



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
“ARAGÓN”

ATENUACIÓN DE ARMONICÓS EN EL CENTRO
DE CÓMPUTO DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ARAGÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO
AREA: ELÉCTRICA - ELECTRÓNICA

PRESENTA:

FAUSTINO RODRÍGUEZ SOSA

ASESOR:

M. EN I. DAVID FRANCO MARTÍNEZ

SAN JUAN DE ARAGÓN EDO. MÉXICO, MARZO DE 2008

AGRADECIMIENTOS:

“Una nueva vida un nuevo destino”

Con todo cariño dedico este trabajo a mi hijo Amaury Xavier por ser lo más importante de mi vida ya que una sola de sus sonrisas, un gesto o un abrazo, me da la mayor felicidad del mundo.

“El hombre en la tierra no se hace necesario al hombre sino por el amor”

A mis padres y hermanos ya que con su ejemplo de tenacidad, sacrificio, confianza y amor incondicional me han impulsado para lograr asentar una página en la historia del tiempo.

A la familia Crispín Martínez que siempre me han considerado un hermano y un amigo. Con mi mayor agradecimiento a la mamá de mi hijo: Ma. de Jesús.

A la familia Enríquez García por su amistad, confianza y tratarme como un integrante más. A mi gran amigo Vicente por su compañía y consejos durante tantos años.

A mis amigos de toda la vida por su valiosa cooperación y apoyo: Áurea, Alline, Maritza, Xochitl, Yolo y Víctor.

A mis “hermanos” del centro tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores Aragón: M en I. David Franco Martínez (Asesor), Ing. Israel Martínez, Ing. Juan Carlos Hernández, por la paciencia, cooperación y seguimiento para la culminación de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de la Universidad Autónoma Metropolitana, Dirección de Obras de Rectoría General, Unidad Cuajimalpa, Unidad Azcapotzalco, Unidad Iztapalapa, Unidad Xochimilco: Arq. Aristeo Angulo, Arq. Antonia Castillo, Mtro. Luis Antonio Torres, Arq. Rogelio Sambrano, Dr. Salvador Cisneros, Arq. Vicente Sanchez, Lic. Lizbeth, Lic. Adan, Mary paz Uribe, Araceli Favila, Ana Alvarez, Antonia Tessna, Ana Luisa, M en C. Iliana Flores, Ing. Víctor Hugo López, Dra. Norma Borrego, Lic. Margarita Ibarra, Arq. Luis Manuel Anaya, Dr. Eduardo Galicia, Lic. Mónica Speare, Ing. Ignacio Juárez, Arq. Humberto Montes de Oca, Ing. Guillermo Ibarra, Ing. Anastasio Hernandez, Ing. Francisco Rodriguez, Arq. Fernando, Arq. Javier, Ing. Mónica Lucia, Arq. Gilberto Luke, Ing. Darío Solano, Ing. José Luis Razo. Por ser amigos valiosos y ayudarme a ser mejor profesionista.

A mis amigos del Pentatlón Deportivo Militarizado Universitario: Enrique, Felipe, Norberto, Edgar, Carlos, Jorge, Raúl, Martín, Víctor, Jesús, Alejandro, Prof. Fernando, Lic. Lázaro, Lic. Pedro Iván, Ing. Jair, Brenda, Maribel, Ing. Bella y Dra. Lindy. Por ser amigos incondicionales y para siempre.

A mi maestro de artes marciales Pedro Mancilla por enseñarme el valor de la lealtad, el sentido del honor y un mejor conocimiento de mis capacidades, virtudes y defectos.

A mis amigos de la Policía Judicial sexta generación del I.F.P. de la P.G.J.D.F.: Dra. Blanca Solano, Dr. Omar Cornejo, Lic. Josué Taiwán, Lic. Juanita Yalin. Que día a día arriesgan el bien más preciado: la vida, por la integridad y seguridad de las personas de esta ciudad.

A todas aquellas personas importantes de mi vida que no menciono pero que siempre están ahí como huella indeleble, con fidelidad de sombra que jamás traiciona.

Vislumbra mejor la finalidad de tu existencia de la misma forma que el artista trata de plasmar las sinfonías que surgen de los bosques o las que del desierto se levantan o emergen de las gargantas abismales batidas por los torrentes, las voces de la tempestad, el alegre de la brisa, el contrapunto de los oleajes, las arias de las aguas serenas, los humos petrificados de los peñascales que se lanzan hacia el cielo, y cuando como el, esto logres percibir comprenderás que tu vida no carece de sentido.

Punto XLI del Ideario Pentathlonico

ÍNDICE

		PÁGINA
	INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	CONCEPTOS DE CORRIENTE ALTERNA	4
1.1	CONCEPTOS BÁSICOS	4
1.1.1	POTENCIA ACTIVA	4
1.1.2	POTENCIA REACTIVA	4
1.1.3	POTENCIA APARENTE	4
1.1.4	REPRESENTACIÓN GRÁFICA	4
1.1.5	DIAGRAMA DE CORRIENTE	5
1.2	FACTOR DE POTENCIA	6
1.2.1	PROBLEMAS CON UN FACTOR DE POTENCIA BAJO	6
1.2.2	PERDIDAS EN LOS CABLES	7
1.2.3	APLICACIÓN DE LOS CAPACITORES	8
1.2.4	EJEMPLO DE LA APLICACIÓN DE CAPACITORES	9
1.3	CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA	13
1.3.1	PRINCIPIO DE COMPENSACIÓN	14
1.3.2	MÉTODO NUMÉRICO DE CÁLCULO	16
1.3.3	MÉTODO GRÁFICO DE CÁLCULO	18
1.3.4	EL MÉTODO A BASE DE TABLAS PARA EL CÁLCULO	19
1.4	CONEXIÓN TRIFÁSICA ESTRELLA-ESTRELLA	22
1.4.1	SECUENCIA DE FASE POSITIVA Y NEGATIVA	23
1.4.2	CARGA TRIFÁSICA CONECTADA EN ESTRELLA	24
1.4.3	SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO CONECTADO EN Y-Y	25
1.5	CONEXIÓN TRIFÁSICA DELTA	28
CAPÍTULO II	CALIDAD DE LA ENERGÍA	
2.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS RELACIONADOS CON EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	33
2.2	¿QUÉ ES LA CALIDAD DE LA ENERGÍA?	35
2.3	FUENTES DE DISTURBIOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN	35
2.3.1	FLUCTUACIONES DE VOLTAJE	35
2.3.2	SOBRETENSIONES TRANSITORIAS	36
2.3.3	INTERRUPCIONES DE ENERGÍA	37
2.3.4	RUIDO ELÉCTRICO (INTERFERENCIA)	37
2.3.5	ARMÓNICAS	38
2.4	¿CÓMO AFECTA LA CALIDAD DE LA ENERGÍA LA OPERACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO?	39
2.4.1	CONSIDERACIONES SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	39
2.4.2	LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA AL USUARIO	40
2.4.3	LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA Y EL EFECTO DE LA CONEXIÓN A TIERRA	40
2.4.4	CONEXIÓN A TIERRA	41

2.4.5	CONEXIÓN A TIERRA EFECTIVA	42
2.4.6	LOS COSTOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE CALIDAD DE LA ENERGÍA	43
2.4.7	FRECUENCIA RELATIVA CON QUE SE PRESENTAN LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA	44
2.4.8	PROTECCIÓN CONTRA FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LAS EMPRESAS SUMINISTRADORAS	46
2.4.9	TÉCNICAS DE ATENUACIÓN DE LOS PROBLEMAS EN LA CALIDAD DEL SUMINISTRO	46
2.4.10	LOS CIRCUITOS DEDICADOS	47
2.4.11	ALGUNOS CONSEJOS Y PRECAUCIONES	47
2.4.12	EL EQUIPO ATENUADOR DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA	47
2.5	EL PROBLEMA GENERAL DE LAS VARIACIONES DE VOLTAJE, LAS ARMONICAS Y LOS TRANSITORIOS	48
2.6	TIPOS DE PERTURBACIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	48
2.6.1	TRANSITORIOS (CAMBIOS REPENTINOS EN LAS CONDICIONES DE LARED)	48
2.6.1.1	IMPULSO	48
2.6.1.2	OSCILATORIOS	48
2.6.1.3	INTERRUPCIONES SOSTENIDAS	49
2.6.1.4	DESBALANCE DE VOLTAJE	50
2.6.2	DISTORSIÓN EN LA FORMA DE ONDA	50
2.6.2.1	COMPONENTE DE CD	50
2.6.2.2	ARMÓNICAS	50
2.6.2.3	NOTCHING	50
2.6.2.4	RUIDO	50
2.6.3	FLUCTUACIONES DE VOLTAJE	51
2.6.4	VARIACIONES EN LA FRECUENCIA	51
2.7	EL ESTUDIO DE LAS VARIACIONES DE VOLTAJE	51
2.8	DEFINICIONES Y CARACTERÍSTICAS	52
2.8.1	FUENTES DE DISTURBIOS	53
2.8.2	FALLAS EN EL SISTEMA	53
2.8.3	CONEXIÓN DE CARGAS GRANDES	54
2.9	OTROS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL SERVICIO	55
2.9.1	VARIACIONES DE VOLTAJE DE LARGA DURACIÓN	55
2.9.2	LA PRESENCIA DE ARMÓNICAS	55
2.9.3	LOS TRANSITORIOS OSCILATORIOS	58
2.9.4	TRANSITORIOS DE IMPULSO POR RAYO	58
2.9.5	EL EFECTO DE PARPADEO (FLICKER)	58
2.10	UPS FUENTES DE ENERGÍA ININTERRUMPIBLE (UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY)	58
2.10.1	UPS ESTÁTICO	58
2.10.2	PARTES QUE COMPONEN A LOS UPS	59
2.10.2.1	UPS ON LINE	59
2.10.2.2	UPS OFF LINE	59
2.10.2.3	UPS DE LÍNEA INTERACTIVA	59

2.10.3	CONSIDERACIONES PARA ESPECIFICAR UN UPS	60
2.10.3.1	REDUNDANCIA O NO DE LOS SISTEMAS	60
2.10.3.2	SWITCH DE BY-PASS	60
2.10.3.3	SELECCIÓN DE BATERÍAS	60
2.10.4	INCONVENIENTES DE LOS UPS	60
CAPÍTULO III	FUENTES ARMÓNICAS Y SUS EFECTOS	61
3.1	FUENTES ARMONICAS	61
3.1.1	FUENTES TRADICIONALES DE ARMÓNICAS	63
3.1.2	TRANSFORMADORES	63
3.1.3	MÁQUINAS ROTATORIAS	64
3.1.4	HORNOS DE ARCO	64
3.1.5	LÁMPARAS FLUORESCENTES	64
3.1.6	NUEVAS FUENTES DE ARMÓNICAS	66
3.1.7	FUTURAS FUENTES DE ARMÓNICAS	66
3.2	NORMATIVIDAD SOBRE EL PROBLEMA DE ARMÓNICAS	66
3.2.1	FILOSOFÍA DE LA NORMA IEEE-519	67
3.2.2	LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE	68
3.2.3	LÍMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJE	69
3.3	EFECTO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA	70
3.3.1	IMPACTO SOBRE LOS BANCOS DE CAPACITORES	70
3.3.2	CONDICIONES RESONANTES	70
3.3.2.1	FLUJOS NORMALES DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS	71
3.3.2.2	RESONANCIA PARALELO	74
3.3.2.3	RESONANCIA SERIE	76
3.3.2.4	RAZÓN DE CORTO CIRCUITO	80
3.3.3	EFECTO EN TRANSFORMADORES	80
3.3.3.1	PÉRDIDAS SIN CARGA O DE NÚCLEO	80
3.3.3.2	PÉRDIDAS I^2R	81
3.3.3.3	PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY	81
3.3.3.4	PÉRDIDAS ADICIONALES	81
3.3.4	EFECTO EN EL NEUTRO	83
3.3.5	EFECTO EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	84
3.3.6	EFECTOS EN OTROS EQUIPOS	85
3.3.7	CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS TÍPICOS	85
3.3.8	ASPECTOS QUE REDUCEN LA POSIBILIDAD DE FALLA EN CAPACITORES	86
CAPÍTULO IV	CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA	88
4.1	LA IMPEDANCIA DEL SISTEMA	88
4.2	LA IMPEDANCIA DEL CAPACITOR	89
4.3	DISPOSITIVOS PARA FILTRAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA	91
4.4	TÉCNICAS PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICAS	91
4.4.1	REDUCIR LA APORTACIÓN DE CORRIENTES	91

	ARMÓNICAS	
4.4.2	UTILIZANDO FILTROS SINTONIZADOS	92
4.4.3	MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA A LA FRECUENCIA	92
4.5	FILTROS ACTIVOS	93
4.6	FILTROS PASIVOS	94
4.6.1	FILTRO SINTONIZADO	95
4.6.2	FILTRO PASA ALTAS	95
4.7	CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS CON ARMÓNICAS	99
4.7.1	CONSIDERACIONES PRÁCTICAS EN LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	101
4.7.2	PROTECCIONES PARA LOS FILTROS	108
4.8	MEDIDAS CORRECTIVAS	109
4.8.1	FILTROS DE CHOQUE O DE RECHAZO	110
4.8.2	FILTROS DE ABSORCIÓN	110
4.8.3	BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS DE SECUENCIA CERO CON TRANSFORMADORES ESTRELLA-DELTA	113
4.8.4	BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS CON TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO	114
4.8.5	BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS DE SECUENCIA CERO CON TRANSFORMADORES SIG-SAG	114
4.8.6	BLOQUEO DE 5TA Y 7MA ARMÓNICA	115
CAPITULO V	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	117
5.1	METODOLOGÍA PARA LA ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS	119
5.2	ELABORACIÓN DE LEVANTAMIENTO	120
5.3	CUMPLIMIENTO DE LA INSTALACIÓN CON RESPECTO A LA NOM-001-SEDE-2005	120
5.4	CONEXIÓN DE EQUIPO PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA	121
5.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	122
5.6	APLICACIÓN DE LAS DIFERENTES NORMAS A LOS RESULTADOS OBTENIDOS	123
5.7	CORRECCIÓN DEL DISTURBIO	125
5.7.1	CÁLCULO PARA LA SECCIÓN DE LA 5TA ARMÓNICA	128
5.7.2	CÁLCULO PARA LA SECCIÓN DE LA 7MA ARMÓNICA	131
	CONCLUSIONES	134
	APENDICE A	136
	APENDICE B	148
	BIBLIOGRAFÍA	156

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tema de calidad de la energía eléctrica es de primordial importancia, debido al aumento de cargas eléctricas no lineales, tales como computadoras, balastos electrónicos y prácticamente cualquier dispositivo que utilice electrónica de potencia. Este tipo de cargas es muy común en grandes edificios de oficinas, universidades y la industria en general.

Las cargas no lineales producen corrientes y voltajes armónicos que distorsionan la forma de onda fundamental de 60 Hz, dichos disturbios es una pequeña parte del campo de estudio de la calidad de la energía.

En la presente investigación se tomo como ejemplo práctico para la atenuación de armónicos, el centro de computo de la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Por ser un lugar con grandes cargas lineales dadas por computadoras y balastos electrónicos para el alumbrado general.

Para determinar las características del sistema eléctrico en el centro de computo, se utilizó un analizador de redes eléctricas que da los resultados gráficos y en base a un análisis de estos, se puede determinar los parámetros para reducir los problemas de calidad de la energía y con ello la atenuación de armónicos que es el principal objetivo de esta tesis.

Existen muchos factores que intervienen para una buena calidad de la energía, es por esto que se aborda en cada capítulo una parte relacionada con dicho tema para un mejor entendimiento de las armónicas, sus consecuencias y la forma de disminuirlas.

El capítulo I, contiene información de conceptos básicos que se utilizan en corriente alterna y es de gran ayuda para entender como se realiza el cálculo de factor de potencia y la aplicación de los capacitores para la corrección del mismo, así como la utilización del método gráfico y el método a base de tablas para la selección del capacitor. Ya que un buen factor de potencia nos garantiza en mejor funcionamiento de nuestro sistema eléctrico.

Un problema común que se presenta en los sistemas eléctricos industriales, es el bajo factor de potencia, este problema está relacionado con la calidad del suministro de la energía eléctrica y/o por el tipo de cargas inductivas de los usuarios. Por supuesto que alrededor de esto se tiene implicaciones económicas importantes ya que un bajo factor de potencia nos traerá como consecuencias un mal funcionamiento de los equipos ya que se tendrá que aumentar la corriente necesaria para hacer funcionar los motores, los cables se sobrecargan y los interruptores termomagnéticos se accionan, además de las multas que impone compañía de luz por un bajo factor de potencia.

En el capítulo II se aborda los antecedentes históricos y todos los conceptos que intervienen en la calidad de la energía. Ya que las empresas suministradoras de energía eléctrica como los usuarios finales del servicio de energía, han estado insistiendo cada vez más en el concepto de una mejor calidad de energía.

Las principales razones por las que es necesario estudiar los conceptos relacionados con la calidad en el suministro de la energía eléctrica, son las siguientes:

1. Las cargas cada día son más sensibles a las variaciones de ciertos parámetros o cantidades en los sistemas del suministro de energía eléctrica, en la actualidad se

encuentran cargas tanto industriales como residenciales y comerciales, que hacen un uso intensivo de controles basados en microprocesadores, como es el caso de las aplicaciones en robótica, las computadoras personales, aparatos del hogar, etcétera. También existe cada vez mayor presencia de la llamada electrónica de potencia, usada en distintas aplicaciones, como es el caso de los controladores para motores eléctricos, que han sustituido en muchos casos a los controles electromagnéticos y que son sensibles a muchos tipos de disturbios.

2. Se ha incrementado el concepto de mayor eficiencia en los sistemas eléctricos, lo cual ha traído como resultado un incremento continuo en la aplicación de dispositivos de alta eficiencia, tales como: los controladores de velocidad en motores eléctricos, el uso de capacitores en paralelo para la corrección del factor de potencia y para reducir pérdidas; esto trae como consecuencia un incremento en los niveles de armónicas en los sistemas eléctricos, problema que ha preocupado a los técnicos, por el impacto que actualmente tienen y por las condiciones futuras que se pueden presentar.

3. Una mayor atención por parte de los usuarios finales a problemas con la calidad del suministro de la energía eléctrica, que pueden afectar a las cargas, como son: las interrupciones de servicio, los transitorios por maniobras, las depresiones y elevaciones de voltaje, etcétera.

El principal factor que se encuentra detrás de los conceptos de la calidad en el suministro de la energía eléctrica es el incremento en la productividad para los clientes de las empresas eléctricas. Lo anterior, plantea la necesidad de identificar estos problemas entre suministradores y usuarios de energía eléctrica en forma grupal, para que en la medida de lo posible se planteen soluciones conjuntas.

El capítulo III describe específicamente las fuentes armónicas y sus efectos, así como la normatividad de los problemas de armónicos, los límites de distorsión de armónicas, tanto de voltaje como de corriente.

Las armónicas distorsionan la forma de onda de voltaje y corriente de 60 Hz. Cada armónica se expresa en términos de su orden. Por ejemplo, las armónicas de orden segunda, tercera y cuarta, tienen frecuencias de 120, 180 y 240 Hz respectivamente. Conforme se incrementa el orden, la frecuencia de las armónicas y su magnitud normalmente disminuye. Por eso, las armónicas de orden inferior, usualmente la quinta y la séptima, tienen el mayor efecto en el sistema de potencia.

Si no existiera resonancia, el máximo valor posible de una corriente armónica expresada en por ciento de la fundamental es $100/h$, donde "h" es el orden de la armónica. Así, la quinta armónica alcanzará 20 % de la fundamental, mientras que la novena armónica alcanzará el 11.1 %.

En el capítulo IV derivado de lo anterior se encuentra que, en los sistemas eléctricos de potencia, la respuesta del sistema es tan importante como la fuente de armónicas, de hecho, se podría decir que los sistemas de potencia son bastante tolerantes de las corrientes inyectadas por las cargas que producen armónicas, a menos que exista alguna interacción adversa con la impedancia del sistema. En el estudio de armónicas, la identificación de las fuentes es sólo la mitad del trabajo, la respuesta del sistema de potencia a cada frecuencia armónica determina el verdadero impacto de las cargas no lineales sobre la distorsión armónica del voltaje.

Por esta razón se incluye una explicación de impedancia del sistema, impedancia del capacitor, y dispositivos para filtrar la distorsión armónica.

En el capítulo V se describe la metodología para la reducción de armónicas en el centro de cómputo, iniciando por la inspección física de la instalación, la conexión del equipo analizador de redes, la interpretación de resultados y la opción mas adecuada para disminuir las armónicas.

Las conclusiones son originadas por la presente investigación del caso práctico, por lo cual, las observaciones hechas a la instalación del centro de cómputo son, en definitiva, una solución para la disminución de armónicos y tener una mejor calidad de la energía.

CAPITULO I

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

1.1.1. POTENCIA ACTIVA

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

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

1.1.2. POTENCIA REACTIVA

Los motores, transformadores y en general todos los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de un campo electromagnético, requiere potencia activa para efectuar un trabajo útil, mientras que la potencia reactiva es utilizada para la generación del campo magnético. Esta potencia reactiva corresponde 90° defasada de la potencia activa. Esta potencia es expresada en Volts Ampers reactivos (VAr).

1.1.3. POTENCIA APARENTE

El producto de la corriente y el voltaje es llamado potencia aparente, es también la resultante de la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y la potencia reactiva. Esta potencia es expresada en Volts Ampers (VA)

1.1.4. REPRESENTACIÓN GRAFICA

La siguiente representación grafica puede ser usada para ilustrar las diferentes formas de potencia eléctrica:

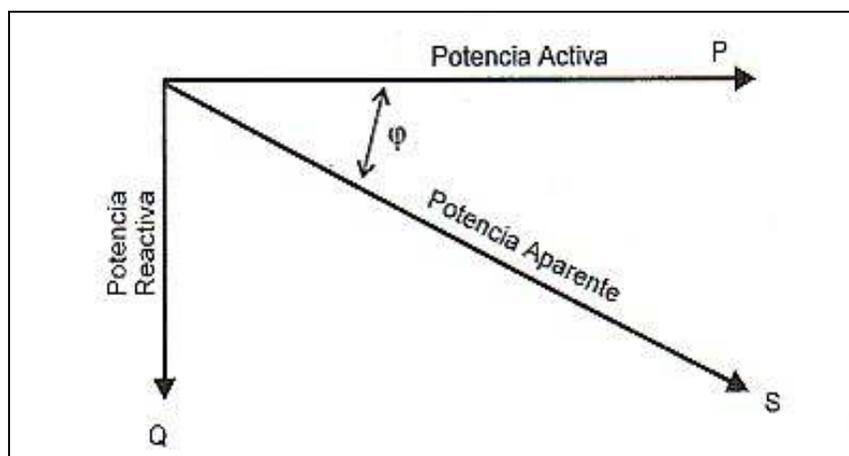


FIGURA 1.1 DIAGRAMA DE POTENCIA ELÉCTRICA

Como se muestra en el diagrama anterior el ángulo entre las potencias activa y aparente es denotado por la letra θ .

Tenemos que:

$$\begin{aligned} \text{Potencia activa} &= \text{potencia aparente} * \text{Cos } \theta \\ P &= S \text{ Cos } \theta \dots\dots\dots(1.1) \end{aligned}$$

El valor de $\text{Cos } \theta$ es llamado factor de potencia.

El factor de potencia es la relación Watts / V.A. esta relación nos indica la cantidad de energía realmente aprovechada, esto es que mientras el valor del ángulo teta este mas cercano a la unidad será mas eficiente.

El factor de potencia puede ser expresado como una función de las potencias activa y reactiva.

$$\text{De lo cual: } S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots(1.2)$$

De (1) y (2) tenemos:

$$\text{Cos } \theta = F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \dots\dots\dots(1.3)$$

Esta fórmula muestra que el factor de potencia puede ser considerado en un valor relativo como un valor característico de la potencia reactiva consumida.

NOTA: Además de $\text{Cos } \theta$, la tangente del ángulo θ es también usada:

$$\tan \theta = \frac{Q}{P} \dots\dots\dots(1.4)$$

1.1.5. DIAGRAMA DE CORRIENTE

Una carga que consuma la mayor potencia reactiva, tendrá un factor de potencia mas bajo. Es el fenómeno eléctrico que puede suceder en condiciones estables.

