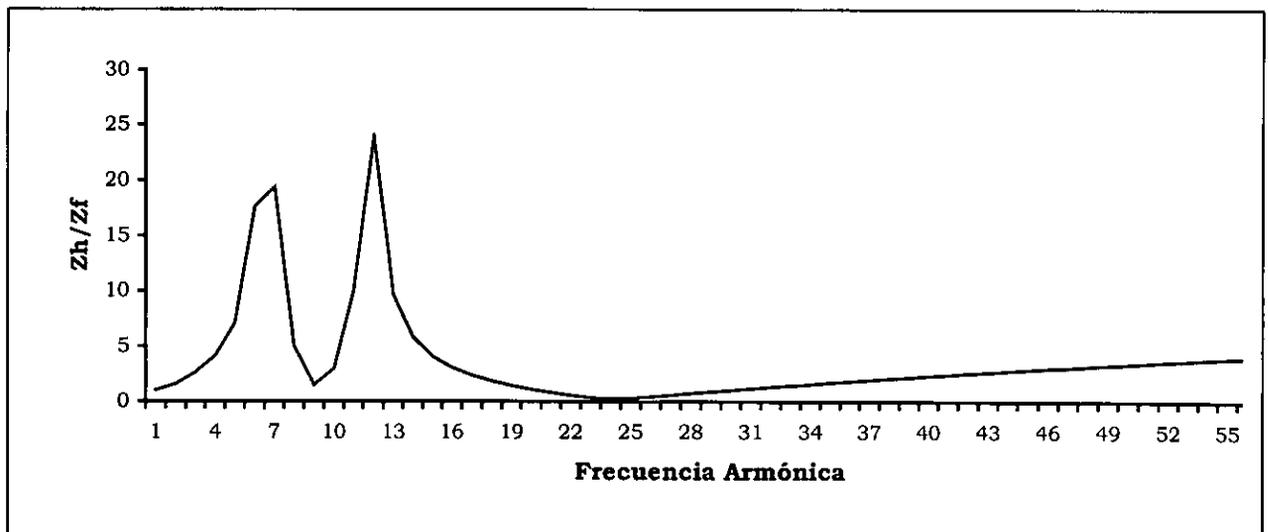
**Tabla 4.26 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.13**

Bus-Bus	$I_{THD}$	FP
100-200	4.684	96.4
200-300	7.121	94.8
200-600	10.578	99.4
300-400	12.457	97.8
300-700	3.027	87.1
400-500	10.924	94.7
400-800	3.207	87.1
<b>500-900</b>	<b>10.924</b>	<b>94.7</b>

**Tabla 4.27 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.13**

Después de hacer estas pruebas se concluyó que:

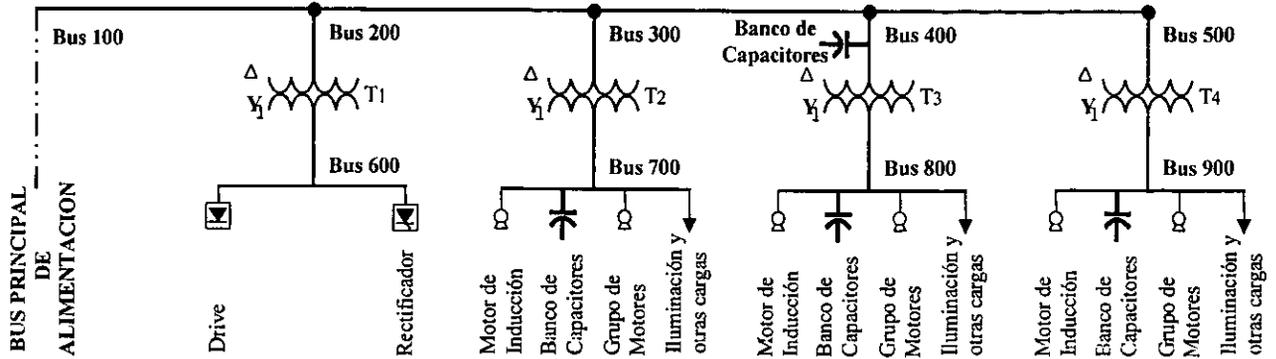
- La  $V_{THD}$  y la  $I_{THD}$  van disminuyendo en todos los buses, conforme el banco de capacitores se coloca mas alejado de la carga No Lineal.
- El FP se mejora en la mayoría de los buses, cuando colocamos el banco de capacitores en el Bus 900.
- La THD, aumenta considerablemente en el bus donde se coloca el banco de capacitores.
- A mayor compensación en un sistema donde exista una carga No Lineal, mayor es la THD.
- Se presentan dos puntos resonantes en la grafica de Impedancia vs. Frecuencia, siendo la 7<sup>a</sup> y 12<sup>a</sup> las frecuencias armónicas resonantes. (ver Figura 4.14)