Con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente por la carga será dos veces la corriente útil.

Con un factor de potencia igual a 0.9, la cantidad de corriente será 10 % más alta que la corriente útil.

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

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

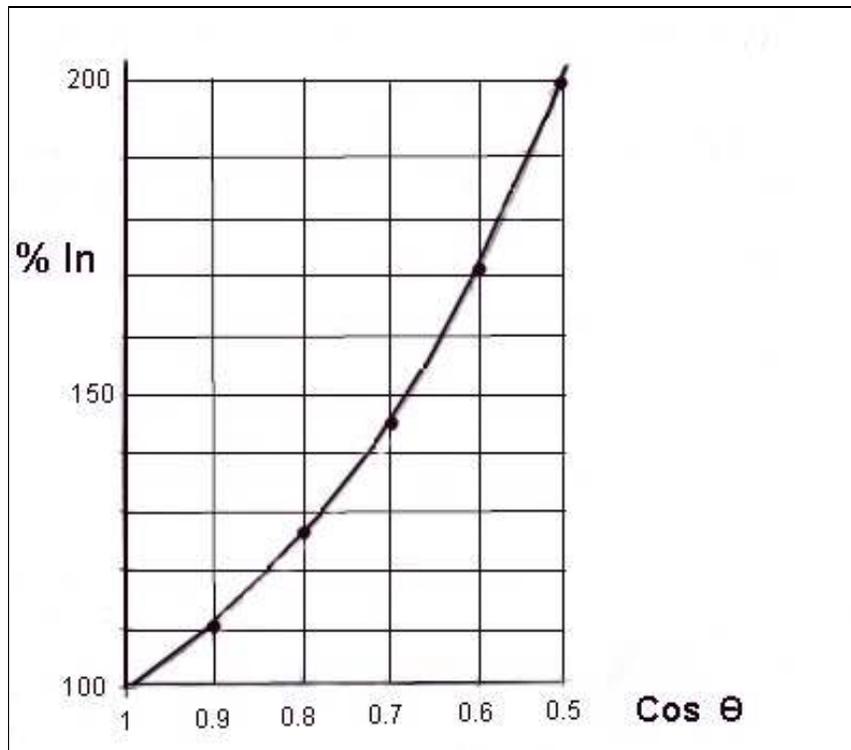


FIGURA 1.2 LA CORRIENTE NOMINAL ES AFECTADA POR EL $\cos \theta$

1.2 FACTOR DE POTENCIA

1.2.1. PROBLEMAS CON UN FACTOR DE POTENCIA BAJO

El factor de potencia tiene una considerable influencia en la corriente demandada del sistema, es decir a menor factor de potencia, mayor cantidad de energía demandada.

Desventajas producidas por la elevación de corriente en un sistema eléctrico.

- Aumentan las pérdidas por efecto Joule, las cuales, son una función del cuadrado de la corriente, por ejemplo: los cables entre el medidor y el usuario, los embobinados de los transformadores de distribución, dispositivos de operación y protección.
- Un aumento en la caída de voltaje, resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etcétera); Éstas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Esta caída de voltaje afecta a los embobinados de los transformadores de distribución, los cables de alimentación, sistemas de protección y control.

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

Esas desventajas también afectan al productor y al distribuidor de energía eléctrica. Es completamente comprensible que él debe penalizar al mal usuario, haciendo que el mismo pague más por su electricidad.

1.2.2. PERDIDAS EN LOS CABLES

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

Para un cable dado, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. Para mejorar el factor de potencia de un valor inicial $\text{Cos } \theta_1$ a un valor $\text{Cos } \theta_2$, las pérdidas $I^2 R$ en watts pueden ser reducidas por un factor:

$$K = \left[1 - \left(\frac{\text{Cos } \theta_1}{\text{Cos } \theta_2} \right)^2 \right] * 100 \text{ en } \% \dots\dots\dots(1.5)$$

Vemos que una mejora del $\text{Cos } \theta$ de 0.6 a 0.8 reduce las pérdidas en 44% y una mejora de 0.6 a 1.00 resultará en una reducción del 64%. Aunque esos factores sean bien conocidos, poca atención es dada para las posibles mejoras en economía.

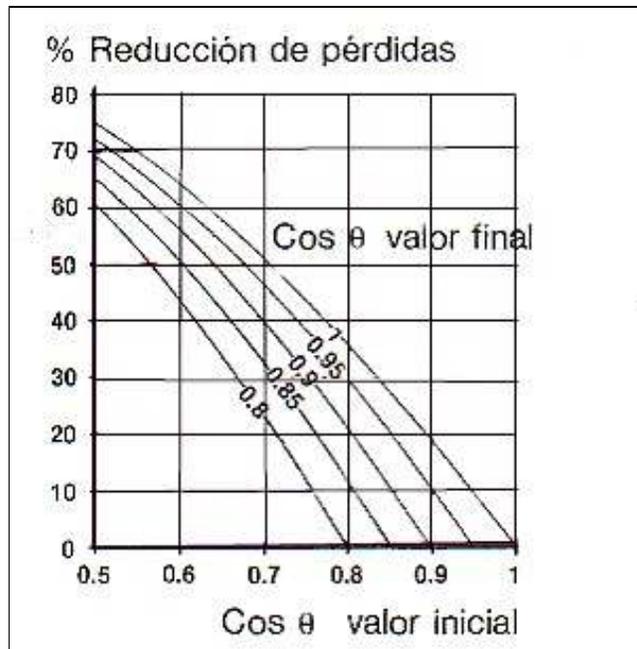


FIGURA 1.3 PÉRDIDAS EN CABLES

1.2.3. APLICACIÓN DE LOS CAPACITORES

La aplicación característica de los capacitores es reducir la corriente del sistema y elevar el voltaje del mismo.

No se debe pasar por alto que los KVAR's que fluyen a través del sistema causan pérdidas:

$$P = RI^2 = R\left(\frac{P^2 + Q^2}{E^2}\right) \dots\dots\dots(1.6)$$

Si los KVARs demandados por la carga se suministran ahí mismo, esto implica que las pérdidas se reduzcan a:

$$P = RI^2 = R\left(\frac{P^2}{E^2}\right) \dots\dots\dots(1.7)$$

En realidad, para un F.P. de 0.9 en la carga, los KVARs suministrados desde las áreas de generación son del orden 2 a 3 veces mayores que los requeridos por la carga.

Algunos de los beneficios que se logran con la aplicación de capacitores son los siguientes:

- Reduce las pérdidas del sistema.
- Eleva el voltaje.
- Se incrementa la capacidad de transmisión, mejorando la utilización de la capacidad térmica de los equipos (líneas, transformadores y cables).

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión se presentan, de vez en cuando, situaciones tales como una demanda anormal de reactivos, esto es, que dicha demanda sobrepasa la aportación que de ellos hacen algunos elementos de la red, obligando a los generadores a bajar su factor de potencia para suministrar los reactivos complementarios.

El costo de generar, transmitir y transformar los reactivos, en el camino a su consumo, invitan a realizar algunas consideraciones con respecto a los elementos que consumen estos reactivos, imponiendo la necesidad de localizar, operar y proyectar los equipos compensadores, de tal forma que estos no alteren el funcionamiento normal del sistema al cual se conectan. Los mecanismos de compensación más empleados son los siguientes:

- A niveles de voltaje industriales se utilizan motores síncronos que son capaces de proporcionar trabajo mecánico y al mismo tiempo actuar como una carga reactiva, operando subexcitados o sobreexcitados; generalmente se usan para mejorar el factor de potencia de la instalación.
- Utilización de condensadores síncronos. Dichos condensadores son máquinas síncronas diseñadas para que generando o absorbiendo reactivos de la red controlen el factor de potencia. Suelen ser de gran tamaño y capaces de

proporcionar potencia reactiva elevada; sin embargo, su uso implica una inversión inicial muy elevada y un mantenimiento costoso.

- Utilización de compensadores estáticos. Los compensadores estáticos están integrados por capacitores, transformadores y tiristores, combinados de tal forma que proporcionan una rápida y continua compensación de reactivos; el principal problema de estos compensadores es el costo elevado de sus componentes de estado sólido (tiristores), ya que se proyectan especialmente para operar en altas tensiones.
- Utilización de bancos de capacitores. Estos proporcionan la potencia reactiva de carácter capacitivo que sea necesario, pudiéndose instalar en bancos fijos o bancos formados por secciones fijas y secciones desconectables.

El uso de capacitores de potencia comparado con el uso de otros medios de generación de potencia reactiva, implica entre otras, las ventajas de un bajo costo por KVAR instalado, un fácil manejo y mantenimiento sencillo y barato, que en muchos casos se hace prácticamente inexistente. Esto último, es el motivo de la aceptación universal que han tenido los capacitores de potencia en todos los sistemas de energía eléctrica, teniendo una demanda notablemente creciente.

1.2.4. EJEMPLO DE LA APLICACIÓN DE CAPACITORES:

Considere un motor de inducción trifásico de 500 HP, 60 Hz, 4160 V, conectado en estrella, con una eficiencia a plena carga del 88%, con un factor de potencia en atraso de 0.75 y conectado a un alimentador. Se desea corregir el factor de potencia de la carga a 0.9 en atraso, conectando tres capacitores en la carga, determine lo siguiente:

- El valor del banco de capacitores en kVARs.
- La capacitancia de cada unidad, si son conectados los capacitores en delta, en microfaradios.
- La capacitancia de cada unidad, si son conectados los capacitores en estrella.

SOLUCIÓN

A)

$P = 500 \text{ HP}$, $E_{\text{fic.}} = 88\%$, $fp_1 = 0.75$, $fp_2 = 0.90$, $V_t = 4160 \text{ V}$, $f = 60 \text{ Hz}$,
 $1 \text{ HP} = 745.7 \text{ watts}$.

$$\begin{aligned} P &= 500 \text{ HP} * 745.7 \text{ watts/hp} = 372\,850 \text{ watts} & P &= 372.850 \text{ KW} \\ P &= 372.850 \text{ KW} / 88 \% & P &= 423.693 \text{ KW} \end{aligned}$$

La potencia con el factor de potencia sin corregir:

$fp = \cos \theta$, por lo tanto:

$$\theta = \cos^{-1} \text{fp} \dots\dots\dots(1.8)$$

$\tan \theta = Q / P$, por lo tanto:

$$Q = P \tan \theta \dots\dots\dots(1.9)$$

Sustituyendo:

$$Q1 = (423.693 \text{ KW}) (\tan (\cos^{-1} 0.75))$$

$$Q1 = 373.662 \text{ KVARs}$$

La potencia, con el factor de potencia corregido (de 1.9):

$$Q2 = P \tan \theta$$

Sustituyendo:

$$Q2 = P \tan (\cos^{-1} \text{fp}_2)$$

$$Q2 = (423.693 \text{ KW}) (\tan (\cos^{-1} 0.90))$$

$$Q2 = 205.203 \text{ KVARs}$$

El valor del banco de capacitores es:

$$Q_t = Q1 - Q2 \dots\dots\dots(1.10)$$

$$\text{Sustituyendo: } Q_t = 373.662 - 205.203$$

$$Q_t = 168.475 \text{ KVARs}$$

B) Si los capacitores están conectados en delta tendremos:

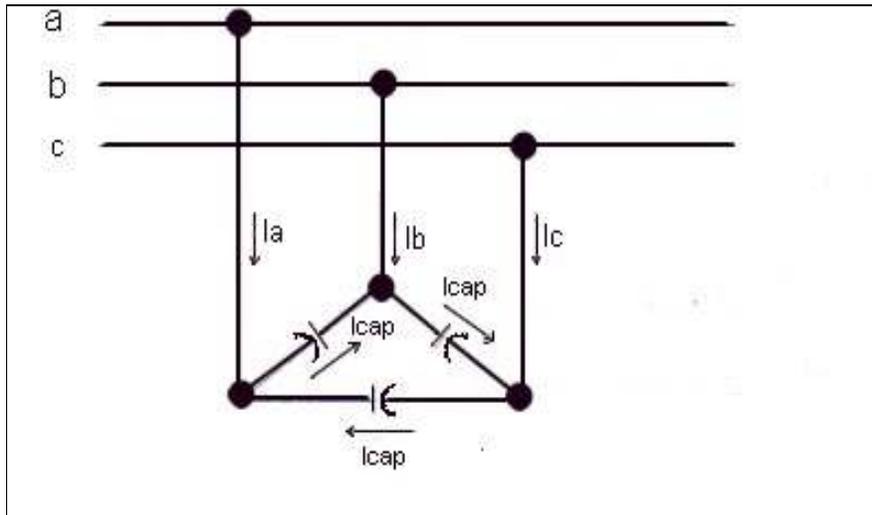


FIGURA 1.4 CAPACITORES EN DELTA

$$I_L = \frac{Qt}{\sqrt{3} * V_t} \dots\dots\dots(1.11)$$

Sustituyendo:

$$I_L = \frac{168.475kVAr_s}{\sqrt{3} * 4.16kV} \quad I_L = 23.379 \text{ Amps}$$

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(1.12)$$

Sustituyendo:

$$I_f = \frac{23.379 \text{ Amps}}{\sqrt{3}} \quad I_f = 13.498 \text{ Amps}$$

La reactancia de cada capacitor será:

$$X_C = \frac{V_t}{I_c} \dots\dots\dots(1.13)$$

Sustituyendo:

$$X_C = \frac{4160V}{13.498A} \quad X_C = 308.18 \text{ Ohms}$$

La capacitancia de cada capacitor será igual a:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \dots\dots\dots(1.14)$$

Por lo tanto, despejando C de (14) tenemos:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \dots\dots\dots(1.15)$$

Sustituyendo:

$$C = \frac{1}{2 * 3.14159 * 60Hz * 308.18V}$$

$$C = 8.607 \mu f$$

C) Si los capacitores están conectados en estrella tendremos que:

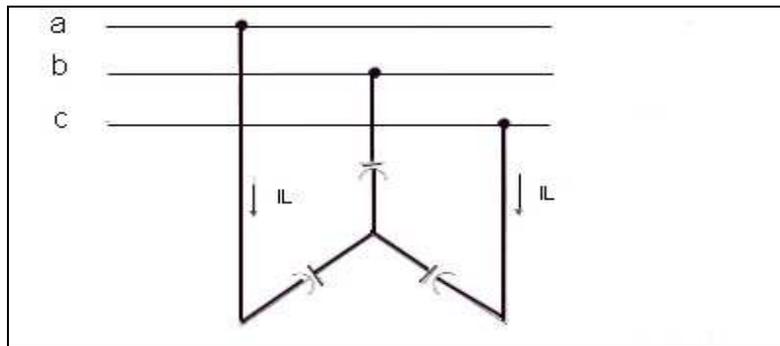


FIGURA 1.5 CAPACITORES CONECTADOS EN ESTRELLA

$$V_L = \sqrt{3} * V_f \dots\dots\dots(1.16)$$

$$\text{y } I_L = I_f \dots\dots\dots(1.17)$$

El valor de reactancia es:

$$X_c = \frac{V_{L-N}}{I} \dots\dots\dots(1.18)$$

Sustituyendo:

$$X_c = \frac{4160V}{\sqrt{3} * 23.379A} \quad X_c = 102.732 \text{ Ohms}$$

La capacitancia de los capacitores será (de 1.14):

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Por lo tanto (de 1.15):

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

Sustituyendo:

$$C = \frac{1}{2 * 3.14159 * 60Hz * 132.6527V}$$

$$C = 25.8198 \mu f$$

1.3 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Para obtener la mejor ventaja económica posible de ambas potencias eléctricas (activa y reactiva), las plantas generadoras y plantas consumidoras deberían ser operadas con alta eficiencia. Para lograr esto, es esencial tener un alto factor de potencia en todo el sistema.

La mayoría de las máquinas de corriente alterna extraen de la fuente potencia aparente en términos de kVA, lo cual es superior a la potencia útil, medida en kW, requerida por la máquina. La relación entre estas potencias es conocida como factor de potencia de la carga y es dependiente, sobre todo, del tipo de máquina en uso:

$$\frac{P_{util}}{P_{aparente}} = \frac{kW}{kVA} = F.P. \dots\dots\dots(1.19)$$

Una cantidad de máquinas eléctricas usadas en la industria tienen un bajo factor de potencia, el cual no se puede evitar. Esto significa que las compañías suministradoras tienen que generar mucho más corriente que la requerida teóricamente, en consecuencia, los transformadores y cables tienen que soportar esta corriente extra. Cuando el factor potencia total de la carga de una estación generadora es bajo, el sistema es ineficiente y el costo de la electricidad es alto. Para superar esto, y al mismo tiempo lograr que los generadores y cables no estén sobrecargados con corrientes de menor potencia, las compañías suministradoras frecuentemente ofrecen bonificaciones para consumidores cuyo factor de potencia es alto o imponen penalidades para factor de potencia bajo.

Algunas instalaciones, incluyendo los siguientes tipos de maquinaria o equipo, tiene normalmente un factor de potencia bajo, el cual puede ser corregido con un consecuente ahorro en los costos.

- Motores de inducción de todo tipo. (Para grandes cargas industriales en corriente alterna).
- Instalación de tiristores de potencia. (Para control de motores de corriente directa y procesos electroquímicos).
- Transformadores de potencia y reguladores de voltaje.
- Máquinas soldadoras.
- Hornos de inducción y de arco eléctrico.
- Bobina de choque y sistemas magnéticos.
- Letreros de neón y lámparas fluorescentes.

Los factores de potencia típicos encontrados en varias industrias se dan a continuación:

TABLA 1.1 FACTORES DE POTENCIA TÍPICOS

INDUSTRIA	FACTOR DE POTENCIA
Textil	0.65 – 0.75
Química	0.75 – 0.85
Máquinas de taller	0.40 – 0.65

Soldadoras de arco	0.35 – 0.40
Hornos de arco	0.70 – 0.90
Hornos con núcleo de inducción y radiadores	0.15 – 0.40
Industria sementera	0.78 – 0.80
Fábrica de ropa	0.35 – 0.60
Cerveceras	0.75 – 0.80
Industrias destiladoras	0.60 – 0.85
Industrias mineras	0.65 – 0.80
Industrias ladrilleras	0.60 – 0.75
Fundidoras	0.50 – 0.70
Moldeadoras de plástico	0.60 – 0.75
Imprentas	0.55 – 0.70
Excavadoras	0.50 – 0.70
Marchas de molinos	0.30 – 0.75

Haciendo énfasis que estos valores de factor de potencia son sólo como guía, el factor de potencia puede variar de instalación en instalación.

El método empleado para llevar a cabo el mejoramiento del sistema implica la introducción de potencia reactiva. Esto es llevado a cabo con máquinas rotatorias (condensadores síncronos) o capacitores estáticos.

1.3.1. PRINCIPIO DE COMPENSACIÓN.

La potencia aparente en (kVA) en un circuito de corriente alterna puede ser resuelto en dos componentes: la componente en fase, la cual representa la potencia útil y la componente reactiva, la cual es trabajo no útil. La suma fasorial de las dos son los kVA conducidos por la fuente.

El coseno del ángulo de fase entre los kVA y los kW representan el factor de potencia de la carga, el cual se muestra en el diagrama de fasores en la figura 1.6.

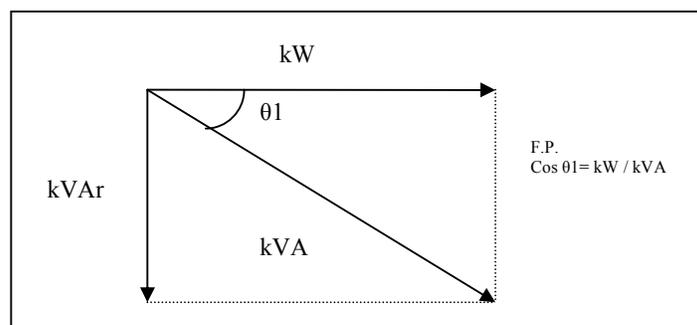


FIGURA 1.6 DIAGRAMA FASORIAL DE UNA PLANTA OPERANDO CON UN FACTOR DE POTENCIA ATRASADO

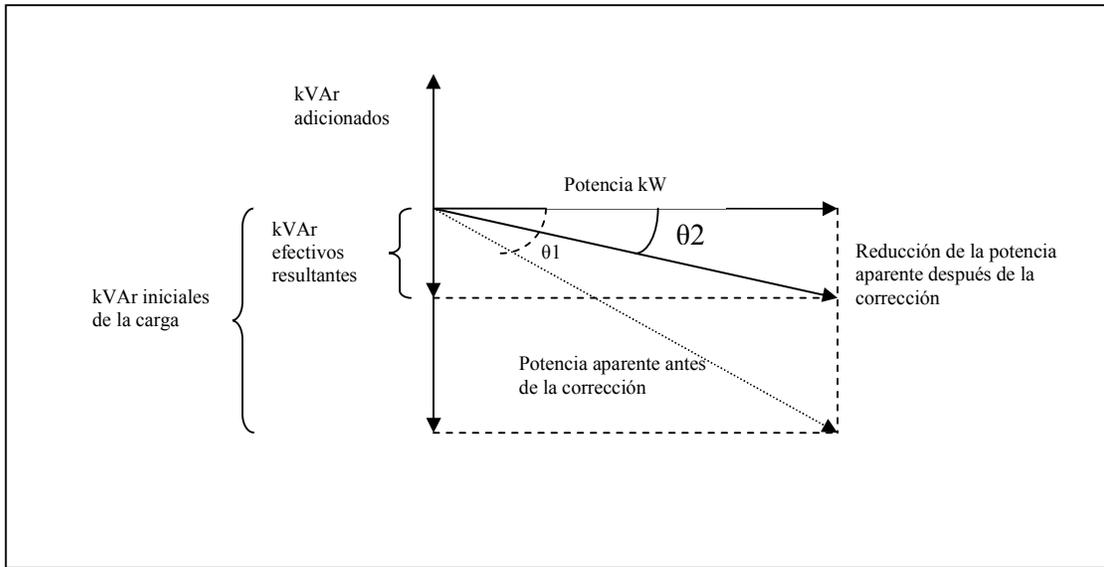


FIGURA 1.7 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA POR ADICIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN OPOSICIÓN DE FASE

Para mejorar el factor de potencia se requiere que el equipo genere potencia reactiva de aproximadamente igual a la magnitud de la carga en kVAr, pero en oposición de fase, siendo conectada en paralelo con la carga. La resultante en kVA es ahora más pequeña y el nuevo factor de potencia ($\cos \theta_2$) es incrementado. El coseno de θ_2 es controlado por la magnitud de los kVAr adicionales. De esta manera se considera que el mejoramiento del factor de potencia puede ser obtenido por variación de potencia reactiva en oposición de fase a la de la carga.

Hay dos tipos de equipos para los cuales los kVAr en oposición de fase pueden ser conducidos por la fuente:

- 1) Condensadores síncronos.
- 2) Capacitores estáticos.

Los puntos que son considerados en algunas instalaciones son:

- 1) Confiabilidad del equipo que es instalado.
- 2) Vida probable.
- 3) Costos de capital.
- 4) Costos de mantenimiento.
- 5) Costos de operación.
- 6) Espacio requerido y facilidad de instalación.

Generalmente se encontrará que, para instalaciones de una industria normal, el costo de capital de máquinas rotatorias para ambas máquinas síncronas y adelanto de fase, los hace que estos sean no rentables por llevar consigo un precio alto.

Los capacitores no tienen estas desventajas, comparándolos con otras formas de corrección, el costo inicial es muy bajo, los costos de mantenimiento son mínimos y ellos pueden ser utilizados con la misma alta eficiencia en todos los lugares de instalación. Ellos son compactos, fiables, altamente eficientes, convenientes para instalarse entre sí mismos o en forma individual.

Estos factores complementados con el bajo costo inicial, muestra definitivamente que la corrección del factor de potencia por capacitores es el método más satisfactorio y económico. Los capacitores estáticos, debido a que son de bajas pérdidas, simplicidad y alta eficiencia, actualmente son usados casi universalmente para la corrección del factor de potencia.

Algunos métodos para calcular el valor del capacitor, como son: el método numérico, gráfico y el método a base de tablas, entre otros, proporcionan un método rápido y simple para su cálculo, puesto que la mejora de un factor de potencia bajo, por medio de capacitores, puede elevar el nivel de voltaje, reducir las pérdidas y aliviar la carga del sistema eléctrico.