**Figura 4.14 Resonancia Paralela en la 7ª y 12ª armónica.**

### 4.6 Ejemplo VI

Ahora veremos lo que ocurre con la gráfica cuando colocamos un banco de capacitores en cada uno de los **Buses 700, 800 y 900**.



**Figura 4.15 Colocación de la carga No Lineal en el Bus 600 y Compensación en el Bus 400, 700, 800 y 900**

Aunque logramos obtener un FP en todos los buses de aprox. 95% no pudimos disminuir la THD en los buses, así como se ve en las siguientes tablas de datos:

Bus	$V_{THD}$
100	5.799
200	6.007
300	6.158
400	6.306
500	6.314
<b>600</b>	<b>11.008</b>
700	6.835
800	6.987
900	7.010

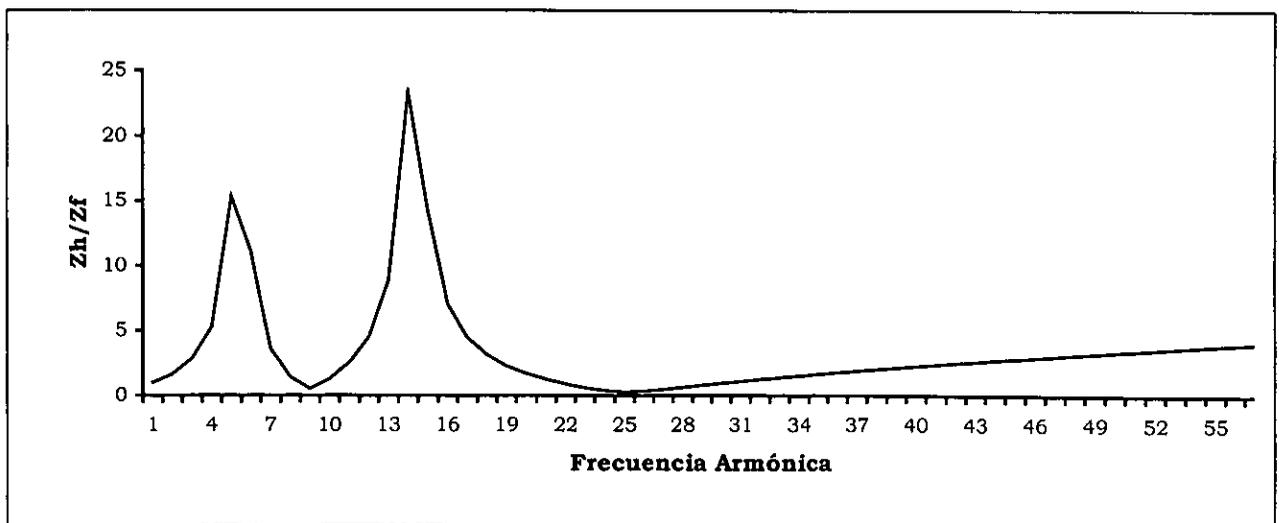
**Tabla 4.28 Índice de Voltajes Armónicos para la Figura 4.15**

Bus-Bus	$I_{THD}$	FP
100-200	6.007	98.6
200-300	6.840	98.3
200-600	10.230	99.4
300-400	9.525	99.5
300-700	3.636	94.8
400-500	3.620	94.7
400-800	3.830	94.8
500-900	3.620	94.7