1.3.2. MÉTODO NUMÉRICO DE CÁLCULO

Generalmente, los factores de potencia de cargas individuales se pueden combinar para calcular el factor de potencia de un grupo de cargas diferentes. Esto se hace usando las fórmulas descritas en la parte de los fundamentos. El método consiste en sumar aritméticamente los kW y de algebraica los kVAr. Las dos componentes se combinan entonces vectorialmente. El factor de potencia para un grupo de cargas, cada una con un factor de potencia diferente, también se puede obtener mediante un método gráfico.

Como ejemplo, para obtener el factor de potencia combinado de un grupo de cargas, supóngase que una subestación alimenta tres diferentes tipos de cargas, con factores de potencia adelantado, de retraso y unitario, como se muestra en la figura 1.8.

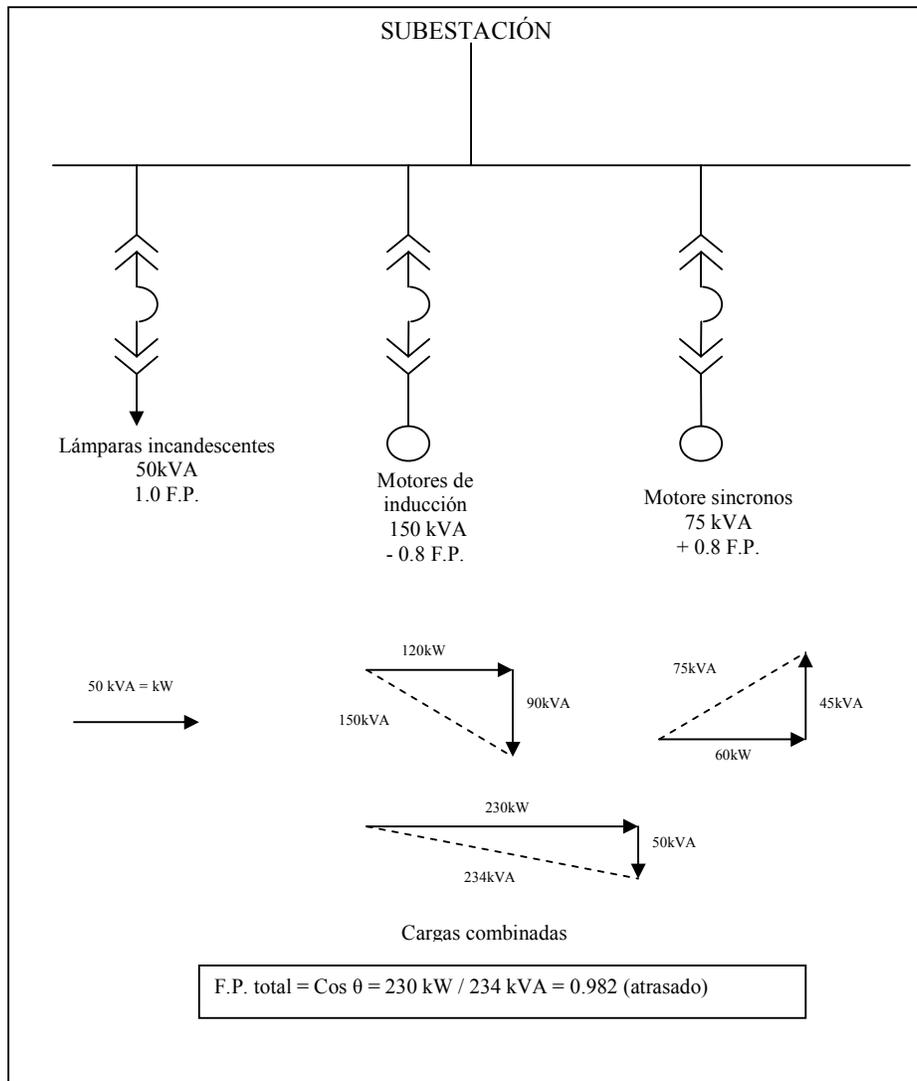


FIGURA 1.8 FACTOR DE POTENCIA COMBINADO DE UN GRUPO DE CARGAS CON DIFERENTES F.P.

El método numérico para calcular el factor de potencia total de la subestación usa el total de kW y KVAR de los tres tipos diferentes de cargas como sigue:

Carga de 50 kW de alumbrado. La carga de las lámparas incandescentes tienen un factor de potencia igual a la unidad y toda la corriente es en kW.

Puesto que: $kVA = kW$, entonces: $50 \text{ kVA} = 50 \text{ kW}$

Carga de 150 kVA de motores de inducción que operan con un factor de potencia de retraso de 0.8:

$$KW = kVA \times F.P. \dots\dots\dots(1.20)$$

$$KW = 150 \times 0.8 = 120 \text{ kW.}$$

$$kVAr = \sqrt{kVA^2 - kW^2} = \sqrt{150^2 - 120^2} = \sqrt{22500 - 14000} = \sqrt{8100} = 90kVAr$$

Carga de 75 kVA de un motor síncrono con un factor de potencia de adelanto de 0.8

$$KW = 75 \text{ kVA} \times 0.8 = 60 \text{ kW}$$

$$kVAr = \sqrt{75^2 - 60^2} = \sqrt{5625 - 3600} = \sqrt{2025} = 45kVAr$$

Si la capacidad del motor se proporciona en H.P. en lugar de kVA, la conversión a kVA se efectúa con la fórmula:

$$kVA = \frac{H.P. * 0.746}{\eta(pc) * F.P.(pc)} \dots\dots\dots(1.21)$$

Donde: pc = a plena carga

Los kW que la subestación debe suministrar se calculan sumando: 50 kW (lámparas) + 120 kW (motores de inducción) + 60 kW (motor síncrono) = 230 kW.

En el ejemplo, el factor de potencia y los kVA totales de la subestación son:

$$kVA = \sqrt{kW^2 - kVAr^2} = \sqrt{230^2 + 45^2} = \sqrt{52900 + 2025} = \sqrt{54925} = 234kVA$$

$$F.P.Total = \frac{kW}{kVA} = \frac{230}{234} = 0.982$$

El método de cálculo descrito, muestra como influyen los kVAr en la mejora del factor de potencia y como se obtienen los kVA de mejora mediante la relación del triángulo rectángulo y no por la simple suma de kW y kVAr. Sin embargo, este método es un tanto laborioso para calcular el factor de potencia.

1.3.3. MÉTODO GRÁFICO DE CÁLCULO

El método gráfico es más sencillo que el método numérico, tomando los datos del ejemplo anterior, se procede a resolverlo de la siguiente manera:

Como un ejemplo del método gráfico, supóngase que el factor de potencia total de un grupo de cargas de 120 kW es de 80 por ciento. Sin embargo, el factor de potencia deseado y determinado por la tarifa es de 0.9.

A una escala conveniente, trazar una línea horizontal que represente 120 kW (línea 0A, figura 1.9). A partir del punto "A", trazar una línea vertical. Desde el punto 0, trazar una línea a un ángulo θ_1 con la línea 0A, hasta el punto B. El coseno del ángulo θ_1 es 0.8, o

sea un factor de potencia de 80 por ciento. Este es el factor de potencia total existente. La línea AB representa la carga de 90 kVAr demandados de la línea de alimentación.

Desde el punto 0 trazar la línea OC a un ángulo θ_2 con la línea OA. El coseno del ángulo θ_2 es 0.9 y corresponde al factor de potencia deseado de 90 por ciento.

La línea CB representa los 32 kVAr de los capacitores, necesarios para mejorar el factor de potencia de 80 por ciento de los motores al factor de potencia deseado de 90 por ciento. La línea de alimentación proporcionará la diferencia entre los 90 kVAr (línea AB) y los 32 kVAr (línea CB) proporcionados por los capacitores, o sea, 58 kVAr (línea AC).

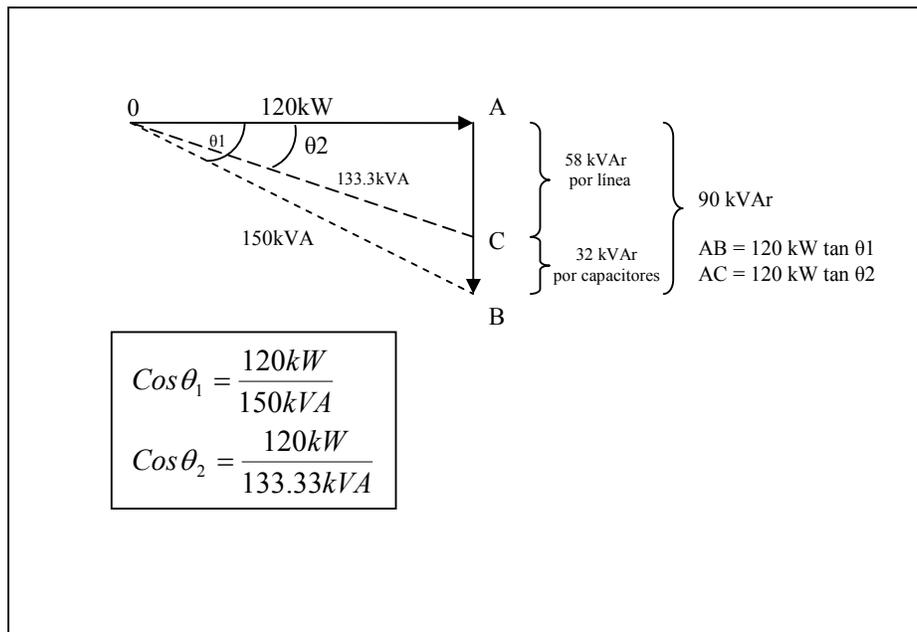


FIGURA 1.9 KVAR REQUERIDOS DE CAPACITORES PARA MEJORAR UN F.P. DADO HASTA UN VALOR DESEADO

1.3.4. EL MÉTODO A BASE DE TABLAS PARA EL CÁLCULO

El método más sencillo es mediante el uso de tablas que incluyen un factor multiplicador de kW. Las tablas son convenientes para determinar los kVAr necesarios en un capacitor, para lograr la corrección deseada del factor de potencia. La tabla siguiente está basada en la relación del triángulo rectángulo que se encuentra mostrado en la figura 1.9, como sigue:

$$\cos \theta = F.P. = \frac{kW}{kVA} \dots\dots\dots(1.22)$$

$$\tan \theta = \frac{kVAr}{kW} \dots\dots\dots(1.23)$$

$$\text{Sen } \theta = \frac{\text{kVAr}}{\text{kVA}} \dots\dots\dots(1.24)$$

Como la componente de kW generalmente es constante y los kVA y los kVAr varían con el factor de potencia, la fórmula más conveniente para usar se puede expresar como sigue:

$$\text{kVAr} = \text{kW} * \text{Tangente } \theta \dots\dots\dots(1.25)$$

Basándose en la fórmula anterior (1.25), los kVAr del factor de potencia original Cos θ_1 y del factor de potencia deseado Cos θ_2 son:

$$\text{kVAr del F.P. original} = \text{kW} * \text{Tangente } \theta_1$$

$$\text{kVAr del F.P. deseado} = \text{kW} * \text{Tangente } \theta_2$$

La capacidad necesaria del capacitor para mejorar el Factor de potencia al valor deseado es la diferencia de estos dos valores, o kVAr del capacitor = kW * (Tangente θ_1 , Tangente θ_2). Esta fórmula se puede escribir simplemente como sigue:

$$\text{kVAr del capacitor} = \text{kW} * \Delta \text{Tangente.} \dots\dots\dots(1.26)$$

Los factores que determinan el tamaño requerido de un capacitor para el mejoramiento del factor de potencia están dados en la tabla, la cual proporciona un método simple para el cálculo del valor de kVAr y el valor del capacitor requerido para el mejoramiento del factor de potencia, desde un valor inicial hasta un valor deseado, es decir: CAPACITOR (kVAr) = CARGA (kW) * FACTOR DE MEJORAMIENTO, Para que exista un factor de potencia propuesto.

TABLA 1.2 MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA

Mejoramiento del factor de potencia. Basado en la formula: Capacitor requerido (kVAr) = Carga (kW) * (tan θ1 - tan θ2)									
F.P. INICIAL	FACTOR MULTIPLICADOR PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA								
	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.9	0.85	0.8
0.25	3.87	3.731	3.87	3.622	3.531	3.544	3.389	3.253	3.123
0.26	3.71	3.572	3.511	3.463	3.422	3.365	3.23	3.094	2.984
0.27	3.57	3.424	3.383	3.316	3.275	3.038	3.082	2.946	2.816
0.28	3.43	3.287	3.226	3.178	3.137	3.1	2.944	2.809	2.679
0.29	3.3	3.158	3.097	3.049	3.008	2.971	2.816	2.68	2.55
0.3	3.02	3.038	2.977	2.929	2.888	2.851	2.695	2.56	2.43
0.31	3.07	2.925	2.884	2.516	2.776	2.738	2.583	2.447	2.317
0.32	2.96	2.819	2.758	2.71	2.669	2.632	2.476	2.341	2.211
0.33	2.96	2.719	2.658	2.61	2.589	2.532	2.376	2.241	2.111
0.34	2.77	2.824	2.583	2.515	2.474	2.437	2.282	2.146	2.016
0.35	2.68	2.534	2.473	2.426	2.385	2.348	2.192	2.057	1.926
0.36	2.59	2.45	2.389	2.341	2.3	2.283	2.107	1.972	1.842
0.37	2.51	2.369	2.308	2.26	2.219	2.182	2.027	1.891	1.761
0.38	2.43	2.292	2.231	2.184	2.143	2.106	1.95	1.814	1.684
0.39	2.36	2.219	2.158	2.11	2.069	2.032	1.877	1.741	1.611
0.4	2.29	2.149	2.088	2.041	2	1.963	1.807	1.672	1.541
0.41	2.22	2.083	2.022	1.974	1.933	1.896	1.74	1.605	1.475
0.42	2.16	2.019	1.958	1.91	1.889	1.832	1.676	1.541	1.411
0.43	2.1	1.958	1.897	1.849	1.808	1.771	1.615	1.48	1.35
0.44	2.04	1.899	1.838	1.79	1.749	1.712	1.557	1.521	1.291
0.45	1.98	1.843	1.782	1.734	1.693	1.658	1.5	1.365	1.235
0.46	1.93	1.788	1.727	1.68	1.639	1.602	1.446	1.311	1.18
0.47	1.88	1.736	1.675	1.627	1.585	1.549	1.394	1.258	1.128
0.48	1.83	1.686	1.625	1.577	1.536	1.049	1.343	1.208	1.078
0.49	1.78	1.637	1.578	1.528	1.487	1.45	1.297	1.159	1.029
0.5	1.73	1.59	1.529	1.481	1.44	1.403	1.248	1.112	0.982
0.51	1.89	1.545	1.484	1.436	1.395	1.358	1.202	1.087	0.937
0.52	1.64	1.501	1.44	1.392	1.351	1.314	1.158	1.023	0.893
0.53	1.6	1.458	1.397	1.349	1.308	1.271	1.116	0.98	0.85
0.54	1.56	1.417	1.358	1.308	1.267	1.23	1.074	0.939	0.809
0.55	1.52	1.376	1.315	1.268	1.227	1.19	1.034	0.899	0.768
0.56	1.48	1.337	1.276	1.229	1.188	1.151	0.995	0.88	0.769
0.57	1.44	1.299	1.238	1.191	1.15	1.113	0.957	0.822	0.691
0.58	1.4	1.263	1.202	1.154	1.113	1.076	0.92	0.785	0.655
0.59	1.39	1.226	1.165	1.118	1.077	1.04	0.884	0.749	0.618
0.6	1.33	1.191	1.13	1.083	1.042	1.005	0.849	0.714	0.583
0.61	1.3	1.157	1.096	1.048	1.007	0.97	0.815	0.679	0.549
0.62	1.27	1.123	1.062	1.015	0.974	0.937	0.781	0.646	0.515
0.63	1.23	1.091	1.03	0.982	0.941	0.904	0.748	0.613	0.483
0.64	1.2	1.059	0.998	0.95	0.909	0.872	0.716	0.581	0.451
0.65	1.19	1.027	0.966	0.919	0.878	0.841	0.685	0.549	0.419
0.66	1.14	0.998	0.935	0.888	0.847	0.81	0.854	0.519	0.388
0.67	1.11	0.966	0.905	0.857	0.816	0.779	0.824	0.488	0.358
0.68	1.08	0.936	0.875	0.828	0.787	0.75	0.594	0.459	0.328
0.69	1.05	0.907	0.846	0.798	0.757	0.72	0.585	0.429	0.299

1.4 CONEXIÓN TRIFÁSICA ESTRELLA-ESTRELLA

Las fuentes con tres fases o trifásicas, tienen tres terminales llamados terminales de línea, y pueden tener o no un cuarto terminal, el neutro. Una fuente trifásica con neutro puede ser representada por tres fuentes ideales de tensión conectadas en Y, tal como se muestra en la figura 1.10

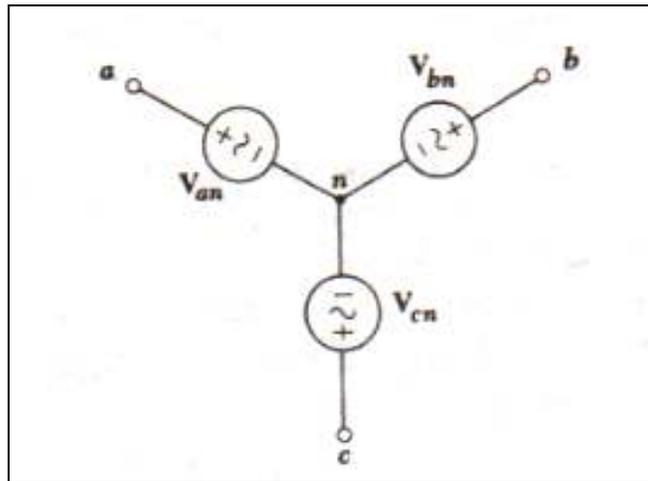


FIGURA 1.10 FUENTE TRIFÁSICA CONECTADA EN Y

Se dispone de los terminales que se indican con las letras a, b, c y n. Consideraremos únicamente fuentes trifásicas equilibradas, las cuales pueden ser definidas como las que tienen

$$|V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| \quad \dots\dots\dots (1.27)$$

$$y \quad V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \dots\dots\dots (1.28)$$

Estas tres tensiones, cada una de ellas tomada entre una línea y el neutro, se llaman tensiones de fase. Si elegimos arbitrariamente V_{an} como la de referencia:

$$V_{an} = V_p \angle 0^\circ \quad \dots\dots\dots (1.30)$$

en donde consecuentemente utilizaremos una V_p para representar la magnitud rms de cualquiera de las tensiones de fase, la definición de fuente trifásica nos da estos dos pares de expresiones:

$$V_{bn} = V_p \angle -120^\circ \quad y \quad V_{cn} = V_p \angle -240^\circ \quad \dots\dots\dots (1.31)$$

$$V_{bn} = V_p \angle 120^\circ \quad y \quad V_{cn} = V_p \angle 240^\circ \quad \dots\dots\dots (1.32)$$

1.4.1. SECUENCIA DE FASE POSITIVA Y NEGATIVA

En la ecuación anterior, al primero se le llama secuencia de fase positiva, o secuencia *abc* de fase, y esta representado en la figura 1.11(a); el segundo se denomina secuencia de fase negativa, o secuencia *cba* de fase y está indicado en el diagrama fasorial de la figura 1.11(b), es evidente que la secuencia de fase de una fuente trifásica física depende de la elección arbitraria de los tres terminales a los que se les va a adjudicar las letras a, b y c. Siempre pueden elegirse de modo que proporcionen una secuencia de fase positiva.

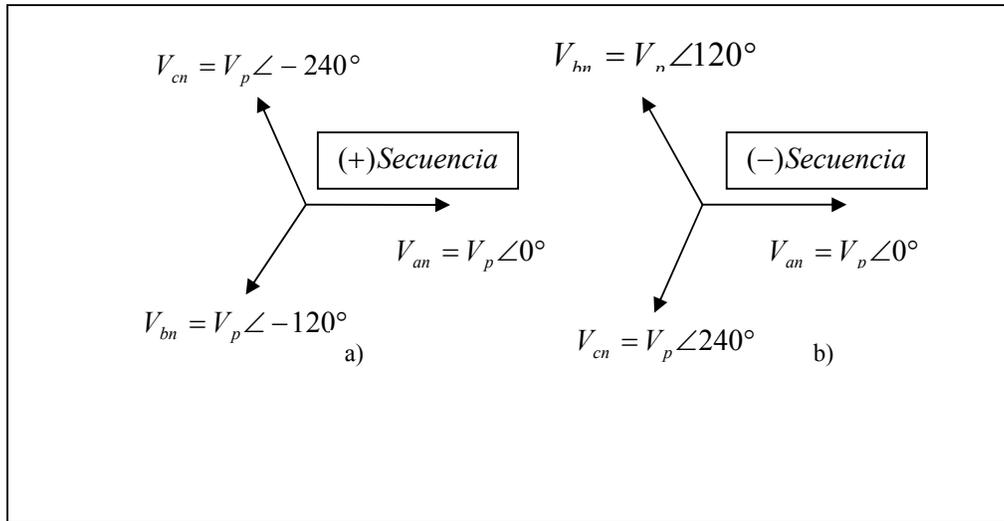


FIGURA 1.11 (a) SECUENCIA DE FASE POSITIVA O ABC
(b) SECUENCIA DE FASE NEGATIVA O CBA

Hallemos seguidamente las tensiones de línea a línea (o simplemente las tensiones de “línea”) presentes cuando se escogen como tensiones de fase las de la figura 1.11 (a). Resulta más fácil hacerlo con la ayuda de un diagrama fasorial, ya que todos los ángulos son múltiplos de 30° . La construcción necesaria se muestra en la figura 1.12; los resultados son:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_p \angle 30^\circ \dots\dots\dots(1.33)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3} V_p \angle -90^\circ \dots\dots\dots(1.34)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3} V_p \angle -210^\circ \dots\dots\dots(1.35)$$

La ley de tensiones de Kirchhoff exige que la suma de estas tres tensiones sea cero, y realmente es cero.

Llamando voltaje VL a la magnitud de cualquiera de las tensiones de línea, una de las más importantes características de una fuente trifásica conectada en Y se puede expresar como:

$$V_L = \sqrt{3} V_p \dots\dots\dots(1.36)$$

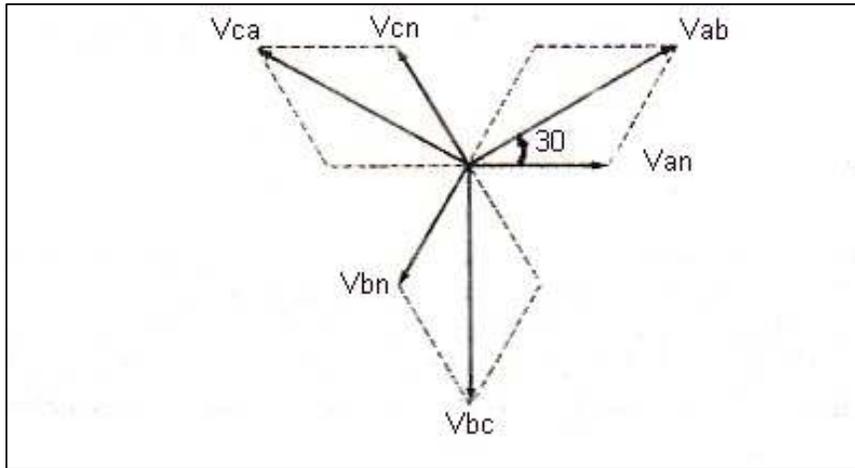


FIGURA 1.12 DIAGRAMA FASORIAL QUE SE UTILIZA PARA DETERMINAR LAS TENSIONES DE LÍNEA A PARTIR DE LAS TENSIONES DE FASE DADAS

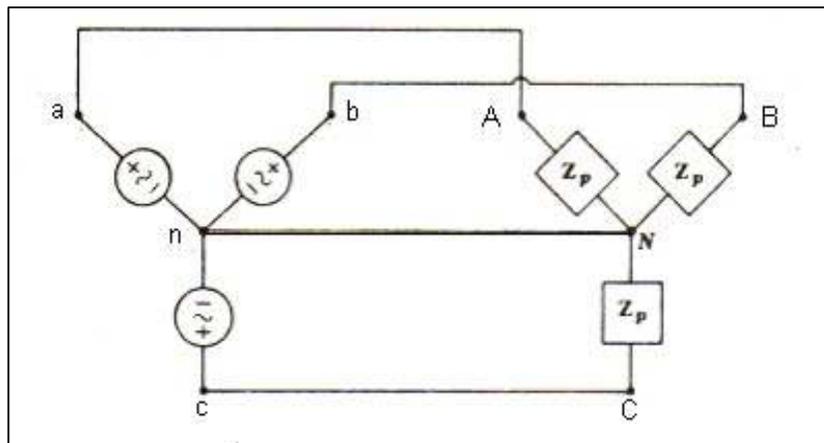


FIGURA 1.13 SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO, CONECTADO EN Y-Y E INCLUYENDO UN NEUTRO

Nótese que con secuencia de fase positiva V_{an} se adelanta en V_{bn} y esta se adelanta a V_{cn} , 120° en cada caso y también que V_{ab} se adelanta a V_{bc} y V_{bc} se adelanta a V_{ca} , también en 120° . Esta afirmación es también cierta para la secuencia negativa sólo con sustituir “adelantar” por “atrasar”.