**Tabla 4.29 Índice de Corrientes Armónicas para la Figura 4.15**

Después de observar las lecturas obtenidas, se concluye lo siguiente:

- Se logró compensar todos los buses con un FP de aprox. 95%
- La resonancia paralela se atenuó en la 5ª y 15ª armónica. (Figura 4.16)
- La  $V_{THD}$  es casi igual para todos los buses, a excepción del bus 600, que es donde se encuentra la carga No Lineal.
- La  $I_{THD}$  es baja para los buses de las cargas Lineales, sin embargo es alta para los buses del lado de alta.
- Con esto comprobamos que es recomendable colocar la compensación en varios puntos para no crear gran distorsión en determinados puntos de la red de distribución y de este modo mantenemos un FP aceptable para cada bus.
- Otra observación, es que debido a que los motores necesitan gran cantidad de corriente para el arranque, se podría decir que la corriente que tomaban de la red, ya venía contaminada por las armónicas ocasionando que en ese bus hubiese también distorsión; pero como el banco de capacitores suministra kVAR entonces ya no es tan necesario que esta carga tome toda la corriente de la red.



**Fig. 4.16 Resonancia Paralela en la 5ª y 15ª armónica**

---

## Conclusiones

---

Para evitar la Resonancia debido a la colocación de capacitores, concluimos lo siguiente:

- Colocando los capacitores directamente a las cargas, se tiende a diluir la capacitancia de los sistemas de distribución. La desventaja es que cada circuito de distribución del sistema de potencia esta sujeto a problemas de frecuencia resonante aislada.
- Las corrientes armónicas se reducen mas debido a la impedancia del transformador, esta consideración se puede hacer si se coloca el banco de capacitores en el primario del transformador. En esta configuración, una baja corriente armónica alcanzará al banco de capacitores, y así aminorará la corriente armónica que producen efectos de calentamiento, y minimizar el potencial debido a los daños ocasionados por la corriente de resonancia armónica.
- La conexión física de los bancos de capacitores juega un papel muy importante en los tipos de armónicas que el banco de capacitores experimenta. Los bancos de capacitores con conexión en estrella con su neutros aterrizados pueden atraer corrientes armónicas triples de secuencia cero. Por esta razón, el neutro del capacitor en sistemas debajo de los 69 kV no deben ser aterrizados, o los capacitores deben ser conectados en Delta. Esta sugerencia para la instalación de los capacitores representa alguna posible solución para evitar problemas de armónicas relacionadas con los bancos de capacitores cuando sirven a cargas No Lineales.
- Una manera de evitar la distorsión armónica y a la vez la resonancia, es verificar que la respuesta en frecuencia de la impedancia del sistema cambie cuando coloquemos o cambiemos el tamaño de los bancos de capacitores y/o su ubicación en la red, o bien instalando filtros de armónicas.
- Como nosotros no podemos prevenir las corrientes armónicas que están siendo inyectadas las soluciones prácticas son incrementar la impedancia de la fuente añadiendo un reactor en línea y suministrando una baja impedancia a la trayectoria de las corrientes armónicas inyectadas.

---

## REFERENCIAS

---

[Acha, 1991]

**"Harmonic Domain Representation of Thyristor Controlled Reactors"**, Acha, E., IEE Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, London, UK, September 17-20, pp. 404-406.

[Acha, Semlyen and Rajakovic, 1990]

**"A harmonic Domain Computational package for Nonlinear Problems and its Application to Electric Arcs"**, Acha, E., Semlyen, A. and Rajakovic. N., IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, July, pp. 1390-1397.

[Aprille y Trick, 1982]

**"A Computer Algorithm to Determine the Steady-State Response on Nonlinear Oscillators"**, Aprille, T.J. and Trick. T.N., IEEE transactions on Circuit Theory, Vol. CT-19, No. 4, july. Pp. 354-360.

[ Arrillaga and Arnold 1991]

**"Computer Analysis of Power Systems"**, Arrillaga, J. and Arnold, C.P, John Wiley & Sons, London.

[Arrillaga, Bradley and Bodger, 1985]

**"Power System Harmonics"**, Arrillaga J., Bradley, John Wiley and Sons.

[ CEI-IEC-555-3 ]

**"Norme Internationale International Standard"**,CEI-IEC-555-3.

[ Comisión Federal de Electricidad ]

**"Sistema Integrado de Planeación del Sector Eléctrico."**, Comisión Federal de Electricidad - Electricidad de Francia, Marzo 1974.