1.4.2. CARGA TRIFÁSICA CONECTADA EN ESTRELLA

Conectemos ahora a nuestra fuente una carga trifásica conectada en Y, utilizando tres líneas y un neutro, tal como se muestra en la figura 1.13. La carga esta representada por una impedancia Z_p entre cada línea y el neutro. Las tres corrientes de línea se determinan con mucha facilidad, puesto que realmente tenemos tres circuitos de una sola fase que poseen un conductor común:

$$I_{aA} = \frac{V_{an}}{Z_p} \dots\dots\dots(1.37)$$

$$I_{bB} = V_{bn} / Z_p = V_{an} \angle -120^\circ / Z_p = I_{aA} \angle -120^\circ \dots\dots\dots(1.38)$$

$$I_{cC} = I_{aA} \angle -240^\circ \dots\dots\dots(1.39)$$

$$\text{Y por lo tanto, } I_{Nn} = I_{aA} + I_{bB} + I_{cC} = 0 \dots\dots\dots(1.40)$$

De este modo, si tanto la fuente como la carga están equilibradas y si los cuatro conductores tienen impedancia cero, por el neutro no pasa corriente alguna. ¿Cómo se modifica esto si se inserta una impedancia Z_L en serie con cada una de las tres líneas, y una impedancia Z_n en el neutro? Evidentemente, las impedancias de línea se pueden combinar con las tres impedancias de carga, dando por resultado unas cargas efectivas que continúan equilibradas y el conductor perfecto, utilizado como neutro, puede quitarse. Por tanto, no se produce ninguna variación en el sistema con un cortocircuito o un circuito abierto entre n y N , se puede incluir en el neutro cualquier impedancia sin que la corriente que por él pasa deje de ser cero.

De aquí se deduce que, si tenemos fuentes equilibradas, cargas equilibradas, e impedancias equilibradas, un conductor neutro de cualquier impedancia se puede sustituir por cualquier otra impedancia, incluyendo un corto circuito y un circuito abierto. Es a menudo útil imaginarse un corto circuito entre los dos puntos neutros; el problema se reduce entonces a tres circuitos idénticos con una sola fase. Entonces, el siguiente problema se resuelve por fases.

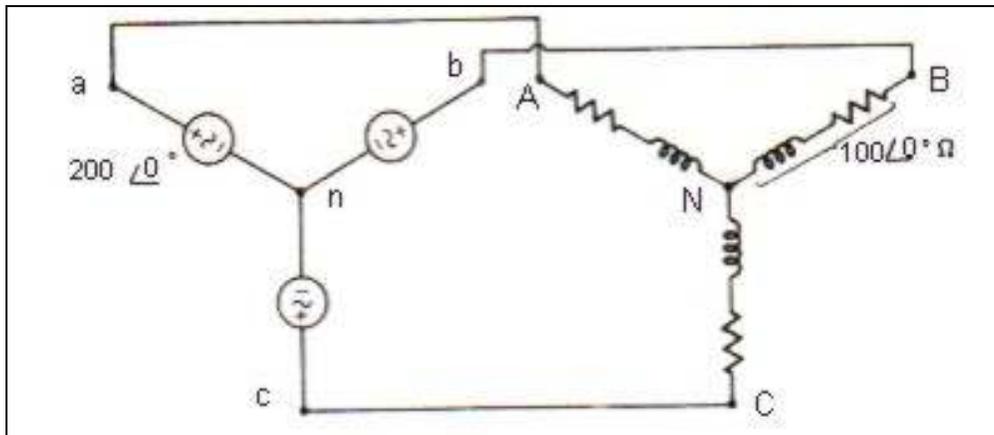


FIGURA 1.14 SISTEMA TRIFÁSICO CON TRES CONDUCTORES EQUILIBRADO Y CONECTADO EN Y-Y.

1.4.3. SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO CONECTADO EN Y-Y

Los siguientes problemas se refieren a sistemas trifásicos equilibrados conectados en Y-Y. Un problema directo se sugiere en el circuito de la figura 1.14; Por lo que se puede hallar las distintas corrientes y tensiones existentes por todo el circuito y la potencia total.

Puesto que se nos da una de las tensiones de fase de la fuente y, puesto que se supone una secuencia de fase positiva, las tres tensiones de fase son:

$$V_{an} = 200\angle 0^\circ, \quad V_{bn} = 200\angle -120^\circ, \quad V_{cn} = 200\angle -240^\circ$$

La tensión de línea es $200\sqrt{3}$, o 346 Voltios rms; el ángulo de fase de cada tensión de línea se puede determinar construyendo el diagrama fasorial como anteriormente. En realidad se puede aplicar el diagrama fasorial de la figura 1.12, y V_{ab} es $346\angle 30^\circ$ Volts.

Operemos ahora con la fase A. La corriente de línea es:

$$I_{aA} = \frac{V_{an}}{Z_p} = \frac{200\angle 0^\circ}{100\angle 60^\circ} = 2\angle -60^\circ \text{ Arms}$$

Y, por lo tanto, la potencia absorbida por esta fase es,

$$P_{AN} = 200(2) \cos (0^\circ + 60^\circ) = 200 \text{ W}$$

En consecuencia, la potencia total absorbida por la carga trifásica es 600 vatios. El problema se completa dibujando un diagrama fasorial y leyendo en él los ángulos de fase apropiados que corresponden a las otras tensiones y corrientes de línea. El diagrama completo está representado en la figura 1.15.

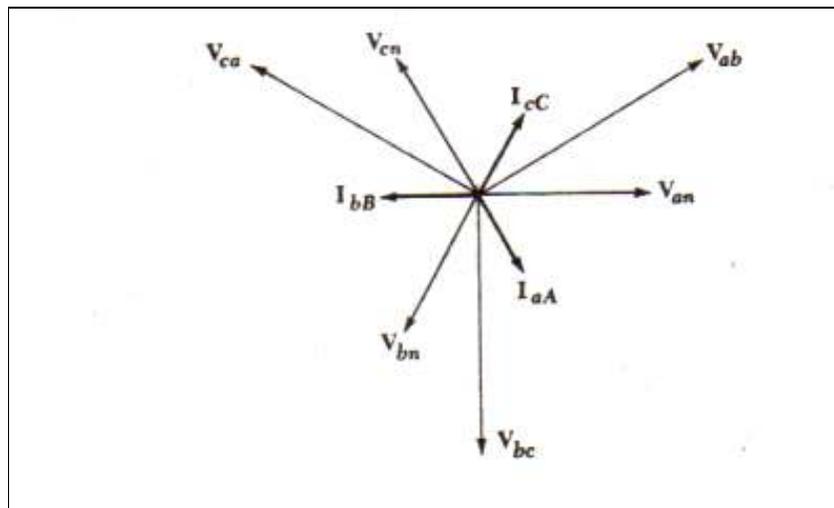


FIGURA 1.15 DIAGRAMA FASORIAL APLICABLE AL CIRCUITO DE LA FIGURA 1.14

Podemos también utilizar el método por fases para resolver problemas que podríamos llamar inversos. Supóngase que tenemos un sistema trifásico equilibrado con una tensión de línea de 300 voltios rms, y sabemos que está proporcionando 1.200 W con un factor de potencia de 0,8 adelantado a una carga equilibrada conectada en Y. ¿cuáles son la corriente de línea y la impedancia de carga por fase? Es evidente que la tensión de fase es $300/\sqrt{3}$ voltios rms y la potencia por fase es 400 vatios. Por tanto, la corriente de línea se puede hallar a partir de la expresión de la potencia.

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(1.41)$$

$$P_f = V_f * I_L * \cos\theta \dots\dots\dots(1.42)$$

$$400 = \frac{300}{\sqrt{3}}(I_L)(0.8)$$

de donde la corriente de línea es 2.89 Amper rms.

La impedancia de fase está dada por:

$$|Z_p| = \frac{V_p}{I_L} = \frac{300}{2.89} = 60\Omega$$

Como el factor de potencia es 0.8 adelantado, el ángulo de fase de la impedancia es:

$$- 36.8 \quad \text{y} \quad Z_p = 60 \angle -36.8^\circ$$

Se pueden manejar fácilmente cargas más complicadas, ya que los problemas se reducen a otros más simples de una sola fase. Supóngase que al sistema anterior se le añade una carga de alumbrado equilibrada de 600 vatios. Primeramente se hace un esbozo de un adecuado circuito por fases, tal como se muestra en la figura 1.16. La magnitud de la corriente de iluminación está determinada por:

$$200 = \frac{300}{\sqrt{3}} |I_1| \cos 0^\circ \quad \text{y} \quad |I_1| = 1.155$$

De manera análoga, se encuentra que la magnitud de la corriente de carga capacitiva no ha variado de su valor anterior,

$$|I_2| = 2.89$$

Si suponemos que la fase con la que estamos operando tiene una tensión de fase con un ángulo de 0°, entonces:

$$I_1 = 1.155 \angle 0^\circ \quad \text{y} \quad I_2 = 2.89 \angle + 36.8^\circ$$

Y la corriente de línea es:

$$I_L = I_1 + I_2 = 3.87 \angle +26.6^\circ \text{ A rms}$$

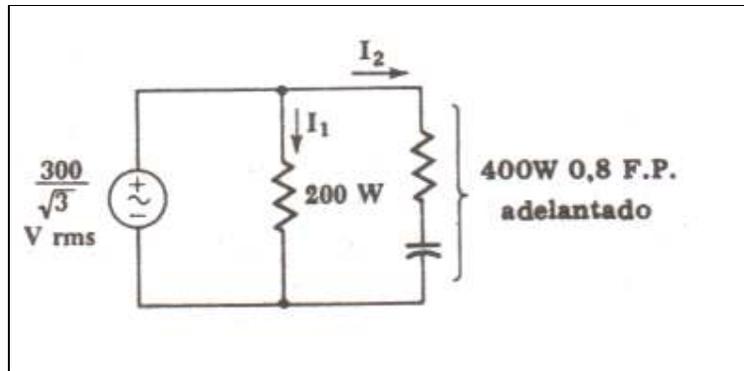


FIGURA 1.16 CIRCUITO POR FASES QUE SE UTILIZA PARA RESOLVER UN EJEMPLO TRIFÁSICO EQUILIBRADO

La potencia generada por esta fase de la fuente es por tanto,

$$P_p = \frac{300}{\sqrt{3}} * 3.87 * \text{Cos}(+ 26.6^\circ) = 600W$$

Lo que esta de acuerdo con la hipótesis original.

Si en un sistema trifásico equilibrado se tiene una carga sin equilibrar conectada en Y, el circuito puede todavía analizarse por el método por fases si existe conductor neutro y si este tiene una impedancia cero. Si alguna de estas condiciones no se cumple, deberán utilizarse otros métodos. Un ingeniero que emplee la mayor parte de su tiempo con sistemas trifásicos sin equilibrar, encontrara que ahorra mucho tiempo utilizando componentes simétricas.

1.5. CONEXIÓN TRIFÁSICA DELTA

Una carga trifásica es más adecuada para ser conectada en delta que en Y. Una razón para ello, por lo menos en el caso de una carga desequilibrada, es la flexibilidad con que una carga puede añadirse o quitarse en una sola fase. Esto es difícil (o imposible) de realizar con una carga con tres conductores conectada en Y. Una carga equilibrada conectada en Δ que consiste en una impedancia Z_p insertada entre cada par de líneas. Supondremos un sistema con tres conductores:

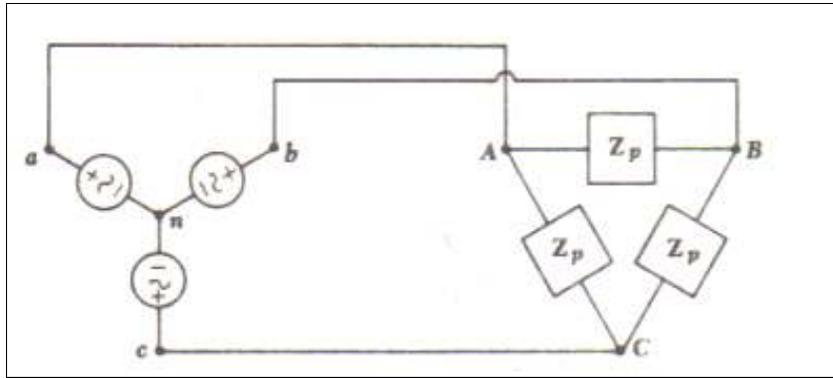


FIGURA 1.17 SISTEMA TRIFÁSICO CON TRES CONDUCTORES CON UNA CARGA CONECTADA EN DELTA EQUILIBRADA, LA FUENTE ESTA CONECTADA EN ESTRELLA

Por razones obvias. Con referencia en la figura 1.17, supongamos conocidas las tensiones de línea,

$$V_L = |V_{ab}| = |V_{bc}| = |V_{ca}| \dots\dots\dots(1.43)$$

O las tensiones de fase $V_p = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| \dots\dots\dots(1.44)$

En donde:

$$V_L = \sqrt{3} V_p \dots\dots\dots(1.45)$$

y $V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^\circ \dots\dots\dots(1.46)$

Y así sucesivamente, como antes. Puesto que la tensión a través de cada rama de la Δ es conocida, se hallan las corrientes de fase,

$$I_{AB} = \frac{V_{ab}}{Z_p} \dots\dots\dots(1.47)$$

$$I_{BC} = \frac{V_{bc}}{Z_p} \dots\dots\dots(1.48)$$

$$I_{CA} = \frac{V_{ca}}{Z_p} \dots\dots\dots(1.49)$$

Y sus diferencias nos proporcionan las corrientes de línea, como:

$$I_{aA} = I_{AB} - I_{CA} \dots\dots\dots(1.50)$$

Las tres corrientes de fase son de igual magnitud

$$I_p = |I_{AB}| = |I_{BC}| = |I_{CA}| \dots\dots\dots(1.51)$$

Las corrientes de línea son también iguales en magnitud. Esto es debido a que las corrientes de fase son iguales en magnitud y necesariamente defasadas 120°. En el diagrama fasorial de la figura 1.18 la simetría es evidente. Así pues, tenemos:

$$I_L = |I_{aA}| = |I_{bB}| = |I_{cC}| \dots\dots\dots(1.52)$$

$$Y \quad I_L = \sqrt{3} I_p \dots\dots\dots(1.53)$$

Olvidemos la fuente por el momento y consideremos sola la carga equilibrada. Si la carga está conectada en Δ , la tensión de fase y la tensión de línea son la misma, pero la corriente de línea es mayor que la de fase por un factor $\sqrt{3}$; en cambio, con una carga conectada en Y, la corriente de fase y la de línea son la misma, y es la tensión de línea la que es mayor que la de fase por un factor $\sqrt{3}$.

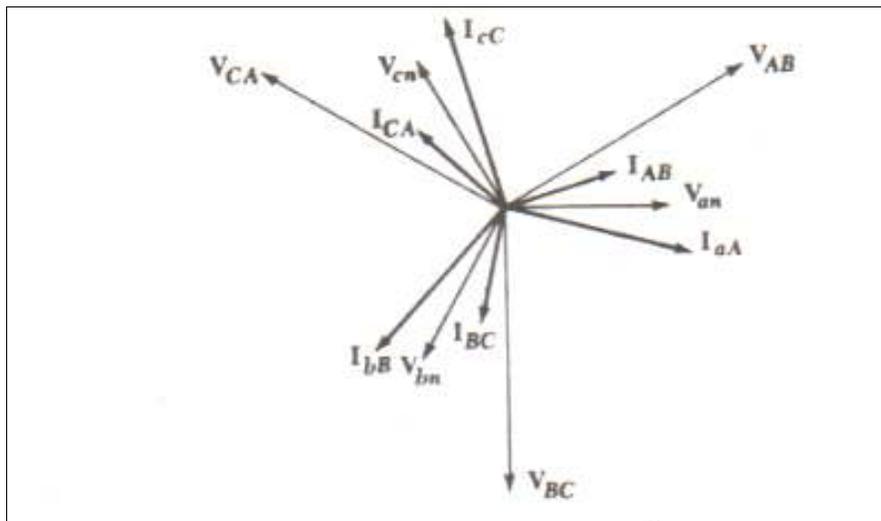


FIGURA 1.18 DIAGRAMA FASORIAL QUE PUEDE APLICARSE AL CIRCUITO DE LA FIGURA 1.17 SI Z_p ES UNA IMPEDANCIA INDUCTIVA

La solución de los problemas se alcanza rápidamente si los factores $\sqrt{3}$ se usan con propiedad. Un ejemplo numérico típico: se trata de determinar la magnitud de la corriente de línea en un sistema trifásico de 300 voltios rms que suministra 1.200 vatios a una carga conectada en Δ con un factor de potencia de 0.8, retrasado. Considerando una sola fase. Esta absorbe 400 vatios con un factor de potencia de 0.8, retrasado y con una tensión de línea de 300 voltios. Por tanto,

$$400 = 300 (I_p) (0.8) \quad y \quad I_p = 1.667 \text{ A rms}$$

Y la relación entre corrientes de fase y corrientes de línea nos da:

$$I_L = \sqrt{3} (1.667) = 2.89 \text{ A rms}$$

Además, la impedancia en cada fase debe ser,

$$Z_p = \frac{300}{1.667} \angle \cos^{-1} 0.8 = 180 \angle 36.8^\circ \Omega$$

Cambiando el enunciado del problema: la carga está conectada en Y en vez de Δ . En el método por fases, tenemos ahora una tensión de fase de $300 / \sqrt{3}$ voltios, una potencia de 400 vatios y un factor de potencia de 0.8, retrasado. Por tanto,

$$400 = \frac{300}{\sqrt{3}} * I_p * 0.8$$

$$\text{y } I_p = 2.89 \quad \text{o} \quad I_L = 2.89 \text{ A rms}$$

La impedancia en cada fase de Y es:

$$Z_p = \frac{300}{2.89} \angle \cos^{-1} 0.8 = 60 \angle 36.8^\circ \Omega$$

Debiendo notarse que las impedancias Y y Δ se encuentran relacionadas correctamente de acuerdo con la transformación Y- Δ .

El factor $\sqrt{3}$ no solamente relaciona los valores de línea y de fase, sino que también aparece en una útil expresión para la potencia total extraída por una carga trifásica equilibrada cualquiera. Si suponemos una carga trifásica conectada en Y con un ángulo θ de factor de potencia, se tiene que la potencia tomada por una fase es:

$$P_p = V_p I_p \cos \theta \dots\dots\dots(1.54)$$

$$P_p = V_p I_L \cos \theta \dots\dots\dots(1.55)$$

$$P_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} * I_L * \cos \theta \dots\dots\dots(1.56)$$

Y la potencia total

$$P = 3 P_p \dots\dots\dots(1.57)$$

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \dots\dots\dots(1.58)$$

De un modo análogo, la potencia entregada a cada fase de una carga conectada en Δ es

$$P_p = V_p I_p \cos \theta \dots\dots\dots(1.59)$$

$$P_p = V_L I_p \cos \theta \dots\dots\dots(1.60)$$

$$P_p = V_L * \frac{I_L}{\sqrt{3}} * \cos \theta \dots\dots\dots(1.61)$$

Y la potencia total

$$P = 3 P_p \dots\dots\dots(1.62)$$

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \dots\dots\dots(1.63)$$

Por tanto, la ecuación anterior nos permite calcular la potencia total entregada a una carga conociendo la magnitud de la tensión y de la corriente de línea y del ángulo de fase de la impedancia (o admitancia) de la carga. El ejemplo numérico anterior se puede resolver en un renglón:

$$1200 = \sqrt{3} (300) (I_L) (0.8)$$

Por consiguiente,

$$I_L = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2.899 Arms$$

La fuente también puede conectarse en Δ . Sin embargo, esto no es corriente, ya que un ligero desequilibrio en las fases de la fuente puede producir la circulación de corrientes importantes alrededor del lazo Δ . Como ejemplo, llamemos V_{ab} , V_{bc} , y V_{cd} a las tres fuentes de una sola fase. Antes de cerrar la delta conectado d con a, determinemos el desequilibrio midiendo la suma $V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$. Supóngase que el valor resultante es solamente el 1% de la tensión de línea. La corriente que circula es, por tanto, aproximadamente, el 1/3 % de la tensión de línea dividida por la impedancia interna de cualquiera de las fuentes. ¿Qué valor puede alcanzar esta impedancia? Este valor debe depender de la corriente que se espera que produzca la fuente con una caída despreciable en la tensión entre terminales. Si suponemos que el valor máximo de esta corriente produce una caída de un 1% en la tensión entre terminales, se tiene entonces que la corriente que circula en un tercio de la corriente máxima. Esto reduce la capacidad de corriente útil de la fuente y aumenta también las pérdidas en el sistema.

CAPITULO II

CALIDAD DE LA ENERGÍA

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS RELACIONADOS CON EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

En México, el suministro de energía eléctrica a los usuarios, está regido por la ley del servicio público y su reglamento, en donde se especifican los límites superior e inferior del voltaje de suministro en el punto de entrega al usuario. La entrega de voltajes fuera de estos límites se considera anomalía o deficiencia del suministro. Históricamente, la calidad de la energía no ha sido un problema mayor, hasta hace poco tiempo, en forma genérica, se consideraba que excepto por la continuidad, el suministro para la mayoría de los usuarios de la energía eléctrica era completamente satisfactorio. Sin embargo, el incremento masivo que se ha tenido en la utilización de equipo basado en electrónica de potencia, ha creado un doble problema para el suministrador:

1. En primer lugar, este equipo, en común con cualquier dispositivo que incorpora electrónica de potencia, es sensible a las variaciones rápidas del voltaje, como son los abatimientos del voltaje (deficiencias del voltaje suministrado).
2. En segundo lugar, este tipo de equipo genera distorsión armónica y, bajo ciertas condiciones, puede deteriorar la magnitud y forma de onda del voltaje suministrado, a tal grado que sea inadecuado para la mayoría de los usuarios que comparten esa misma fuente de suministro.

La sociedad actual es dependiente del comportamiento de sus dispositivos motorizados e informatizados. Cuando suceden anomalías en el suministro de la energía eléctrica, el comportamiento de estos sistemas se ve afectado, los beneficios económicos y de bienestar que proporciona la tecnología se eliminan y se desprenden numerosos problemas, tanto para la empresa suministradora como para sus usuarios. El suministrador, usualmente atribuye los problemas a anomalías en la instalación del usuario, mientras que el usuario, normalmente asocia los problemas a deficiencias en las redes de suministro. En la mayoría de las veces, ambos olvidan las limitaciones que tienen los equipos electrónicos sensibles para operar en el ambiente de las redes eléctricas tradicionales de ambos.

Por lo anterior, el conocimiento de las características de la calidad de la energía de los sistemas eléctricos del suministrador y del usuario es esencial para establecer acciones económicas, tanto por parte del suministrador como del usuario, que permitan el control de los efectos no deseables.

Existen tres cambios fundamentales en la naturaleza de la carga del usuario y del sistema de potencia, que conciernen a la calidad de la energía:

1. La microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas a nivel residencial, comercial e industrial, que son muy sensibles a las variaciones de la calidad de la energía. Los esquemas de diseño de integración a gran escala y a muy gran escala de los microprocesadores modernos, han resultado en dispositivos más rápidos, más complejos y con mayor capacidad de memoria para una misma superficie. La lógica para estos circuitos requiere de niveles de tensión y de energía menores, reduciendo el consumo de potencia y, por lo tanto, los requerimientos de ventilación.

2. La electrónica de potencia ha producido una nueva generación de dispositivos de alta capacidad y bajo costo, lo que ha extendido su utilización. Sin embargo, estos mismos dispositivos producen perturbaciones en la calidad de la energía, a los cuales la microelectrónica es sensible. Se estima que la porción de la energía eléctrica total generada para aquellas cargas procesadas por electrónica de potencia se incrementará de un nivel actual de 20-30 % al 50-60% en el año 2010.

3. Mientras que estos cambios dramáticos se están dando en las cargas, las empresas eléctricas y los clientes industriales continúan aplicando capacitores para la corrección del factor de potencia, para controlar el voltaje y reducir el flujo de reactivos. Estos capacitores influyen en los muchos tipos de problemas a incrementar los niveles de armónicas, dependiendo de los parámetros del sistema.

La proliferación de las cargas y fuentes no lineales se ha dado en ausencia de normas completas que limiten las señales armónicas, que el sistema de potencia debe ser capaz de soportar y que las empresas eléctricas puedan absorber. Esta situación conduce a problemas de calidad de la energía, tanto para las empresas eléctricas como para sus clientes: la caracterización de las fuentes de "energía sucias" y los requisitos de "energía limpia" para cargas sensibles. Lo anterior, demanda el establecimiento de guías y normas que seguramente requerirán de evaluaciones técnicas y económicas exhaustivas.

Adicionalmente a los tres cambios descritos anteriormente, los problemas de calidad de energía se han agravado, debido a la combinación de las siguientes tendencias:

- a) Una mayor utilización de equipo para procesamiento de datos y comunicaciones.
- b) Los equipos eléctricos modernos se han vuelto más sensibles al voltaje: los diseños y componentes están en sus límites; se acabaron los diseños sobrados.
- c) El número de disturbios eléctricos se ha incrementado, pues la demanda ha crecido más rápido que la generación.

2.2 ¿QUÉ ES LA CALIDAD DE LA ENERGÍA?

La definición de la "calidad de la energía" es algo indeterminado. Pero que se puede definir como una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario; esto concierne a la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua. En años recientes, esta atención ha sido de mayor importancia, debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales, por sí solas, resultan ser una causa de degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, para su uso en la iluminación, la operación de diversos equipos, vídeo, aire acondicionado y sistemas de cómputo. La energía eléctrica se ha empleado en la fabricación de la mayoría de las cosas que utilizamos. Por consiguiente, los disturbios y variaciones de voltaje que se producen, tienden a afectarnos de alguna u otra manera.

Podemos decir que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad.

No existe un consenso en la terminología que define los disturbios más comunes que afectan la calidad de la energía. A continuación, se describen los términos más utilizados y aceptados en este campo, tanto por fabricantes como usuarios de equipo de monitoreo de la calidad de la energía.

2.3 FUENTES DE DISTURBIOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN.

2.3.1 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE

Significa una disminución momentánea en la magnitud del voltaje RMS, con una duración que va desde 10 ms (0.6 ciclos) hasta 2.5 seg. (150 ciclos), causado por una falla remota en algún lugar del sistema de potencia. También existen las elevaciones de tensión ("swells") que no son tan comunes. Las condiciones de alto o bajo voltaje pueden representarse en circuitos durante la desconexión de cargas de gran tamaño o durante períodos de sobrecargas, respectivamente. Figura 2.1.

Una depresión severa ("sags"), se define como aquella menor que el 85% de la tensión nominal. Si estas condiciones se presentan con frecuencia o durante períodos prolongados, pueden dar lugar a envejecimiento de componentes electrónicos en sistemas digitales y errores durante el almacenamiento o lectura de la información. Su presencia puede, algunas veces, detectarse visualmente al presentarse ("parpadeo") o disminución del nivel

de iluminación en lámparas, o reducción ("encogimiento") del área de despliegue en monitores de televisión o computadoras. Figura 2.2.

FLUCTUACIONES DE VOLTAJE

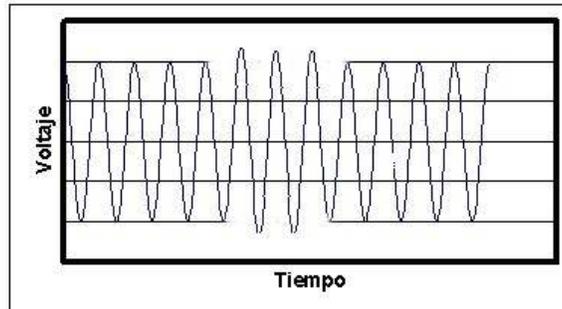


FIGURA 2.1 AMPLIFICACIÓN (swells)

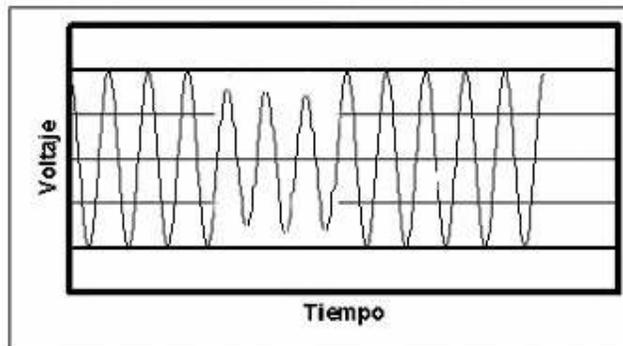


FIGURA 2.2 DEPRESIÓN (sags)

Las figuras 2.1 y 2.2 Representan fluctuaciones de voltaje causadas por condiciones de fallas remotas y conexión o desconexión de grandes cargas.

2.3.2 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS

Estas se presentan en forma de impulsos de voltaje de corta duración, superpuestos en la señal de alimentación y frecuentemente intermitentes, con una duración menor a dos milisegundos. Los impulsos pueden tener su origen en las descargas atmosféricas, en maniobra de interruptores y al conectar o desconectar capacitores para la corrección del factor de potencia. Estos constituyen los llamados "picos" de voltaje.

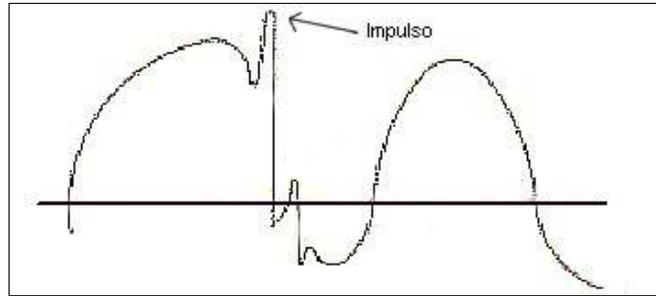


FIGURA 2.3 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS

A diferencia de las sobretensiones temporales y exceptuando el caso crítico de rayos muy cerca de las instalaciones que producen chispas en los contactos, estas sobretensiones no presentan una indicación clara de su existencia, que pueda detectarse visualmente en circuitos de alumbrado o en alguna otra forma. Sin embargo, dado que su nivel puede llegar a alcanzar valores de cinco veces o más el voltaje nominal, su efecto consiste en aplicar esfuerzos excesivos al aislamiento de diversos equipos o disturbios a componentes electrónicos sensibles. Esto último puede traer como consecuencia la interrupción de programas en procesos de computadoras, pérdida de información almacenada en memoria o daño a los elementos mismos (hardware). Otros factores transitorios, dentro de esta clasificación, son las operaciones de conexión y desconexión de motores eléctricos en elevadores, equipos de aire acondicionado, refrigeradores, etcétera.

2.3.3 INTERRUPCIONES DE ENERGÍA

Las interrupciones instantáneas de energía, provocadas por una condición de falla del aislamiento después de una operación exitosa del equipo de restablecimiento pueden tener una duración de hasta varios ciclos.

Las interrupciones temporales de energía, generalmente ocurren por algún disturbio en el sistema eléctrico (fallas en el sistema de potencia, accidentes que involucran la red de distribución, fallas de transformadores o generadores) o por sobrecargas en la red de baja tensión. Su duración puede ser desde algunos milisegundos hasta varias horas

2.3.4 RUIDO ELÉCTRICO (INTERFERENCIA)

Una forma común de disturbios en sistemas de cómputo es el ruido eléctrico, generado por sistemas de transmisión de señales de radio, operación de lámparas fluorescentes y controladores de atenuación de niveles de iluminación (Fig. 2.4). Este tipo de ruido puede afectar la operación de computadoras al producir diversos problemas durante la ejecución de programas.

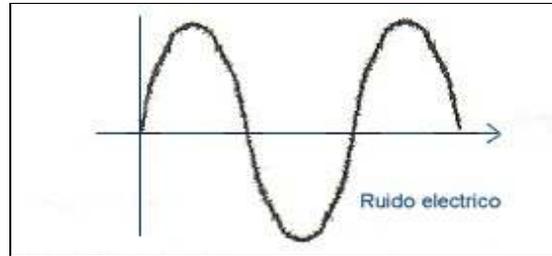


FIGURA 2.4 RUIDO ELÉCTRICO

2.3.5 ARMÓNICAS

Significa simplemente que la forma de onda de la tensión (o corriente) no es una senoidal pura. Esto resulta de la adición de una o más ondas armónicas que se superponen a la onda fundamental o de 60 Hz. La aparición creciente de cargas no lineales en sistemas de distribución, tales como convertidores estáticos de potencia, controladores de motores con rectificadores controlados de silicio, hornos de arco en aplicaciones industriales, etcétera; ha traído como consecuencia un aumento notable del contenido de componentes armónicas, que se manifiestan en forma de distorsiones diversas de la forma de onda del voltaje en la red de distribución, como se muestra en la Fig. 2.5. Los consumidores ubicados cerca de instalaciones industriales o aquellos que tienen alguna carga no lineal, pueden ver expuestos sus equipos sensibles a esfuerzos excesivos o a una operación inadecuada.

En el ámbito industrial, la utilización de capacitores para corregir el factor de potencia puede proporcionar, en algunas circunstancias, la aparición de condiciones de resonancia entre los capacitores y la inductancia de los transformadores. La existencia de armónicas en la red de distribución provoca aumento de las pérdidas en equipos por efecto Joule, con el consecuente aumento de temperatura, sobre esfuerzo en aislamientos y disturbios provocados por interferencia en circuitos de control, de protecciones y en sistemas de telecomunicaciones.

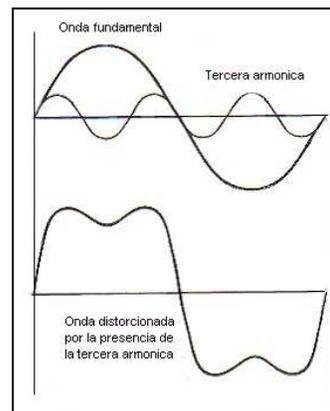


FIGURA 2.5 DISTORSIÓN ARMÓNICA

2.4 ¿CÓMO AFECTA LA CALIDAD DE LA ENERGÍA LA OPERACIÓN DEL EQUIPO ELÉCTRICO?

La calidad de la energía, es el grado en el cual la utilización y el suministro de potencia eléctrica afectan la operación del equipo eléctrico. Otra forma usual para describir la calidad de la energía es en términos de voltaje. Cualquier desviación de la magnitud o frecuencia de la onda senoidal de voltaje puede ser considerada como un disturbio en la calidad de energía.

1. Cuando se usan estas definiciones, es importante no pasar por alto los siguientes factores:

- Rango de "aceptación" en el diseño de equipos eléctricos sensibles y compatibles con el sistema.
- Selección, instalación y conexión a tierra de equipos eléctricos.

La mejor medición de la calidad de la energía es la capacidad del equipo eléctrico para operar de una manera satisfactoria, dándole su propio cuidado y mantenimiento.

2. La carga deberá ser seleccionada y adaptada para ser compatible con el sistema eléctrico.

3. El desarrollo de mediciones y las guías de operación para elegir equipo eléctrico deben estar definidas en normas, políticas y procedimientos.

4. La calidad de la energía es un tema cada vez de mayor importancia, dependiendo de la frecuencia de los problemas experimentados por el usuario final.

5. Los factores que más contribuyen a los problemas asociados con la calidad de la energía son los siguientes:

- Cargas sensibles.
- Complejidad de equipos e instalaciones.
- Equipos que provocan disturbios.

2.4.1 CONSIDERACIONES SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se sabe, la potencia eléctrica se genera en varias centrales distantes entre sí y de los centros de consumo, eléctrica y geográficamente se envía hacia los centros de consumo en alta tensión a través del sistema de transmisión, de donde se toma del sistema de transmisión y se envía por medio del sistema de subtransmisión hacia las redes de distribución donde se reparte localmente.

El voltaje del sistema local de distribución se reduce a un nivel apropiado y se conecta a la acometida del usuario.

- LOS NIVELES DE VOLTAJE Y CONFIGURACIONES

La energía suministrada al usuario puede ser monofásica o trifásica.

La energía monofásica se suministra usualmente para usuarios residenciales, de oficina y comercios pequeños.

El nivel de voltaje típico para la alimentación monofásica es de 127/220 V.

La alimentación trifásica se proporciona generalmente a usuarios comerciales, agrícolas e industriales de consumos mayores.

Los niveles de energía para alimentaciones trifásicas para usuarios comerciales e industriales en baja tensión son de 220, 440 y 480 volts, medidos de fase a fase.

El equipo rotatorio, tal como motores y otros equipos de potencia considerable, requieren de alimentación trifásica para operar, pero muchas cargas requieren únicamente alimentación monofásica, que se obtiene de la trifásica, conectando la carga entre dos fases o de una fase al conductor neutro.

De la conexión para la obtención de diferentes niveles de voltaje, pueden resultar distintos esquemas.

2.4.2 LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA AL USUARIO

La alimentación eléctrica llega al usuario a través de la acometida y pasa a través del medidor al centro de carga (también llamado "caja de fusibles", "tablero de interruptores", etcétera).

En muchas aplicaciones, varios usuarios están conectados al mismo centro de carga.

En sistemas de distribución grandes, estos centros de carga pueden alimentar a su vez a otros centros de carga.

Se usa transformador si se requiere un voltaje diferente o aislarse del resto del sistema de distribución.

El transformador crea efectivamente un nuevo sistema de alimentación, un nuevo punto de conexión a tierra neutro.

2.4.3 LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA Y EL EFECTO DE LA CONEXIÓN A TIERRA

De acuerdo a investigaciones recientes, la mayoría de los problemas de calidad de la energía se deben a una inapropiada o inefectiva forma de distribución de la energía

eléctrica y la conexión a tierra dentro de las instalaciones del usuario. Los problemas típicos por la conexión a tierra y distribución resultan de los siguientes aspectos:

1. Alambrado inapropiado, debido a la falta de compatibilidad entre tierra y conexión a tierra para seguridad.
2. Alta impedancia en el sistema de tierra.
3. Niveles excesivos de corrientes en el sistema de tierras, debidos a errores de alambrado, corriente de fuga, corrientes circulantes en el sistema de tierras y otros problemas.

Se debe entender que no obstante que el uso del equipo de corrección apropiado puede resolver los problemas de calidad de la energía, ello no resuelve por sí mismo los problemas ocasionados por la distribución propia del usuario y sus sistemas de conexión a tierra.

Es esencial que la distribución del usuario y su sistema de conexión a tierra sean diseñados e instalados apropiadamente y de acuerdo con las normas vigentes, para proveer la seguridad del personal y la correcta operación del equipo.

2.4.4 CONEXIÓN A TIERRA

La conexión a tierra es uno de los aspectos más importantes en un sistema de distribución eléctrica, pero también de los que menos importancia se les da.

En México, la CFE y Luz y Fuerza del Centro, establecen los códigos legales para las instalaciones eléctricas en los sistemas y la NOM-001-SEDE-2005 para las instalaciones eléctricas en general.

La conexión a tierra (Artículo 250, NOM-001-SEDE-2005) se ha establecido de una manera eficiente y sirve para los siguientes propósitos:

- Proteger la vida de un shock eléctrico y la propiedad de daños.
- Limitar el voltaje de un circuito cuando es expuesto a voltajes más altos de los que fue diseñado.
- En general, limitar el voltaje de un circuito de CA a 150 Volts o menos en circuitos de alambrado interior.
- Facilitar la operación de aparatos y sistemas eléctricos.
- Limitar el voltaje en un circuito en el que de otra forma se puede exponer a una descarga.
- A fin de tener lo anterior, se requiere una tierra efectiva y una conexión a tierra del equipo apropiado.

La conexión a tierra es frecuentemente mal interpretada, la confusión se debe al hecho de no definir adecuadamente los términos y/o a un mal entendimiento de los conceptos

básicos. Como consecuencia muchas prácticas de conexión a tierra provienen de opiniones y superstición. Para clarificar lo anterior a continuación se definirán algunos conceptos de los componentes del sistema de puesta a tierra.

1.- Tierra: el electrodo de tierra o el sistema electrodo de tierra en el código NEC, se refiere a la conexión geográfica de un edificio a tierra.

2.- Tierra para Rayos: éste subsistema puede ser al tiempo separado o parte del sistema del electrodo de tierra, el cuál provee protección contra descargas atmosféricas.

3.- Tierra de seguridad o conductor de puesta a tierra (cable desnudo): éste esquema de protección contra fallas eléctricas protege al personal y equipo contra sobrecargas eléctricas, éste es el sistema de conexión a tierra, en la terminología del código NEC.

4.- Neutral o Conductor puesto a tierra: éste conductor conectado a tierra es la trayectoria de diseño para el retorno de las corrientes de frecuencia de potencia, esto es en la terminología del código NEC.

5.- Tierra Aislada: Éste el sistema tierra (aislado) del código NEC o tierra del equipo, diseñado para proveer una tierra limpia libre de radiofrecuencias para la alimentación de corriente continua del sistema electrónico. Éste es el punto de referencia de voltaje cero para conjuntos de circuitos y datos.

6.- Tierra de señal: ésta tierra de referencia de señal es un medio para proveer la trayectoria de retorno de las corrientes de radiofrecuencia (RF), es la misma referencia de señal para todos los componentes de proceso de señal en el sistema digital.

Los primeros cuatro apartados se refieren a las prácticas de protección de personal y equipo, las cuales son reglamentos mandatorios establecidas por el NEC, los dos últimos apartados tratan sobre la integridad del sistema y la protección de los componentes de equipos y son un requisito para asegurar una operación correcta y una largo ciclo de vida para los sistemas digitales de alta velocidad.

2.4.5 CONEXIÓN A TIERRA EFECTIVA

Conexión a tierra efectiva establece el voltaje cero como referencia para un sistema de distribución eléctrico y provee protección para el sistema eléctrico y el equipo de voltajes superpuestos por descarga y contacto con sistemas de alto voltaje. La conexión a tierra previene la aparición de voltajes de tipo estático potencialmente peligrosos en un edificio.

Cuando se suministre energía desde la misma acometida de corriente alterna a dos o más edificios o estructuras, el sistema puesto a tierra (neutro) en cada edificio o estructura debe tener un electrodo de puesta a tierra (electrodo de tierra), conectado al envolvente metálico del medio de desconexión del edificio, y al conductor puesto a tierra (neutro) de la instalación de C.A., en el lado de alimentación del medio de desconexión del edificio.

Cuando el conductor de puesta a tierra del equipo, no vaya junto con los conductores del circuito de suministro, el tamaño nominal del conductor puesto a tierra de la instalación de C.A. en el lado de alimentación del medio de desconexión, no debe ser inferior al tamaño nominal especificado en la tabla 250-95 de la NOM-001-SEDE-2005 para los conductores de puesta a tierra de equipo. El electrodo de tierra más común es una varilla de acero recubierta de cobre.

Un sistema de alambrado de los usuarios que se alimenta por medio de un sistema de acometida de corriente alterna puesto a tierra debe tener en cada acometida un conductor de electrodo de puesta a tierra, el cual debe estar conectado al(los) electrodo(s) de puesta a tierra que cumpla(n) con lo establecido en la parte H del Artículo 250. El conductor de electrodo de puesta a tierra debe estar conectado al conductor puesto a tierra de la acometida en cualquier punto accesible del lado de la carga de la acometida aérea o subterránea incluyendo la terminal o barra a la que esté conectado el conductor puesto a tierra de la acometida en el medio de desconexión de la acometida. Cuando el transformador de alimentación de la acometida esté situado fuera del edificio, se debe hacer como mínimo otra conexión de puesta a tierra desde el conductor puesto a tierra de la acometida hasta el electrodo de puesta a tierra, ya sea en el transformador o en cualquier otro punto fuera del edificio. No se debe hacer ninguna conexión de puesta a tierra a ningún conductor puesto a tierra de circuitos en el lado de la carga del medio de desconexión de la acometida.

La resistencia a tierra debe ser tan baja como sea posible, lo que dará un buen funcionamiento al sistema de distribución y una buena protección al personal.

La conexión del sistema de distribución eléctrico a tierra se hace en la entrada del servicio.

El neutro del sistema de distribución se conecta a tierra en la entrada del servicio.

El neutro y la tierra también se conectan juntos al secundario del transformador en el sistema de distribución, donde el secundario forma un sistema aterrizado o en el generador de un sistema de emergencia.

El sistema puede ser aterrizado, si cuando se conecta a tierra el voltaje máximo a tierra no excede de 150 V.

Los anteriores son los únicos lugares donde se conecta a tierra el neutro y, cualquier otra conexión, sea intencional o no, puede ser peligrosa y traer problemas de calidad de la energía.

2.4.6 LOS COSTOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Los costos asociados con la solución o reducción de problemas de la calidad de la energía pueden variar, desde los costos reducidos como los asociados a revisar las conexiones

flojas de alambrado, hasta los muy altos, tales como comprar e instalar una fuente de potencia ininterrumpible o asegurando la compatibilidad de los circuitos de distribución.

Los costos asociados con la sensibilidad del equipo, emisión de disturbios e instalación suelen ser incluidos en la compra de cualquier producto eléctrico, por ejemplo, equipos productores de armónicas tienen incorporados sus propios filtros que, por supuesto, tienen costos asociados.

Aún si no se han experimentado problemas de calidad de la energía en las instalaciones del usuario, se deben observar los pasos para minimizar la propagación de disturbios, los cuales pueden originarse y reflejarse hacia el sistema de distribución, contaminando a éste y afectando a otros usuarios conectados a la misma red.

Es difícil determinar qué tanto se debe pagar por la reducción o eliminación de problemas de calidad de la energía. Para evitar problemas costosos, existen algunas medidas preventivas que puede tener el usuario. Algunos de los costos específicos, adicionales al precio de compra de un equipo y que deben ser considerados en la adquisición de cualquier producto eléctrico, son los siguientes:

- Costos de la preparación del sitio (requerimientos de espacio, aire acondicionado, etcétera).
- Costos de instalación.
- Mantenimiento.
- Costos de operación, considerando la eficiencia para las condiciones de operación actuales.
- Refacciones y partes de repuesto.
- Disponibilidad de servicio al equipo y costo de la indisponibilidad.
- Consultoría (si está disponible).
- Requerimientos de equipo reductor de disturbios.

Los costos de compra de cualquier equipo reductor de disturbios deben sopesarse con el grado de protección requerida. Por ejemplo: en aplicaciones no críticas, tal vez no sea necesario conectar una fuente ininterrumpible para proteger contra interrupciones del sistema.

2.4.7 FRECUENCIA RELATIVA CON QUE SE PRESENTAN LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Comúnmente, la fuente de un disturbio se encuentra en las instalaciones o edificios de los usuarios. Estudios hechos en Estados Unidos indican que el 90% de las causas de los problemas en la calidad de la energía son originados por el usuario, por el uso de equipo que produce disturbios, alambrado y conexión a tierra impropios o mala aplicación del equipo.

La tendencia en general puede determinarse por comparación con resultados registrados. Estos resultados son bastante inconsistentes, en cierto modo por la diferencia entre la

muestra y la técnica de análisis utilizada. Adicional a esto, los resultados de exámenes no consideran factores como son: conexión a tierra, la presencia de armónicas y muchos otros disturbios en el suministro de la energía.