[Diccionario de Términos, 1981]

**"Diccionario de Términos Científicos y Técnicos"**, Mc Graw Hill Boixaren, Vol. 2 y Vol. 5, 1981

[Dustan, 1954 ]

**"Digital Load Flow Studies"**, Dustan, L.A., AIEE Transactions Part III-A, Vol. 73, August, pp. 825-832

- [Dommel, Yan and Wei, 1986]  
**"Harmonics from Transformer Saturation"**, Dommel, H.W., Yan, A. and Wei, S., IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, April, pp. 209-214.
- [El-Abiad and Tarsi, 1967]  
**"Load Flow Solution of Untrapped EHV Networks"**, El-Abiad, A.H Tarsi, D.C., Proceedings of the 5<sup>th</sup> Power Industry Computer Applications Conference, Pittsburgh, USA, pp. 377-384
- [Harker and Arrillaga, 1979]  
**"3-Phase A.C/D.C Load Flow"**, Harker, B.J. and Arrillaga, Proceedings IEE, Vol. 126, No. 12, December, pp. 1275-1281.
- [ IEEE Catalog number 98TP125-0 ]  
 Tutorial on **"Harmonics Modeling and Simulation"**, IEEE Catalog number 98TP125-0.
- [ IEEE 100-1992 ]  
**"Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms (ANSI/IEEE)"**, IEEE Std 100-1992
- [ IEEE 141-1993 ]  
**"Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants."**, IEEE Std. 141-1993, IEEE, Inc., 345 East 47 th Street, New York, NY 10017, USA.
- [ IEEE 519-1992 ]  
**"Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power System."**, IEEE Std. 519-1992, IEEE, Inc., 345 East 47 th Street, New York, NY 10017, USA.
- [Mahmoud and Schultz, 1982]  
**"A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems"**, Mahmoud, A.A. and Schultz, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-101, No. 6, pp. 1815-1824.
- [ Medina R. Aurelio, 1992 ]  
**"Power System Modelling in the Harmonic Domain"**, Medina R. Aurelio, Tesis Doctorado, 1992.
- [ Mendoza S. Julián, 1994 ]  
**"Reducción de Distorsiones Armónicas Aplicando Mediciones de Control en la Red de M.T y B.T."**, Mendoza Solano J. Julián, Tesis Licenciatura, 1994.

- [ Mino A. Gerardo. 1999 ]  
**“Simulación de un Filtro Activo para compresión de Potencia Reactiva y Supresión de Corrientes Armónicas en las Fases y en el Neutro de un Sistema Trifásico Desbalanceado de 4 Hilos.”**, Mino Aguilar Gerardo, Tesis Maestría, 1999.
- [ NEPLAN ]  
**“Tutorial de Simulación por Computadora”**, NEPLAN
- [ RTC ]  
**“Guía Rápida para Corregir el Factor de Potencia.”**, RTC.
- [Roark and Gross, 1978]  
**“Unbalanced Synchronous Machine Analysis Using Frequency Domain Methods”**, Roark, J.D. and Gross, C.A., A paper presented at the IEEE/PES Summer power Meeting 1978, Los Angeles, CA. Paper 78 SM 524-1.
- [Semlyen, Eggleston and Arrillaga, 1987]  
**“Admittance Matrix Model of a Synchronous Machine for Harmonic Analysis”**, Semlyem, A., Eggleston, J.F. and Arrillaga, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 4, November, pp. 833-840.
- [ S. Key and Jih-Sheng ]  
**“Comparason of Standards and Power Supply design Options for Limiting Harmonics in Power System”**., S. Key Thomas, Senior Member, IEEE, and Jih-Sheng Lai., IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 21, No. 4, July/August 1993.
- [Silva Farias J. Luis, 1989]  
**“Metodología para el Análisis de Sistemas Eléctricos a Frecuencias Armónicas”**, Silva Farias J. Luis, Tesis Maestría, 1989.
- [ SKM Systems Analysis ]  
**“Harmonics Investigation for Wave Analysis and Voltage Evaluation.”**, SKM Systems Analysis, Inc.
- [ Software for Power Systems ]  
**“Software for Power Systems”**, Reference Manual of Electrical Engineering.
- [Usaola y Mayordomo, 1990]  
**“Fast Steady-State Technique for Harmonic Análisis”**, Usaola, J. and Mayordomo, J.G., IEEE/ICHPS IV Fourth International Conference on Harmonic in Power Systems, Budapest, Hungary, October 4-6, pp. 336-342.

- [ Velázquez, Sarmiento y De la Rosa, 1991 ]  
**“Análisis, Medición y Control de Armónicas en Redes de Distribución”**, Velázquez S. Raúl, Sarmiento U. Héctor, De la Rosa C. Francisco, DP-91-DIS-28, Acapulco, Gro. Julio 1991.
- [ Velázquez S. Raúl ]  
**“Metodología para la predicción y solución de la distorsión armónica en las Redes de Distribución.”**, Dr. Raúl Velásquez Sánchez. Boletín IIE, marzo/abril de 1994.
- [ Waller Mark ]  
**“Harmonics”**, Waller Mark, Prompt 1ª. Edición.
- [Xia and Heydt, 1982 ]  
**“Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution”**, Xia, D. and Heydt, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-101, No. 6, June, pp. 1257-1265.
- [Xu, Marti y Dommel, 1991]  
**“A Multiphase harmonic Load Flow Solution Techinque”**, Xu, W., Marti, J.R. and Dommel, H.W., IEEE transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, February, pp. 174-182.
- [Yacamini and de Oliveira, 1980]  
**“Harmonics in Múltiple Convertors Systems: A Generalized Approach”**, Yacamini, R. and Oliveira, J.C., Proceedings IEE Part B, Vol. 127, No. 2, March, pp. 96-104.

### **PÁGINAS WEB:**

<http://franjagol.tripod.cl/corrientesarmonicas/>  
<http://members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/armonicos2.htm>  
<http://www.activefilter.com>  
<http://www.dranetz.com>  
<http://www.eie.ucr.ac.cr>  
<http://www.ieee.org>  
<http://www.inelap.com.mx>  
[http://www.leyden.com.ar/filtros\\_de\\_armonicas\\_mt.htm](http://www.leyden.com.ar/filtros_de_armonicas_mt.htm)  
<http://www.powerquality.com>

---

## ANEXO A

---

### 1.- Principio de la Simulación.

Se suponen  $n$  variables aleatorias independientes:

$$V_1, V_2, \dots, V_n$$

Cuyas funciones de distribución se conocen; el problema es calcular :

$$V = f(V_1, V_2, \dots, V_n)$$

$f$  cualquier función y  $V$  es una variable aleatoria para la que se busca su distribución, por ejemplo si:

$$V_1 = \begin{cases} 1 & \text{en la probabilidad } P_1 \\ 0 & \text{en la probabilidad } 1 - P_1 \end{cases}$$
$$V_2 = \begin{cases} 1 & \text{en la probabilidad } P_2 \\ 0 & \text{en la probabilidad } 1 - P_2 \end{cases}$$

Y tendrá como valores:

$f(0,0)$  con la probabilidad  $(1-P_1)(1-P_2)$   
 $f(1,0)$  con la probabilidad  $P_1(1-P_2)$   
 $f(0,1)$  con la probabilidad  $(1-P_1)P_2$   
 $f(1,1)$  con la probabilidad  $P_1P_2$

Se ve que si se tiene  $n$  variables,  $V$  tendrá  $2^n$  valores posibles, que son laboriosos de calcular si  $n$  es grande y si el cálculo de  $f$  es difícil.

Para estimar  $V$  hay dos posibilidades:

- Seleccionar los casos más característicos para el cálculo de  $f$ , pero es muy difícil encontrar un criterio adecuado.
- Efectuar la simulación, es decir, generar un gran número de valores aleatorios, para cada variable  $V_i$  y calcular la función  $f$ . Esta manera de proceder es muy flexible y permite tomar en cuenta un gran número de variables de cualquier ley.