Uno de los análisis más comúnmente utilizados en los estudios de la calidad de la energía es el desarrollado por ALLEN Y SEGALL, en un período de dos años y en varias localidades de Estados Unidos, éstos incluían tiendas de servicio, industrias, edificios de oficinas y áreas residenciales, con los resultados que a continuación se muestran:

TABLA 2.1 DISTURBIOS DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE CÓMPUTO

DISTURBIO	PROMEDIO MENSUAL	PORCENTAJE
Oscilación transitoria	62.06	48.8
Picos de voltaje	50.7	39.5
Caídas de voltaje	14.4	11.2
Sobrevoltaje	0	0
Falta de energía	0.6	0.5

Otro análisis bastante popular en los estudios de la calidad de la energía fue desarrollado por GOLDSTEIN Y SPERANZA. Para este estudio los disturbios de energía fueron registrados por un período de dos años y medio, en 24 puntos distribuidos geográficamente en laboratorios de computadoras de la empresa BELL.

La información para los estudios de ALLEN/SEGAL y GOLDSTEIN/SPERANZA fue tomada de los registros de disturbios de energía, que son una mezcla de problemas con entrada y salida de generadores locales.

Existen considerables diferencias en la calidad de la energía en la ubicación, así como de la localidad. Esto es debido a un gran número de factores involucrados, como lo es el equipo del usuario y las prácticas de cableado, efectos en la energía que producen los clientes aledaños, así como la ubicación geográfica y condiciones meteorológicas.

Las localidades que cuentan con una pequeña fuente de alimentación o un transformador que suministra a un determinado número de usuarios, como lo son los centros comerciales y edificios grandes, son prácticamente propensos a problemas de calidad en la energía. Esto es debido a que los disturbios y cargas sensibles comparten la misma fuente de alimentación. Aunado a esto, las cargas individuales pueden representar una porción grande de la totalidad de la energía suministrada a un edificio. Así que los cambios en el voltaje pueden ser muy significativos cuando estas cargas entran y salen.

Frecuentemente, los usuarios causan inconscientemente sus propios problemas de calidad, al operar equipo que produce disturbios en las cercanías del equipo de cómputo.

2.4.8 PROTECCIÓN CONTRA FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LAS EMPRESAS SUMINISTRADORAS

El resultado de una falla se puede presentar como una tensión y/o una sobrecorriente en un sistema de distribución, debido principalmente a causas primarias como descargas atmosféricas, efectos de construcciones, accidentes, fuertes vientos, árboles o animales y vandalismo, que afectan los conductores. Estas fallas son normalmente detectadas por los relevadores de sobrecorriente que inicializan la operación de equipo para liberar la falla.

Las fallas se pueden clasificar en general como temporales y permanentes.

Las fallas temporales son aquellas ocasionadas momentáneamente, como por ejemplo, por contacto de árboles, descargas atmosféricas y presencia de animales.

Las fallas permanentes son aquellas que requieren de mayor tiempo para reparación, mantenimiento o reemplazo de equipo antes de ser energizadas nuevamente. El equipo de seccionalización automático, cuando se usa, desconecta la parte dañada del sistema para minimizar así el número de usuarios afectados.

Los sistemas de distribución incluyen una serie de dispositivos como son los relevadores, interruptores, restauradores, fusibles y seccionadores que liberan las fallas. Los restauradores e interruptores restablecen el servicio en forma inmediata después de una falla transitoria no así los cortacircuitos que han operado y que se les debe reponer el fusible antes de ser establecidos.

Los dispositivos de protección pueden reducir el número de usuarios afectados por una falla, reducen el tiempo de interrupción por fallas temporales y ayudan a localizar las fallas, disminuyendo la duración de la interrupción.

Los restauradores e interruptores abren el circuito con señal de sobrecorriente para prevenir el flujo de corriente y recierran después de un corto tiempo. Si la falla no desaparece después de la operación de un recierre, puede ocurrir un ciclo de apertura y cierre, o bien, quedar el circuito abierto.

2.4.9 TÉCNICAS DE ATENUACIÓN DE LOS PROBLEMAS EN LA CALIDAD DEL SUMINISTRO

Los elementos de calidad de la energía claves para atenuar los problemas en la calidad del suministro son:

- Una conexión a tierra apropiada para las instalaciones.
- La selección y aplicación del equipo atenuador efectivo.
- La consideración de una fuente externa de disturbio en la instalación o instalaciones sólo se hace después de que el comportamiento eléctrico interno ha sido completamente verificado, vía medición y/o estudios.

2.4.10 LOS CIRCUITOS DEDICADOS

Un circuito dedicado es un simple circuito con una carga. Es una técnica de distribución relativamente barata que puede reducir un ruido.

La capacidad de un circuito dedicado para resolver problemas en la calidad de la energía depende de su localización, impedancia y otros factores. Para obtener la más baja impedancia posible, teóricamente la carga del circuito deberá estar tan cerca como sea posible de la acometida del servicio, de cualquier forma, esto puede agravar la situación si los transitorios tienen un problema, ya que pueden viajar más libremente a través del sistema.

Para mejorar la operación del circuito, el neutro y los cables para conexión a tierra, deberán ser del mismo calibre que el conductor de corriente.

2.4.11 ALGUNOS CONSEJOS Y PRECAUCIONES

Los circuitos derivados resuelven sólo problemas locales.

Una instalación inapropiada con alambrado de la conexión a tierra aislada en las tomas de corriente es una causa común de problema de calidad en la energía.

2.4.12 EL EQUIPO ATENUADOR DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Existe una amplia variedad de productos que están disponibles para ayudar en la atenuación de los disturbios en las líneas eléctricas.

Se debe poner atención en la selección apropiada del equipo de atenuación efectiva. Una aplicación inapropiada de estos productos, puede ser una causa común de problemas en la calidad de la energía.

Antes de seleccionar un producto, el cliente deberá tener un buen entendimiento de la causa del problema, así como las características del equipo disponible.

Un apropiado funcionamiento del sistema puede ser afectado adversamente por cualquier cambio en el comportamiento eléctrico, por ejemplo, un cambio de carga en la instalación. Por lo tanto, el equipo atenuador que fue efectivo una vez, pueda fallar para proteger el equipo sensible después de que un cambio semejante ocurra.

Cuando se seleccione el equipo que tenga una pérdida operacional por calor, lo cual es indicado por una eficiencia menor al 100%, éste puede proveerse de un sistema adecuado de aire acondicionado, si el equipo es localizado o ubicado en una sala o cuarto de cómputo.

2.5 EL PROBLEMA GENERAL DE LAS VARIACIONES DE VOLTAJE, LAS ARMÓNICAS Y LOS TRANSITORIOS

En los estudios de calidad en el suministro de la energía eléctrica, se estudia cuáles son los fundamentos que justifican la necesidad de revisar distintos conceptos relacionados con la operación de los sistemas eléctricos, dentro de estos conceptos se tienen como relevantes las variaciones de voltaje que se presentan y que afectan, sobretodo en el caso de las variaciones rápidas, los dispositivos con microelectrónica. Otros problemas son, por supuesto, las distorsiones en las ondas de voltaje y corriente (armónicas), los transitorios de sobretensiones (descargas atmosféricas, desconexión de bancos de capacitores) y los de parpadeo o flicker en las instalaciones.

2.6 TIPOS DE PERTURBACIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Hablando técnicamente, la confiabilidad como tal está asociada al tipo y número de disturbios que se presentan en la red eléctrica, estos problemas son muy variados y pueden tener causas muy diversas, tal como se describe a continuación:

2.6.1 TRANSITORIOS (CAMBIOS REPENTINOS EN LAS CONDICIONES DE LA RED)

2.6.1.1 IMPULSO:

Es un cambio repentino de potencia a una frecuencia distinta de la fundamental, es unidireccional en su polaridad (+ ó -). Normalmente son caracterizadas por sus tiempos de cresta y cola, la causa más común son las descargas atmosféricas. Ellos involucran altas frecuencias, por esto son amortiguados rápidamente por la componente resistiva del circuito y no son conducidos a largas distancias desde su fuente. Pueden excitar la resonancia de los circuitos y producir transitorios oscilatorios.

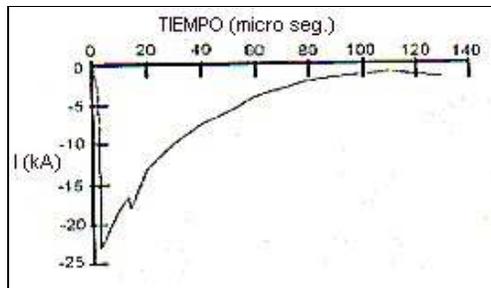


FIGURA 2.6 CORRIENTE PRODUCIDA POR UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA

2.6.1.2 OSCILATORIOS

Son transitorios cuyo valor instantáneo de voltaje cambia rápidamente de polaridad. Siempre son ocasionados por maniobra de equipos, tales como desconexión de líneas,

bancos de capacitores; cada uno de ellos tiene un rango de tiempo y de frecuencia característica, tal como se muestra en la Tabla 2.2

TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSITORIOS OSCILATORIOS

CATEGORÍA	MAGNITUD	DURACIÓN TÍPICA
Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 μ Ms
Media frecuencia	5-500 kHz	20 μ seg.
Alta frecuencia	0-5-5 kHz	5 μ seg.

En ambos casos, debido a que involucran cantidades grandes de energía, ya sea corriente o voltaje, su efecto es destructivo.

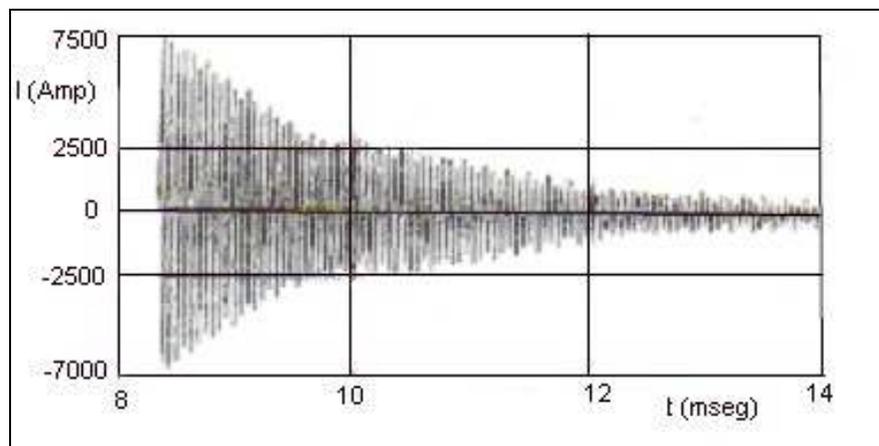


FIGURA 2.7 TRANSITORIO OSCILATORIO CAUSADO POR LA ENERGIZACIÓN DE UN BANCO DE CAPACITORES

2.6.1.3 INTERRUPCIONES SOSTENIDAS

Son los decrementos de voltaje de alimentación por un período de tiempo que excede a 1 minuto, regularmente son fallas de naturaleza permanente, que es necesario la intervención manual para su restauración.

Existen otros tipos de fenómenos que se presentan en la red eléctrica, como son:

2.6.1.4 DESBALANCE DE VOLTAJE

Como se sabe, los sistemas eléctricos son trifásicos y, debido a la operación misma, regularmente su funcionamiento no es balanceado, lo cual acarrea problemas por sobrecalentamiento de alguna de las fases.

Técnicamente hablando, el desbalance está definido como:

$$\text{Desbalance} = \frac{\text{Componente de secuencia cero o negativa}}{\text{Componente de secuencia positiva}}$$

2.6.2 DISTORSIÓN EN LA FORMA DE ONDA

Es una deformación de la onda senoidal ideal a la frecuencia fundamental, principalmente caracterizada por el contenido espectral de la desviación. Existen 5 tipos primarios de distorsión en la forma de onda:

2.6.2.1 COMPONENTE DE CD

Es la presencia de corriente directa en un sistema de corriente alterna, este fenómeno puede ser causado por la presencia en la red de rectificadores de media onda o aparatos que incluyan diodos.

2.6.2.2 ARMÓNICAS

Son voltajes o corrientes senoidales que tienen frecuencia de múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, estas formas de onda se combinan con la frecuencia fundamental y provocan distorsión en la forma de onda, esta distorsión armónica es provocada por las características no lineales de los aparatos o cargas conectadas.

2.6.2.3 NOTCHING

Es un disturbio periódico del voltaje causado por la operación normal de aparatos de electrónica de potencia cuando se realiza la conmutación de una fase a otra. La causa más común de este fenómeno son los convertidores trifásicos, ya que al realizar la conmutación entre cada fase, se está provocando un corto circuito.

2.6.2.4 RUIDO

Son señales eléctricas en un ancho de banda menor a 200 kHz superpuestas a la señal fundamental de corriente o voltaje del sistema. En los sistemas de potencia, puede ser ocasionado por aparatos de electrónica de potencia, circuitos de control, cargas con rectificadores de estado sólido; regularmente son amplificadas por aterrizamientos incorrectos.

2.6.3 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE

Son variaciones sistemáticas en el voltaje, o bien, una serie de cambios aleatorios en el voltaje, los cuales regularmente no exceden el rango de 0.95-1.05 pu. Comúnmente, se expresan como un por ciento del valor de la fundamental. Este efecto es provocado por cargas que presentan variaciones continuas y rápidas de corriente, especialmente en la componente reactiva. Los arcos de fundición, así como las soldadoras, son la causa más común de las variaciones de voltaje en el sistema de transmisión y distribución.

2.6.4 VARIACIONES EN LA FRECUENCIA

La frecuencia del sistema, en cualquier instante, está definida por la relación entre carga y la capacidad disponible de generación, si este balance dinámico cambia, se presentan pequeños cambios en la frecuencia. La duración y magnitud de los cambios depende de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación ante dichos cambios.

2.7 EL ESTUDIO DE LAS VARIACIONES DE VOLTAJE

Es importante destacar que lo que las compañías suministradoras entregan a los usuarios es un voltaje en un nivel ideal, es decir, los consumidores contratan un servicio que les alimente sus cargas con una potencia dada, las cuales se van a conectar a un nivel de tensión específico.

Aquí se ve que es muy importante conectar las cargas o aparatos en su nivel correcto de tensión, ya que solamente así su funcionamiento será óptimo. Hace muchos años, cuando las cargas eran principalmente motores de inducción que son resistentes a las variaciones de voltaje, todos los equipos de control eran electromecánicos, no se prestaba atención a problemas de variaciones en la alimentación, o sea, en el voltaje. Los equipos de automatización están más expuestos a problemas en lo que al voltaje de alimentación se refiere, ya que su principio de funcionamiento, que se basa en el control por voltaje, hará que con la mínima disminución en la magnitud de éste, el aparato la vea como una interrupción del voltaje de control, así que el aparato se disparará a la posición normal.

Si el equipo de una planta industrial se dispara, las consecuencias podrían ser muy severas, ya que procesos continuos como fábricas de papel, líneas de ensamble de automóviles, podrían detenerse completamente y algunos de estos procesos podrían tardar horas en reiniciarse, además de que las pérdidas en producción serían bastante altas. Entre estos aparatos se encuentran los contactores, arrancadores de motores, relevadores de control y de protección, inclusive equipo de alumbrado. Los equipos automatizados, como los asociados al control industrial, pueden perder enteramente la secuencia de las operaciones durante alguna variación de voltaje.

Es importante recordar que la compañía suministradora y los usuarios, solamente pueden tener control sobre el voltaje que se entrega a los equipos, ya que la corriente dependerá de la magnitud y tipo de aparatos que se encuentren conectados. Adicionalmente a lo

anterior, se ve que los problemas más comunes son los relacionados al voltaje, como son las depresiones, elevaciones momentáneas, impulsos e interrupciones.

Se sabe que el voltaje y la corriente siempre mantienen una estrecha relación en un sistema eléctrico, es decir, los generadores se encargan de producir una señal casi perfectamente senoidal de la magnitud deseada, pero que al pasar a través de la impedancia del sistema, puede sufrir una variedad de perturbaciones, como por ejemplo:

- a) La corriente resultante de un corto circuito causa una depresión del voltaje, o bien, una desaparición del mismo.
- b) Las corrientes originadas por las descargas atmosféricas a través del sistema de potencia, causan impulsos de alto voltaje, que frecuentemente flamean el aislamiento y originan otros fenómenos como corto circuitos.
- c) Corrientes distorsionadas de cargas productoras de armónicas, también distorsionan al voltaje cuando ellas pasan a través de la impedancia del sistema. Este voltaje distorsionado es presentado a otros usuarios.

Por lo anterior, resulta necesario hacer un estudio sobre las variaciones de voltaje, ya que según los estudios realizados, es el problema con mayor índice de probabilidad de presentarse en cualquier instalación eléctrica.

2.8 DEFINICIONES Y CARACTERÍSTICAS

En el punto 2.3 se describieron brevemente los disturbios más comunes que se presentan en toda instalación eléctrica, entre ellos se presentaron las variaciones de voltaje de corta y larga duración. En lo que se refiere a las variaciones de larga duración, se sabe que éstas son ocasionadas por alimentadores sobrecargados o con un nivel de carga muy bajo. Las variaciones de larga duración en el voltaje, ya sean sobrevoltajes o bajo voltajes, según la definición del IEEE, son aquellas con una duración mayor a 1 minuto. Por tal motivo, éstas se deben a la mala regulación de los transformadores y equipos conectados para tal fin, o tal vez a la falla (que puede ser conexión o desconexión) de un banco de capacitores que está instalado con el propósito de compensar potencia reactiva, que ayuda a mejorar el perfil del voltaje.

Estos problemas de alto o bajo voltaje son corregidos por medidas tomadas por la compañía suministradora, o por el usuario, al corregir la posición de los TAPS de los transformadores, o bien, de los reguladores de tensión.

En lo que se refiere a las variaciones de corta duración éstas pueden ser abatimiento o elevaciones momentáneas en el voltaje de alimentación, que tendrán una duración característica de $\frac{1}{2}$ ciclo a 1 minuto, mientras que la magnitud del voltaje será de 0.1 a 0.9 pu en el caso de los abatimientos de voltajes, también conocidos como SAGS o DIPS, mientras que para las elevaciones momentáneas o SWELLS, va de 1.1 a 1.8 pu.

2.8.1 FUENTES DE DISTURBIOS

Estas variaciones cortas de voltaje son ocasionadas por condiciones de falla en la red eléctrica, conexión de grandes cargas (como puede ser el arranque de motores), pero *también* incluye la filosofía de protección empleada por la empresa suministradora.

2.8.2 FALLAS EN EL SISTEMA

Si analizamos *un* sistema eléctrico, encontramos que la mayor parte de su instalación es aérea, por lo tanto, está expuesta a un gran número de fenómenos ocasionados por la naturaleza, entre los que se encuentran:

- a) Árboles.
- b) Viento.
- c) Descargas atmosféricas.
- d) Nieve.
- e) Vandalismo (objetos arrojados hacia los conductores).

Estas condiciones pueden originar que se presente un corto circuito en la red en cualquier punto y, como se sabe, los más comunes son las fallas monofásicas a tierra y las más severas son las trifásicas.

Antes de analizar las fallas que se muestran en la Figura 2.9 es necesario recordar qué ocurre cuando se presenta un corto circuito en algún punto de la red.

Se sabe que las fallas más comunes son las de una fase a tierra, las cuales son originadas por la acción del viento, los árboles que tocan alguno de los conductores, o bien, por las descargas atmosféricas. También pueden ocurrir fallas trifásicas, las cuales son las de mayor severidad por los esfuerzos a que someten a toda la instalación; sin embargo, su probabilidad de ocurrencia es bastante baja.

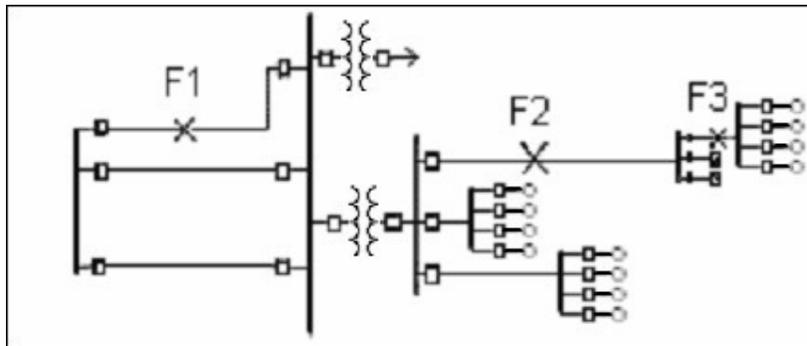


FIGURA 2.9 EJEMPLO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO EN EL CUAL SE PRESENTAN FALLAS EN DIVERSOS PUNTOS.

Al ocurrir una falla monofásica, (supóngase que una rama de árbol toca un conductor) esa fase tendrá una corriente alta, es decir, la corriente de falla será igual a la corriente de esa fase en el punto en que ocurrió la falla, por efecto de la alta corriente se tendrá una gran caída de tensión, que hará que en ese punto, el voltaje a esa fase sea casi cero.

Esta depresión en el voltaje será un problema que afectará a la red, mientras que los aparatos de protección operan para librar la falla, es decir, su duración está dada en función del tiempo en que el relevador detecta la falla y del tiempo que tarda el interruptor en abrir.

Durante este mismo tiempo, en las fases no falladas del sistema se pueden presentar voltajes momentáneos que serán más altos que lo nominal. Como se sabe, la misma impedancia de la red sirve como atenuador de la corriente de falla, por lo que al incrementarse la impedancia (es decir, conforme se aleja del punto de la falla), la corriente de falla será menor y, por lo tanto, los voltajes no sufrirán cambio considerable con respecto al nominal.

De la Figura 2.9 se ve que al ocurrir una falla F1, que es en el sistema de transmisión todos los voltajes de los buses del sistema de subtransmisión y distribución serán afectados. En tanto que una falla como F2, los voltajes que serán afectados son los de los buses cercanos al punto de ocurrencia de la falla, pero el sistema de transmisión "no verá" la falla con la misma severidad que la F1. Finalmente, si se presentara una falla F3, es decir, en el nivel de distribución, ésta afectaría únicamente a ese nivel de tensión y, en muy bajo grado, a la red de subtransmisión; mientras que el nivel de transmisión "no sentirá" la falla en lo más mínimo.

2.8.3 CONEXIÓN DE CARGAS GRANDES

Al momento que se conecta una carga al sistema, en ese instante se tendrá una depresión de voltaje, ya que el efecto de la corriente que esta carga va a demandar del sistema, provoca que el nivel de voltaje se reduzca, al menos por el tiempo en que la carga es energizada.

El más claro ejemplo de esto es el arranque de motores, todos hemos experimentado lo que ocurre cuando algún motor eléctrico es conectado o arrancado, por ejemplo, al arrancar una bomba de agua en algunas casas, el voltaje cae por un momento para después regresar a su valor nominal, lo mismo ocurre cuando el motor de algunos refrigeradores se enciende.

En las casas habitación, el único efecto perceptible es la disminución en el nivel de iluminación, pero, en instalaciones comerciales o industriales, las cuales ya tienen conectada una cantidad importante de aparatos y equipos sensibles, como son las computadoras, por ejemplo, una condición de arranque de la bomba de agua puede causar una condición de voltaje tan bajo que la computadora se apague y los procesos que ésta controle queden suspendidos.

En instalaciones industriales, en las cuales se tienen motores de dimensiones extraordinarias de miles de caballos de fuerza (HP), esta condición puede ser de tal severidad que origine bajos voltajes momentáneos en buses, aún muy alejados eléctricamente del punto de conexión.

Cabe señalar que cuando un motor arranca, demanda una corriente de una magnitud que es igual a varias veces la corriente a rotor bloqueado, regularmente está en un rango de entre 6- 10 veces. También es igual al recíproco de la reactancia subtransitoria:

$$I_{arranque} = \frac{1.0}{X''d} \dots\dots\dots(2.1)$$

También pueden ser causa de depresiones de arranque voltaje, la corriente de magnetización de los transformadores, así como los bancos de capacitores.

Las protecciones tienen una gran influencia en la duración y frecuencia de las depresiones de voltaje, de acuerdo a la filosofía de protecciones que cada empresa usa. Estas prácticas de protección que las compañías realizan en las líneas, principalmente aéreas, afectará los tiempos de liberación de las fallas que se presenten en las redes eléctricas.

2.9 OTROS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DELSERVICIO

- Desbalance de voltaje.
- Distorsión en la forma de onda.
- Armónicas
- Ruido (señales eléctricas con espectro de banda menor de 200 KHz)

2.9.1 VARIACIONES DE VOLTAJE DE LARGA DURACIÓN

Se consideran así aquellas desviaciones de voltaje a la frecuencia del sistema por lapsos de tiempo mayores de 1 minuto y pueden ser sobre voltajes o bajos voltajes.

Sobrevoltaje: Es un incremento en el valor eficaz del voltaje en C.A. mayor del 110% a la frecuencia del sistema con una duración mayor de 1 minuto.

Bajo voltaje: Un bajo voltaje es una reducción en el valor eficaz del voltaje menor al 90% del voltaje a la frecuencia del sistema, con una duración mayor de 1 minuto.

2.9.2 LA PRESENCIA DE ARMÓNICAS.

Las armónicas no se producen normalmente por un sistema eléctrico de potencia pero si en la mayoría de los casos por las cargas conectadas al mismo. Algunas de las fuentes más comunes de armónicas son:

- Convertidores estáticos.

- Transformadores sobre-excitados.
- El alumbrado fluorescente.
- Los dispositivos de estado sólido (computadoras, controladores de velocidad, etc.)

ELEMENTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA QUE SE RELACIONAN CON LOS PROBLEMAS DE ARMÓNICAS

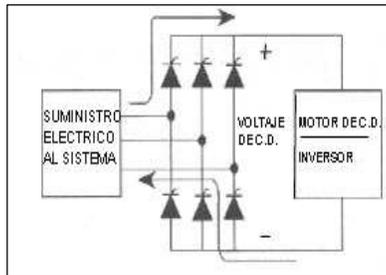


FIGURA 2.10 DIAGRAMA DE BLOQUE DE UN CONTROLADOR TRIFÁSICO A BASE DE TIRISTORES, QUE ES DE LOS MÁS COMUNES USADOS ACTUALMENTE.

FIGURA 2.10

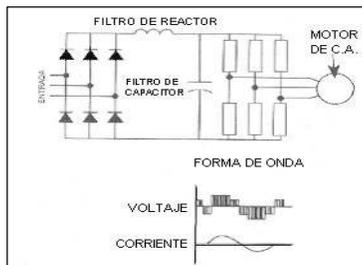


FIGURA 2.11 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA SALIDA DE UNA FORMA DE ONDA DE UNA FUENTE DE VOLTAJE CON INVERSOR TIPO ACCIONADOR. CON FILTROS PARA SUAVIZAR LA FORMA DE ONDA.

FIGURA 2.11

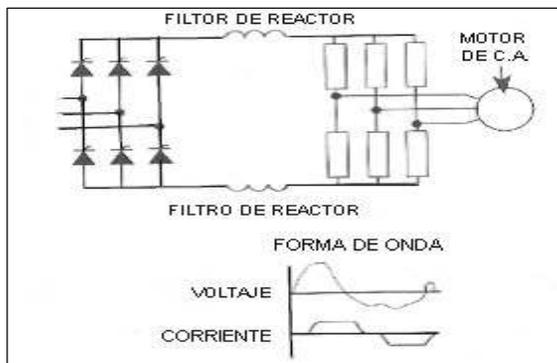


FIGURA 2.12 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA FORMA DE ONDA DE SALIDA DE UNA FUENTE INVERSORA TIPO ACCIONADOR. EN ESTE CASO, LOS FILTROS SON TIPO REACTOR

FIGURA 2.12

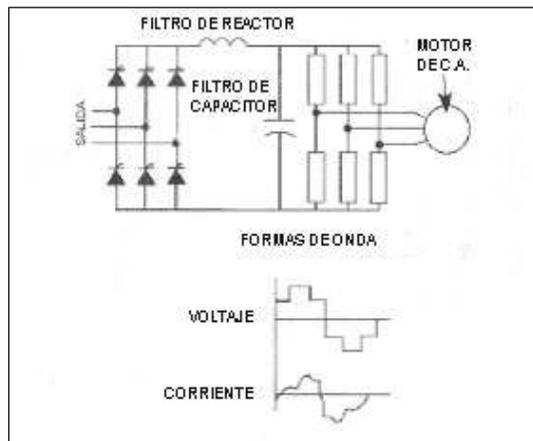


FIGURA 2.13 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO Y FORMA DE ONDA DE SALIDA DE UN ACCIONADOR DE ANCHO DE PULSO MODULADO.

FIGURA 2.13

El flujo de corrientes armónicas a través de la impedancia del sistema da como resultado voltajes con armónicas en la carga.

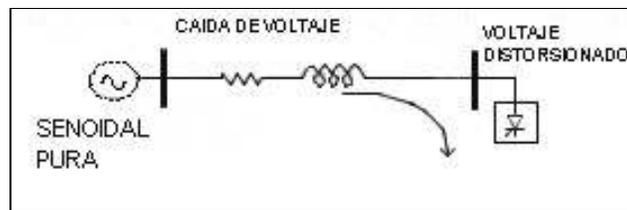


FIGURA 2.14 FLUJO DE CORRIENTES ARMÓNICAS A TRAVÉS DE LA IMPEDANCIA DEL SISTEMA

Existen varias mediciones comúnmente usadas para indicar el contenido de armónicas en una onda. Uno de los más comunes es la "Distorsión Armónica Total" (THD), que se puede calcular para voltaje o corriente con la expresión general:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \dots\dots\dots(2.2)$$

M_h = Valor eficaz de la componente armónica h de la cantidad M.

Los problemas de armónicas en las redes de distribución son generalmente difíciles de diagnosticar, dado que el nivel de las mismas se puede presentar en forma gradual, o bien, un sistema puede cambiar totalmente en cuanto a fuentes de armónicas y presentar un nuevo problema.

Las causas más comunes de armónicas encontradas en los sistemas de distribución, se pueden manifestar como:

Un número excesivo de fusibles fundidos en bancos de capacitores.

Sobrecalentamiento en transformadores y motores.

Disparos inexplicables de interruptores, debido a la acción del relevador de fallas a tierra.

Quejas por interferencias telefónicas.

2.9.3 LOS TRANSITORIOS OSCILATORIOS.

Son cambios bruscos en las condiciones de estado estable en voltaje y frecuencia, pueden ser causados por la desconexión de bancos de capacitores.

2.9.4 TRANSITORIOS DE IMPULSO POR RAYO

Como los debidos a descargas atmosféricas, que son ondas unidireccionales y de una sola polaridad, se caracterizan por ondas de sobretensión de frente rápido y de aumento relativamente lento en la escala de tiempo que se maneja (1.2 x 50 µseg.)

2.9.5 EL EFECTO DE PARPADEO (FLICKER)

Otro problema relacionado con la calidad de la energía, es el llamado efecto de parpadeo o flicker, que en realidad son variaciones rápidas de voltaje cuyo efecto se manifiesta principalmente en el ojo humano y, por lo tanto, es de tipo fisiológico, pudiendo presentar molestias a los usuarios del alumbrado.

El problema del flicker es ocasionado, la mayoría de las veces, por los equipos y aparatos conectados a las propias instalaciones eléctricas, por ejemplo: el arranque de los motores de los refrigeradores, la acción de los elevadores (arranque-paro), los hornos de arco eléctrico, los arranques de motores y las soldadoras de arco eléctrico.

2.10 UPS, SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA (UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY, EN ESPAÑOL ABREVIADO COMO SAI).

2.10.1 UPS ESTÁTICO

Constituyen uno de los equipos más populares en las instalaciones actuales; su función es mantener constante la alimentación de energía a una carga determinada, o a un grupo de cargas a la vez. En los casos donde son esperables los cortes de energía, las UPS combinadas con equipos de protección de Sobre Tensiones suelen ser la solución más efectiva al menor costo.

No solo proveen el filtro y acondicionamiento necesario para asegurar la calidad de la energía requerida por los equipos electrónicos sensitivos sino que sirven de fuente de alimentación en caso de salidas de servicio en la alimentación principal.

2.10.2 PARTES QUE COMPONEN A LOS UPS:

- Rectificador de Corriente Alterna en Continua.
- Un bus de corriente continua con una batería flotante continuamente conectada.
- Un inversor de Corriente Continua a Alterna y un switch de by-pass de estado sólido.
- Las UPS estáticas vienen en rangos amplios, desde unos pocos cientos de VA para la protección de cargas individuales hasta 750 k VA (o más) para proteger instalaciones enteras. Cargas mayores se atienden mediante el empleo de unidades en paralelo.

Los sistemas de UPS estáticas están disponibles en tres configuraciones típicas:

2.10.2.1 UPS ON LINE.

Son el tipo más común en las instalaciones para cargas críticas. En estas configuraciones las cargas son continuamente alimentadas por las salidas del inversor. En caso de fallas la alimentación se transfiere a la fuente de backup, generalmente la línea de alimentación de la distribuidora.

La fuente alternativa de potencia sirve para un segundo propósito: provee corriente para limpiar las fallas, una función importante, debido a que muchos inversores no pueden generar las corrientes necesarias para fundir un fusible o abrir un interruptor de una carga crítica. El by pass estático retransfiere la carga a la salida de la UPS cuando el dispositivo de protección limpia la falla.

Una ventaja de las UPS "on-line" es que las cargas críticas continúan recibiendo potencia acondicionada y nunca se quedan sin alimentación.

Un requerimiento importante de estos equipos es que deben ser adecuadamente dimensionados para alimentar las cargas y para mantener en carga a las baterías.

2.10.2.2 UPS OFF LINE

Son diferentes a las anteriores en la medida que en condiciones normales proveen potencia sin acondicionar. El switch de transferencia solo direcciona al inversor de AC cuando censa una fluctuación o interrupción de la corriente normal.

Esta configuración se suele aplicar para cargas pequeñas y no requiere de otros equipos de acondicionamiento de línea. El tiempo de transferencia de la fuente normal a la alternativa, vía by-pass estático, es del orden de 4 milisegundos.

2.10.2.3 UPS DE LÍNEA INTERACTIVA

La potencia no se convierte en corriente continua (DC) y se envía directamente a las cargas críticas mediante un inductor o transformador. La regulación y alimentación continua a las cargas críticas se obtiene a través de switchers de inversión en combinación

con inversores magnéticos como inductores, transformadores de línea o transformadores ferro resonantes.

2.10.3 CONSIDERACIONES PARA ESPECIFICAR UN UPS.

2.10.3.1 REDUNDANCIA O NO DE LOS SISTEMAS

Se debe analizar factores tales como confiabilidad requerida, costo y disponibilidad de espacio. La estrategia usual consiste en implementar sistemas con redundancia en paralelo, con todos los módulos on-line alimentando a las cargas críticas en paralelo.

2.10.3.2 SWITCH DE BY-PASS

La transferencia de las cargas desde las UPS a los sistemas de las distribuidoras, que ocurren en las fallas de las UPS, debe permitir su mantenimiento sin estar energizados.

2.10.3.3. SELECCIÓN DE BATERÍAS

Las más comunes son las de plomo - ácido debido a su simplicidad y bajo costo, siendo convenientes las denominadas "sin mantenimiento"; no obstante, existen nuevos tipos de baterías que conviene evaluar por su diseño más novedoso.

2.10.4 INCONVENIENTES DE LOS UPS

El factor de potencia en la alimentación de estos equipos suele ser de sólo el 80%, por lo que para llevarlo a los valores deseados (cercaos al 95%) se debe recurrir a capacitares.

Las UPS estáticas generan Armónicas tanto en la línea de alimentación como en la de salida (del orden del 12 y 5% respectivamente), debido a los rectificadores de silicio. Ello puede ocasionar inconvenientes en los sistemas de control y sobrecalentamientos en el neutro, por lo que se requiere colocar filtros que limiten la presencia de Armónicos.

CAPITULO III

FUENTES ARMÓNICAS Y SUS EFECTOS

3.1 FUENTES ARMÓNICAS

El efecto de una armónica determinada en el sistema de potencia se puede ver sobreponiendo la forma de onda de la armónica sobre la forma de onda de la fundamental, para obtener una forma de onda compuesta.

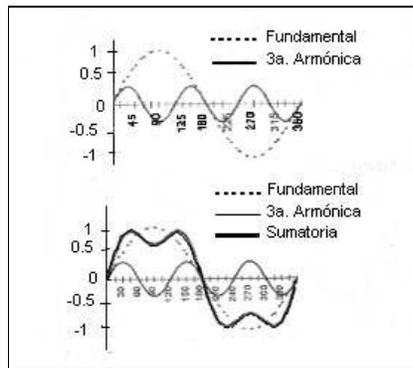


FIGURA 3.1 SUPERPOSICIÓN DE UNA ARMÓNICA SOBRE LA FUNDAMENTAL INICIALMENTE EN FASE

En este ejemplo, las dos ondas inician en fase una con la otra y producen una forma de onda distorsionada con los picos aplanados.

La forma de onda compuesta se puede cambiar sumando la misma armónica, inicialmente fuera de fase con la fundamental, para obtener un efecto de alargamiento en el pico.

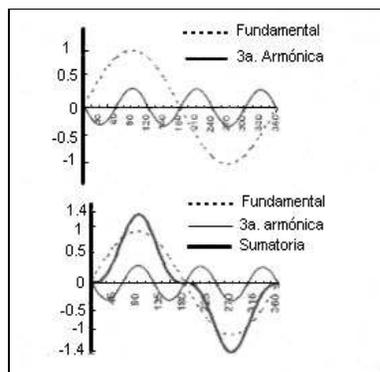


FIGURA 3.2 SUPERPOSICIÓN DE UNA ARMÓNICA SOBRE LA FUNDAMENTAL INICIALMENTE FUERA DE FASE.

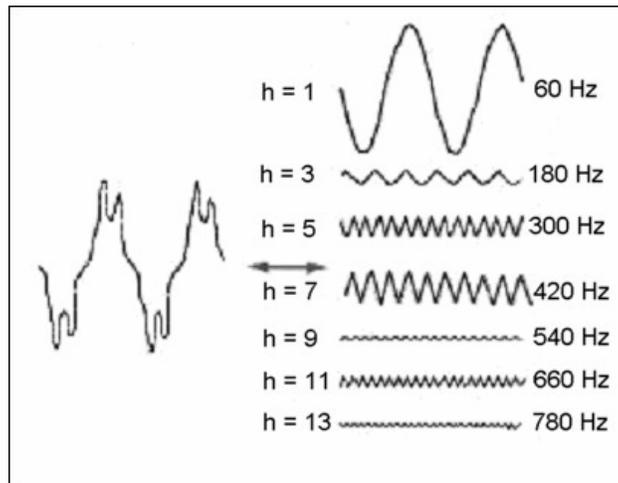


FIGURA 3.3 REPRESENTACIÓN EN SERIE DE FOURIER DE UNA ONDA DISTORSIONADA

Los generadores de energía eléctrica en forma ideal suministran a la red eléctrica formas de onda perfectamente senoidales y, en consecuencia, la corriente de carga resultante al alimentar a los consumidores también sería una senoidal ideal. Sin embargo, en la práctica, las condiciones de generación, transmisión y utilización de la electricidad no son ideales, teniéndose usualmente formas de onda distorsionadas. La desviación de las formas de onda reales a partir de las ondas senoidales, se expresa en términos de la distorsión armónica de las formas de onda de la corriente y el voltaje.

El fenómeno de la distorsión armónica no es nuevo, la implantación de procedimientos para su control constituyen una preocupación permanente de los ingenieros involucrados en las diversas etapas de la utilización de la energía eléctrica desde los primeros sistemas eléctricos.

Existe un gran número de dispositivos que producen distorsiones armónicas. En nuestros días, la distorsión armónica constituye un gran problema, debido al uso de cargas no-lineales. Algunas de estas fuentes han existido desde la implantación de los sistemas de potencia; otros, han existido pero en números más pequeños durante muchos años atrás. Una vez más, el progreso tecnológico ha traído consigo una contaminación grave del medio (en este caso, eléctrico), por lo tanto, es preciso aprender a controlarlo a base de una técnica adecuada.

A continuación, veremos en forma detallada la clasificación de las fuentes principales que producen éstos disturbios en la red de energía eléctrica:

a) Fuentes de armónicas tradicionales.

b) Fuentes nuevas de armónicas.

c) Fuentes futuras de armónicas.

3.1.1 FUENTES TRADICIONALES DE ARMÓNICAS

Anteriormente, la propagación de armónicas se relacionaba con el diseño y la operación de transformadores y máquinas rotatorias; de hecho, la primer fuente generadora de armónicas en esos días era la corriente magnetizante de los transformadores de potencia.

Los transformadores y máquinas rotatorias modernas, trabajando en estado estable, no provocan una distorsión significativa en la red eléctrica, pero cuando hay fluctuaciones de voltaje en la red y cuando operan fuera de sus especificaciones de rango, pueden aumentar su contenido armónico con niveles de distorsión considerables. Otras cargas que producen armónicas son la luz fluorescente y los hornos de arco.

3.1.2 TRANSFORMADORES

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionadas entre sí, mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aún en esta condición, la forma de onda resultante no es una senoidal pura.

Cuando hay pérdidas por histéresis, la forma de onda de la corriente no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se obtiene se debe a las armónicas triples (3a, 9a, 12a, etcétera), pero primordialmente a la tercera, ya que para mantener una alimentación de voltaje senoidal es necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, esto se logra generalmente con el uso de devanados conectados en delta.

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización se incrementan a sus niveles máximos en las horas de la madrugada, cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de voltaje es alto.

Al desactivar un transformador, puede que almacene flujo magnético residual en el núcleo. Cuando se restablezca la unidad, la densidad de flujo puede tomar niveles máximos (pico) de hasta tres veces el flujo en operación normal. Esto puede causar en el transformador niveles extremos de saturación y producir ampere-vueltas excesivos en el núcleo. Este efecto da lugar a corrientes de magnetización de 5 a 10 p.u. de la corriente nominal (comparada con la corriente de magnetización nominal de apenas de 1 % ó 2% de la corriente nominal).

La disminución de esta corriente de energización con el tiempo es función principalmente de la resistencia del devanado primario. Para transformadores muy grandes, esta corriente puede permanecer por muchos segundos, debido a su baja resistencia.

3.1.3 MÁQUINAS ROTATORIAS

Los efectos más conocidos de las armónicas en las máquinas rotatorias son el aumento en las pérdidas y calentamiento, generalmente atribuidos a armónicos de bajo orden, alta magnitud y la aparición de pares parásitos.

Las pérdidas ocasionadas por las corrientes armónicas en los motores de inducción trifásicos son del tipo $12 R$ y pueden dividirse en pérdidas en el estator, pérdidas en el rotor y pérdidas adicionales. El valor de la resistencia tiende a disminuir la frecuencia. Otros tipos de pérdidas debidas a la distorsión de voltaje pueden despreciarse, por ser pequeñas.

Para las máquinas síncronas, generalmente se considera que la impedancia armónica es igual a la reactancia subtransitoria multiplicada por el orden de la armónica.

Las corrientes armónicas, al interactuar con el campo magnético fundamental, producen pares oscilatorios. Estas oscilaciones estimulan modos acoplados complejos que pueden producir oscilaciones torsionales en los elementos del rotor y flexiones de los alabes de la turbina. Si la frecuencia de tales modos torsionales de vibración mecánica se encuentra cerca de la frecuencia armónica, pueden desarrollarse respuestas resonantes que originen ciclos de fatiga para la flecha y los alabes de la turbina.

3.1.4 HORNOS DE ARCO

Un horno de arco es una carga compleja, no únicamente por la fluctuación en el consumo de potencia reactiva, sino también porque la corriente del horno es altamente distorsionada. Es difícil describir las características de la corriente de un horno de arco.

Debido al incremento en el costo de la energía, el bajo factor de potencia con que opera un horno de arco debe tratarse de mejorar colocando bancos de capacitores para compensar el consumo de los reactivos de la carga.

El horno de arco, por ser una carga eléctrica de características no lineales, es una fuente de generación de corrientes armónicas en forma aleatoria, teniendo valores cercanos a la resonancia, debido a la respuesta en frecuencia del banco de capacitores con la reactancia propia de la línea de alimentación, ocasionando problemas de sobrevoltaje y sobrecorrientes, causando frecuentemente la operación de los fusibles de los bancos de capacitores, fallas en el equipo de medición, etcétera.

3.1.5 LÁMPARAS FLUORESCENTES

La utilización en gran escala de las lámparas fluorescentes como un medio para reducir el consumo de energía, se ha visto recientemente incrementada en muchos lugares del mundo. La utilización de nuevas tecnologías que abarcan diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal, constituyen sistemas más eficientes de iluminación. Sin embargo, es importante analizar el lado negativo del uso masivo de las

lámparas fluorescentes. La preocupación reside en el deterioro que puede sufrir la calidad de la energía en las instalaciones eléctricas donde se aplica éste tipo de alumbrado, por la generación de corrientes armónicas.

Las lámparas incandescentes, por ser cargas lineales, producen la circulación de corrientes de 60 Hz al ser alimentadas por una fuente de voltaje senoidal de la misma frecuencia. En cambio, las lámparas fluorescentes son cargas no lineales por naturaleza, por lo tanto al aplicarles un voltaje senoidal, se produce una circulación de corrientes no senoidales a través de ellas.

Ya que las lámparas fluorescentes de alta eficacia se conectan a la red de distribución, las corrientes armónicas que se generan pueden fluir a través de los conductores hacia los transformadores en el sistema de distribución

TABLA 3.1 PRINCIPALES FUENTES DE ARMÓNICAS

NUM.	EQUIPO	CARACTERÍSTICAS DE LAS PRINCIPALES ARMÓNICAS	MAGNITUDES (1% DE 60 hZ)
1	Transformador: Saturación Energización	Corrientes armónicas 2 ^a , 3 ^a , 4 ^a , 5 ^a y 7 ^a	1 – 8 %
2	Hornos y soldadoras de arco.	Voltajes armónicos 5 ^o y 7 ^o	2.5 – 8 %
3.1	Convertidores de potencia: Conmutadores de línea (rectificadores) Autoconmutados (inversores que usan celdas de combustible o baterías)	Corrientes armónicas: $H = np \pm 1$ Voltajes armónicos: $H = np \pm 1$	I h = 100/h 52 a 78 %
3.2	Ciclo convertidores (grandes equipos, fabricas de papel para conversión directa de AC a DC)	Corrientes armónicas: $H = np \pm 1$	5 – 9 %
3.3	Controladores estáticos de VAR's (utilizados junto con hornos de arco o de inducción)	Corrientes armónicas: $H = np \pm 1$	2 – 4 %
4	Reactores saturables (normalmente en paralelo con capacitores para compensación de reactivos en hornos de arco)	Corrientes de armónicos: 3 ^a , 5 ^a y 7 ^a	1 – 8 %

Nomenclatura: H = orden de la armónica; p = número de pulsos; n = 1,2,3,...

3.1.6 NUEVAS FUENTES DE ARMÓNICAS

En la actualidad, otra de las principales fuentes de distorsiones armónicas son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase.

Las líneas de transmisión de corriente directa producen problemas para los sistemas de control de rizado. Las armónicas, en frecuencias altas, causan errores en los sistemas de comunicación, dentro de éstos se puede mencionar la interferencia sobre las líneas telefónicas, pues al acoplarse las armónicas mutuamente con la red del sistema de potencia a las frecuencias de las mismas, hay falla. Estas armónicas afectan la operación de ciertos equipos, como son: motores de c-c, computadoras, máquinas de control numérico, etcétera; que son muy sensibles a la distorsión en la señal recibida.

Los convertidores se clasifican en:

- a. Grandes convertidores de potencia.
- b. Convertidores de mediano tamaño.
- c. Rectificación de baja potencia de fuentes monofásicas, como en los televisores y cargadores de baterías.

3.1.7 FUTURAS FUENTES DE ARMÓNICAS

A largo plazo, se prevee un aumento importante en el contenido de armónicas en las redes eléctricas, debido al uso en gran escala de autos eléctricos que requieren recargar sus baterías en grandes bancos de rectificación.

Otras posibles fuentes de armónicas serán aquellas que requerirán la conversión de grandes volúmenes de energía, posiblemente producidas por fuentes no convencionales (Eólica, Solar, etcétera), el uso de ciclo-convertidores para operación de máquinas de baja velocidad y alto par, el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustible.