**Número de Simulaciones y Precisión de resultados.**

Se desea en el caso del cálculo de la falla en un sistema, estimar el número mínimo de ciclos de simulación por realizar para que, con una probabilidad superior a 90%, el error relativo sobre la estimación de esta probabilidad sea inferior a un nivel fijo de antemano.

Sean:

- P la probabilidad de falla en el sistema.
- N el número de ciclos efectuados.
- X el número de ciclos que tuvieron falla.

$\Pi = \frac{X}{N}$  es una variable aleatoria binomial que puede aproximarse por una ley

normal para N grande, y cuya esperanza matemática p y desviación estándar  $\sigma = \sqrt{\frac{P(1-p)}{N}}$

Se requiere que:  $\text{Prob}\{ |\Pi - p| < \alpha \} > 0.9$

Es decir:  $1.65 \alpha < p$

De donde:  $N > (1.65)^2 \frac{1}{\alpha^2} \frac{1-p}{p}$

En el cuadro siguiente, se da algunos valores de p y  $\alpha$ , el número mínimo de ciclos que debe realizarse para que, con una probabilidad superior a 90%, el error relativo sobre la estimación de p sea inferior a  $\alpha$ .

<b>P/α</b>	<b>1/1000</b>	<b>1/100</b>	<b>5/100</b>	<b>1/10</b>	<b>2/10</b>	<b>3/10</b>
<b>5%</b>	1 090 000	109 000	21 000	9 700	4 400	2 500
<b>10%</b>	272 000	27 200	5 200	2 500	1 100	620
<b>20%</b>	68 000	6 800	1 300	620	270	160

Esta tabla muestra para qué valores de probabilidad de falla de 10 a 30% que se obtienen generalmente para el consumo de pico se tiene buenos resultados con 1000 ciclos. Pero al contrario para probabilidades de algunos por cientos, es necesario 10, 000 ciclos para llegar a la misma precisión.

### 3. Simulación de una Distribución Binomial.

Para simular una distribución binomial se utiliza un generador de números aleatorios uniformes entre 0 y 1.

Sea una variable binomial  $\mathbf{V}$

con valor ...  $\begin{cases} 1 \text{ en la probabilidad } P \\ 0 \text{ en la probabilidad } 1 - P \end{cases}$

Se da un intervalo de magnitud  $p$ ,  $k + p$ , con  $k + p \leq 1$  y  $k \geq 0$ .

Se genera un número  $l$  de manera que  $0 \leq l \leq 1$ .

Si  $k \leq l \leq k + p$  se dice que el valor de  $\mathbf{V}$  es 1, en el caso contrario, el valor de  $\mathbf{V}$  es 0.

Si se han generado de forma uniforme  $N$  valores de  $\mathbf{V}$  y se han encontrado:

$\mathbf{r}$  valores 1 de  $\mathbf{V}$   
 $N - \mathbf{r}$  valores 0 de  $\mathbf{V}$ ,

Entonces, si  $N$  es bastante grande,  $p = \mathbf{r}/N$

## ANEXO B

<b>Bus Principal de Alimentación</b>				
Voltaje	Isc	MVA	Frec.	Isc/I <sub>L</sub>
230000 V	3500 A	6	60	23.23

<b>Transformadores</b>							
Capacidad	% Z	X/R	% Z <sub>tol</sub>	Voltajes		Tap's	
				Pri	Sec	Pri	Sec
1500 kVA	7	15	10	230000	480	1.000	1.000

<b>Motor de Inducción</b>								
Corriendo		Arrancando		Modelo de Arranque	Eff. %	Desplaz.%	TST %	Carga %
650 kVA	FP=90%	3600 kVA	FP = 20%	Z	98	1	100	100

<b>Grupo de Motores</b>								
Corriendo		Arrancando		Modelo de Arranque	Eff. %	Desplaz.%	TST %	Carga %
100 kVA	FP=90%	500 kVA	FP = 20%	Z	98	1	100	100

<b>Iluminación y otras cargas</b>			
kVA	FP %	Conex. Carga	% Carga
750	90	abc	100

<b>Drive</b>						
KVA	Kwatts PDO	Pulsos	X <sub>C</sub> PU	Grados del Trf.	Angulo	Grados Cubiertos
668	601	6	2.6	0	0	10.779

<b>Rectificador</b>					
KVA	% Carga	Amp. Base	I <sub>Fund.</sub>	Grados I <sub>Fund.</sub>	Puente de Diodos
832	100	1000	100	0	6 Pulsos

<b>Banco de Capacitores</b>	
KVAR Totales	Total de Pasos
1500	100 %

---

## DEFINICIONES

---

- **Armónica:** Componente senoidal de una onda periódica que tiene una frecuencia que un múltiplo de la frecuencia fundamental.
- **Cogging:** Desbastador
- **Conmutación:** La transferencia de corriente entre el tiristor ( o diodo) y los elementos que conducen.
- **Convertidor:** Equipo que cambia la energía de una forma a otra.
- **Damping:** Amortiguamiento.
- **Damper:** Diodo Amortiguador.
- **Damper winding:** Devanado Amortiguador.
- **Desplazamiento Eléctrico:** la intensidad del campo eléctrico multiplicado por la permitividad. Símbolo D. Denominado también desplazamiento Dieléctrico.
- **Factor de Potencia, Desplazamiento:** Esta componente está en proporción con la potencia Activa y la potencia Aparente.
- **Filtro Serie:** Este tipo de filtro reduce armónicas se utiliza como una alta impedancia en serie entre la fuente de armónicas y el sistema que se quiere proteger.
- **Filtro en Derivación/Paralelo:** Este tipo de filtro reduce armónicas, provee un camino de baja impedancia desviando las armónicas a tierra.
- **Filtro Sintonizado:** Un filtro generalmente consiste en una combinación de capacitores, inductancias y resistencias que son seleccionados para servir de camino a las armónicas con una baja impedancia y se sintoniza a una o mas frecuencias.
- **FP:** Factor de Potencia ( $\cos \theta$ )
- **IT Producto:** La influencia Inductiva expresada en términos de el productos es la raíz cuadrada de la magnitud de la corriente (I), en amperes, de acuerdo al factor de influencia telefónica (TIF)

- **Lumped Impedance:** Impedancia Concentrada.
- **Muesca, Profundidad:** La profundidad promedio del voltaje de muesca, de la onda del voltaje senoidal.
- **Muesca, Área:** El área del voltaje de muesca. Este es el producto de la profundidad promedio, en volts, con el ancho de la muesca en microsegundos.
- **MVA<sub>cc</sub> :** Potencia Aparente de Cortocircuito.
- **No Lineal, Carga:** Es una carga que dibuja una onda de corriente de no senoidal cuando se le suministra voltaje senoidal.
- **Notch, Voltaje:** Voltaje de Hendidura o Muesca.
- **Notch Filter:** Filtro de respuesta en hendidura.
- **PCC:** Punto Común de Acoplamiento
- **Proporción de Cortocircuito:** Es la proporción de la capacidad de cortocircuito del bus, en MVA, en el punto donde se conecta la carga.
- **Parpadeo, Efecto (Flicker Effect):** Variaciones casuales en la corriente de salida de un tubo electrónico que posee un cátodo revestido de óxido, debidas a modificaciones circunstanciales de la emisión catódica.
- **Piel, Efecto:** Tendencia de las corrientes de AC a fluir cerca de la superficie de un conductor, quedando así restringido a una pequeña parte transversal total introduciendo el efecto de aumentar la resistencia. Denominado también Efecto Peculiar Kelvin.
- **Proximidad, Efecto:** Redistribución de corriente en un conductor, debido a la presencia de otro conductor portador de corriente.
- **pu :** Valores en por Unidad.
- **SCR:** (*Short Circuit Ratio*) Proporción de Cortocircuito.
- **SPS :** Software for Power Systems.
- **THD I:** Distorsión armónica Total en Corriente.
- **THD V:** Distorsión armónica Total en Voltaje.
- **TIF :** Factor de Influencia Telefónica