3.2 NORMATIVIDAD SOBRE EL PROBLEMA DE ARMÓNICAS

Para especificar las medidas adecuadas que representen una relación balanceada costo/beneficio, es preciso establecer criterios prácticos sobre los niveles permisibles, tanto en el sistema eléctrico de una planta industrial como en los límites de distorsión armónica que pueden fluir en líneas de transmisión y distribución de una compañía eléctrica suministradora.

Resulta especialmente delicado establecer un criterio que normalice la relación usuario/compañía suministradora, ya que ésta última tiene derecho a exigir al usuario que trate de no contaminar su sistema de transmisión y distribución, y el usuario tiene también derecho de exigir el suministro de una energía de buena calidad. Para lograr estos fines,

algunos países han establecido límites de distorsión armónica tratando de mejorar la calidad de la energía.

3.2.1 FILOSOFÍA DE LA NORMA IEEE-519 (INSTITUTO DE INGENIEROS EN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA)

Esta filosofía se basa en los siguientes puntos:

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

Usuarios ===== > Limitar la corriente armónica.

2. Las compañías suministradoras deberán responsabilizarse para evitar condiciones de resonancia en el sistema de potencia, que puedan crear niveles de distorsión de voltaje inaceptables. Básicamente, la compañía debe suministrar un voltaje de calidad.

Compañía ===== > Limitar la distorsión del voltaje.

En reconocimiento de la diversidad de los límites de corriente desarrollados, la máxima frecuencia armónica individual en el voltaje causada por un usuario no debe exceder los límites de la tabla siguiente, en sistemas que pueden ser caracterizados por impedancias de corto circuito.

TABLA 3.2 BASES PARA LÍMITES DE CORRIENTES ARMÓNICAS

Icc (corriente de corto circuito)	Máxima frecuencia individual en voltaje armónico (%)	Tipo
10	2.5 – 3.0	Relacionado a sistemas
20	2.0 – 2.5	1- 2 Clientes grandes
50	1.0 – 1.5	Clientes relativamente muy grandes
100	0.5 – 1.0	5 - 20 Clientes de mediano tamaño
1000	0.05 – 0.1	Muchos clientes pequeños

La relación I_{cc}/I_c es la razón de la corriente de corto circuito disponible en el punto de acoplamiento común (PCC) para la máxima corriente de carga fundamental.

3.2.2 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE

Idealmente, la distorsión armónica causada por un usuario es limitada para un nivel aceptable en cualquier punto del sistema y el sistema entero sería operado sin fuertes distorsiones armónicas en cualquier parte del mismo.

Los límites de distorsión armónica establecidos en esta norma son para establecer la máxima distorsión de corriente permisible para un usuario, estas recomendaciones son relacionadas con el siguiente índice:

THD I: Distorsión de la demanda total en corriente. Es la distorsión de corriente armónica en % de la demanda máxima de la corriente de carga (15 ó 30 min. de demanda).

El THD I está definido como:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I^2_n}}{I_1} \dots\dots\dots(3.1)$$

Los límites dados en las tablas son usados como valores de diseño del sistema para casos extremos de operación normal, (condiciones de duración no mayor de una hora). Para períodos cortos, durante condiciones de arranque o condiciones inusuales, los límites pueden ser excedidos por un 50%.

Estas tablas pueden ser aplicadas para rectificadores de seis puntos y situaciones de distorsión general.

La tabla lista los límites de corriente armónica, basada sobre el tamaño de la carga con respecto al tamaño de los sistemas de potencia para el cual la carga es conectada.

Es recomendado que la corriente de carga (Ic) sea calculada como el promedio de la corriente de demanda máxima de 12 meses anteriores.

TABLA 3.3 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE PARA SISTEMAS DISTRIBUCIÓN GENERALES

MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA EN PORCENTAJE DE LA CORRIENTE DE CARGA						
ARMÓNICAS DE ORDEN INDIVIDUAL (IMPARES)						
I _{cc} / I _c	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDH I (%)
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12

100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

TABLA 3.4 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE PARA SISTEMAS DE SUBTRANSMISIÓN (69kV – 161kV)

MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA EN PORCENTAJE DE LA CORRIENTE DE CARGA						
ARMÓNICAS DE ORDEN INDIVIDUAL (IMPARES)						
I _{cc} / I _c	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDH I (%)
<20	2	1	0.75	0.30	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50<100	5	2.5	2	0.75	0.35	6
100<1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

TABLA 3.5 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE PARA SISTEMAS DE TRANSMISIÓN GENERALES (>161kV) DE GENERACIÓN Y COGENERACIÓN DISPERSA.

MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA EN PORCENTAJE DE LA CORRIENTE DE CARGA						
ARMÓNICAS DE ORDEN INDIVIDUAL (IMPARES)						
I _{cc} / I _c	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDH I (%)
<50	2	1	0.75	0.30	0.15	2.5
>50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

3.2.3 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJE

Los límites de distorsión de voltaje recomendados en la tabla anterior, son relacionados con el siguiente índice:

THD V: Distorsión de voltaje armónico total en medida porcentual de voltaje a la frecuencia fundamental nominal.

El THD V, está definido como:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \dots\dots\dots(3.2)$$

Los límites listados en la tabla 3.6 son usados como valores dados del sistema para casos extremos de operación normal (condiciones perdurablemente grandes como de una hora).

Para períodos cortos, durante condiciones inusuales o arranque de motores, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

TABLA 3.6 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJE

VOLTAJE DEL BUS EN EL PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMÚN (PCC)	PORCENTAJE DE DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE VOLTAJE	PORCENTAJE DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE (THD V)
69kV y menores	3	5
69kV hasta 161 kV	1.5	2.5
161kV y mayores	1.0	1.5

3.3 EFECTO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

3.3.1 IMPACTO SOBRE LOS BANCOS DE CAPACITORES

En los sistemas eléctricos de potencia, se usan los bancos de capacitores para control de voltaje para mejorar o corregir el factor de potencia, pero su frecuencia constituye una de las componentes que afectan las características de la llamada respuesta a la frecuencia del sistema, ya que la conexión de los capacitores puede dar lugar a condiciones de resonancia en serie o en paralelo, que eventualmente amplifican los problemas de armónicas.

3.3.2 CONDICIONES RESONANTES

Las condiciones de resonancia son aquellas en las que un sistema pasa de ser inductivo a capacitivo o viceversa, este cambio provoca problemas muy graves como pueden ser sobrecorrientes o sobrevoltaje los cuales ocasionan el fallo y/o destrucción de equipos que se encuentran expuestos a estos fenómenos de resonancia.

Las condiciones de resonancia del sistema son factores importantes que afectan los niveles armónicos del mismo. La *resonancia paralelo* se manifiesta como una impedancia grande al flujo de la corriente armónica, mientras que la *resonancia serie* se manifiesta como una impedancia pequeña.

Cuando las condiciones resonantes no son un problema, es porque el sistema tiene la capacidad de absorber cantidades significativas de corrientes armónicas.

3.3.2.1 FLUJOS NORMALES DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS

Las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no-lineales (fuentes armónicas) hacia la impedancia más pequeña, usualmente, la fuente de la compañía eléctrica.

La impedancia de la fuente de la compañía eléctrica es mucho más pequeña que las trayectorias paralelo presentadas por las cargas. Sin embargo, la corriente armónica se divide dependiendo de las relaciones de impedancia. Las armónicas de alto orden fluirán hacia los elementos capacitivos, los cuales presentan pequeñas impedancias a altas frecuencias.

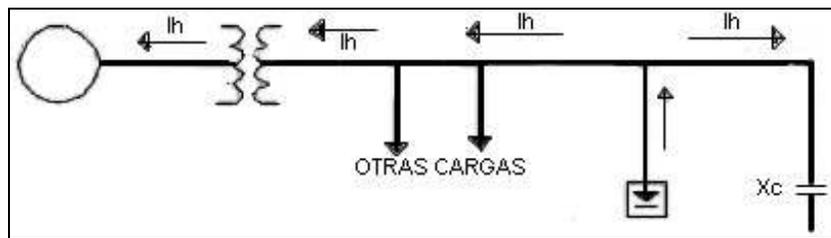


FIGURA 3.4 FLUJOS NORMALES DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN LA RED

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso. Por esta razón las corrientes armónicas siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas varían según la frecuencia. De tal modo que la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia y la resistencia se incrementa en menor medida, mientras que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia.

Así las armónicas fluyen hacia donde se le presenta menos resistencia a su paso, esto se muestra en la figura 3.5.

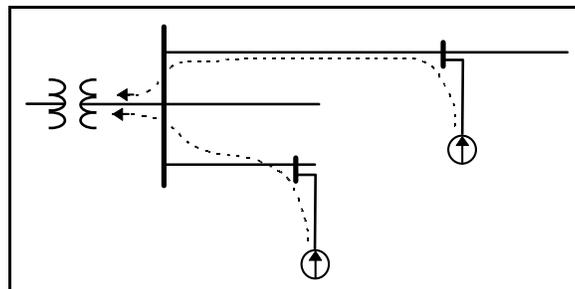


FIGURA 3.5 TRAYECTORIA DE LAS ARMÓNICAS EN UN SISTEMA INDUCTIVO

En cambio, si al sistema de la figura 3.5 se le incluye un banco de capacitores como se muestra en la figura 3.6, da lugar a unas trayectorias distintas para las armónicas.

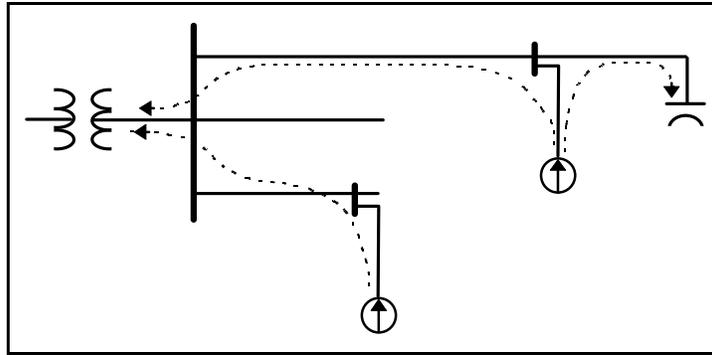


FIGURA 3.6 EFECTO DE LOS CAPACITORES EN LAS TRAYECTORIAS DE LAS ARMÓNICAS

La trayectoria que siguen las armónicas también depende del tipo de sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, así como las conexiones de los transformadores que se encuentra a su paso.

Las armónicas que se presentan en sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencias positiva, negativa y cero.

Esto se puede ver en el siguiente sistema trifásico balanceado:

$$\begin{aligned}
 I_a &= I \text{ sen}(h\delta_a) \\
 I_b &= I \text{ sen}(h\delta_b) \\
 I_c &= I \text{ sen}(h\delta_c) \dots\dots\dots(3.3)
 \end{aligned}$$

Donde, para que sea un sistema trifásico balanceado, entonces:

$$\begin{aligned}
 \delta_a &= \omega t \\
 \delta_b &= \omega t - 120^\circ \\
 \delta_c &= \omega t + 120^\circ \dots\dots\dots(3.4)
 \end{aligned}$$

De esta manera para los diferentes valores de h se tiene que:

Para $h=1$ (secuencia positiva)

$$\begin{aligned}
 I_a &= I \text{ sen}(\delta_a) = I \text{ sen}(\omega t) \\
 I_b &= I \text{ sen}(\delta_b) = I \text{ sen}(\omega t - 120^\circ) \\
 I_c &= I \text{ sen}(\delta_c) = I \text{ sen}(\omega t + 120^\circ) \dots\dots\dots(3.5)
 \end{aligned}$$

Para $h=2$ (secuencia negativa)

$$\begin{aligned}
 I_a &= I \text{ sen}(2 \delta_a) = I \text{ sen}(2 \omega t) &= I \text{ sen}(2 \omega t) \\
 I_b &= I \text{ sen}(2 \delta_b) = I \text{ sen}(2 \omega t - 240^\circ) = I \text{ sen}(2 \omega t + 120^\circ) \\
 I_c &= I \text{ sen}(2 \delta_c) = I \text{ sen}(2 \omega t + 240^\circ) = I \text{ sen}(2 \omega t - 120^\circ) \dots\dots\dots(3.6)
 \end{aligned}$$

Para $h=3$ (secuencia cero)

$$\begin{aligned}
 I_a &= I \text{ sen}(3 \delta_a) = I \text{ sen}(3 \omega t) &= I \text{ sen}(3 \omega t) \\
 I_b &= I \text{ sen}(3 \delta_b) = I \text{ sen}(3 \omega t - 360^\circ) = I \text{ sen}(3 \omega t) \\
 I_c &= I \text{ sen}(3 \delta_c) = I \text{ sen}(3 \omega t + 360^\circ) = I \text{ sen}(3 \omega t) \dots\dots\dots(3.7)
 \end{aligned}$$

De aquí en adelante se repiten las secuencias, quedando así la relación que existe entre las armónicas y las secuencias mostradas en la tabla 3.7.

TABLA 3.7 RELACIÓN ENTRE LAS SECUENCIAS Y LAS ARMÓNICAS

secuencia	1	2	0	1	2	0	1	2
armónica	1	2	3	4	5	6	7	8

De esta manera el comportamiento de las armónicas es similar al comportamiento de las secuencias.

Es por esta razón que ante la presencia de armónicas en la corriente del sistema, se tengan corrientes que circulan de una manera similar a las corrientes de secuencia.

De este modo se tiene que como las corrientes de secuencia cero tienden a fluir por los neutros del sistema, entonces este comportamiento lo tienen las armónicas múltiplos de tres. Este efecto se puede ver en la figura 3.7 y 3.8.

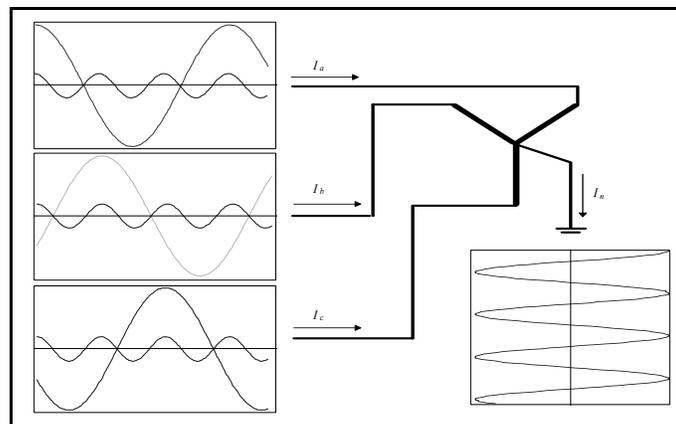


FIGURA 3.7 CIRCULACIÓN DE LA TERCERA ARMÓNICA POR EL NEUTRO DE TRANSFORMADORES

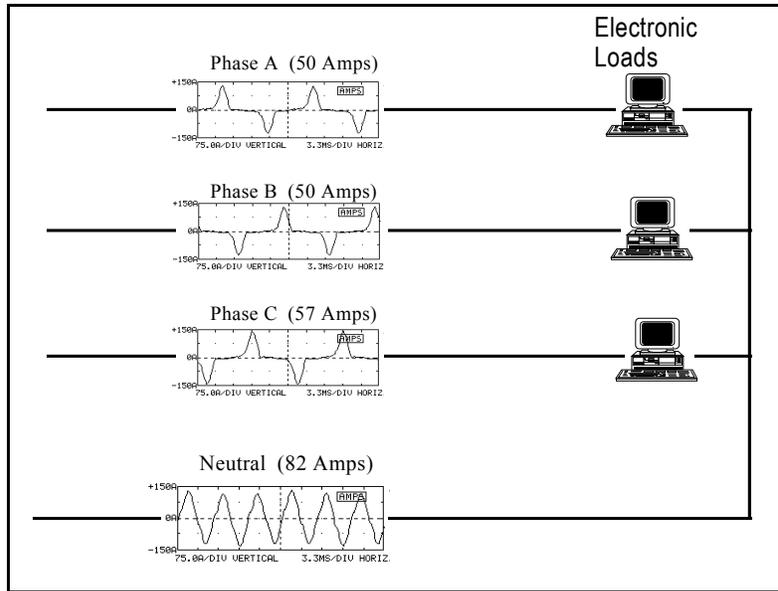


FIGURA 3.8 CIRCULACIÓN DE LA TERCERA ARMÓNICA POR EL NEUTRO DEL SISTEMA

3.3.2.2 RESONANCIA PARALELO

La resonancia paralelo ocurre cuando las reactancias inductiva y capacitiva resultan ser iguales a la misma frecuencia. Si la combinación de los bancos de capacitores y la inductancia del sistema resultan en una resonancia paralelo cerca de una de las armónicas características generadas por la carga no-lineal, esa corriente armónica excitará el "circuito tanque", de ese modo dará origen a una corriente amplificada que oscilará entre la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en la capacitancia. Esta corriente elevada de oscilación puede causar la distorsión del voltaje y la interferencia telefónica cuando el circuito de distribución y algún circuito de telecomunicaciones estén próximos físicamente.

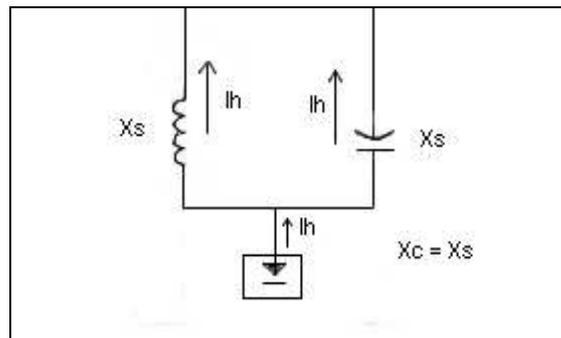


FIGURA 3.9 RESONANCIA PARALELO

Desde un punto de vista práctico, este efecto se presenta cuando el equivalente del sistema en el cual esta conectado un banco de capacitores, se iguala a la impedancia equivalente del banco de capacitores (quedando en paralelo). Esto se observa en la figura 3.10.

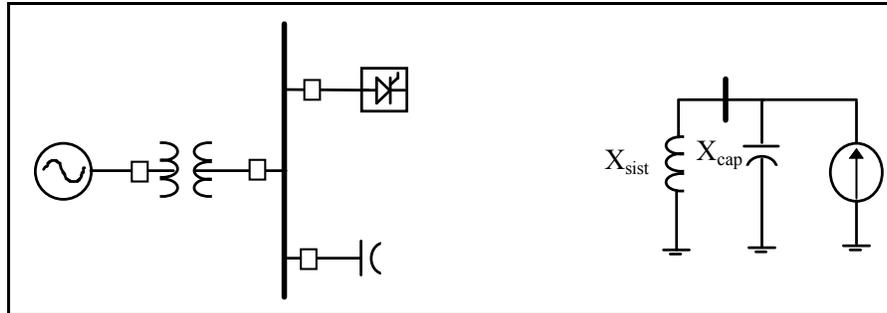


FIGURA 3.10 CIRCUITO RESONANTE PARALELO

Entonces este equivalente paralelo esta dado por:

$$Z_{eq} = \frac{X_{sist} X_{cap}}{X_{sist} - X_{cap}} \dots\dots\dots(3.8)$$

Entonces, al igualarse estas impedancias a una cierta frecuencia, la impedancia equivalente se hace infinito y, al existir una fuente de corriente a esa frecuencia en paralelo, entonces se tienen sobrevoltajes ocasionando grandes corrientes entre el sistema y el banco de capacitores.

De esta manera para que estas dos impedancias se iguales se necesita que exista esta frecuencia llamada de resonancia, dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{sist}}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVar_{CAP}}} \times 60 \text{ Hz} \dots\dots\dots(3.9)$$

Donde MVA_{CC} es la capacidad de corto circuito donde esta conectado el banco de capacitores y los $MVar_{CAP}$ es la capacidad del banco de capacitores.

Como se puede observar si se tiene una planta la cual esta conectada a un mismo voltaje y tiene un mismo banco de capacitores pero diferentes valores MVA_{CC} , entonces el sistema responde de manera distinta, tal y como lo muestra la figura 3.11.

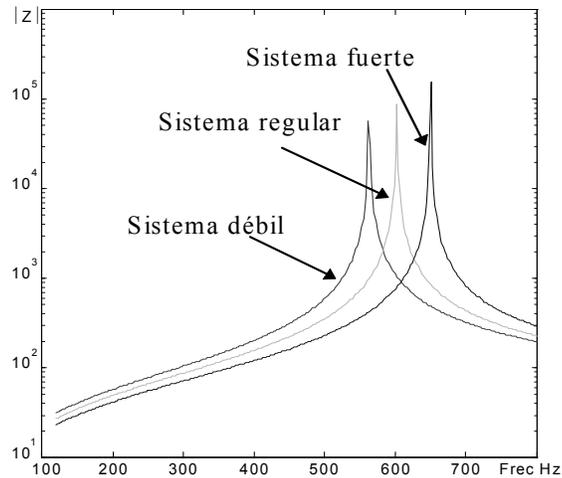


FIGURA 3.11 EFECTO DEL SISTEMA A LA RESONANCIA PARALELO

La figura 3.11 muestra que a medida que el sistema sea más débil, se tiene que las frecuencias de resonancia se acercan cada vez más a frecuencias que pueden existir en el sistema, por ejemplo la 3^a, 5^a o 7^a armónica, ocasionando así problemas casi seguros de resonancia llevando a la destrucción al banco de capacitores.

3.3.2.3 RESONANCIA SERIE

La resonancia serie es el resultado de la combinación serie del banco de capacitores y las inductancias del transformador o la línea. La resonancia serie presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas y tienden a "atrapar" alguna corriente armónica a la cual esté sintonizado el circuito LC resultante. La resonancia serie puede resultar en niveles altos de distorsión de voltaje entre la inductancia y el capacitor en el circuito serie.

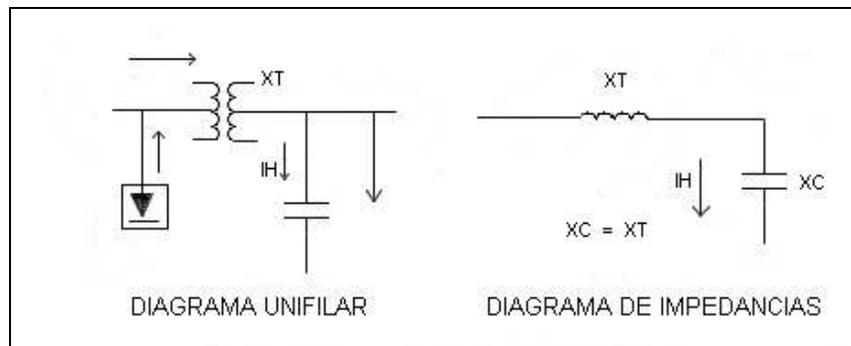


FIGURA 3.12 RESONANCIA EN SERIE

En forma práctica esta resonancia serie puede presentarse en sistemas industriales los cuales tienen una configuración similar a la figura 3.13.

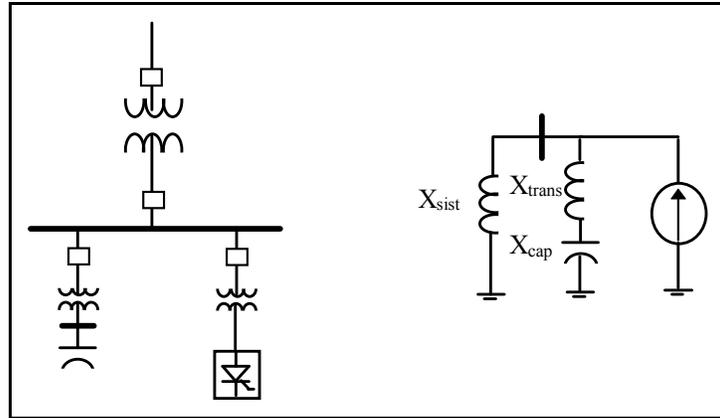


FIGURA 3.13 SISTEMA RESONANTE SERIE

Entonces al igualarse la impedancia del transformador con el banco de capacitores, se tiene que la impedancia equivalente esta dada por:

$$Z_{eq} = X_{trans} - X_{cap} \dots\dots\dots(3.10)$$

Donde al igualarse estas impedancias se tiene una equivalente igual a cero, dando como resultado una corriente grande a través de estos elementos.

Así mismo, la frecuencia de resonancia serie esta dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{1}{L_{trans} C}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{trans}}} \times 60 \text{ Hz} \dots\dots\dots(3.11)$$

Además de que también existe una resonancia paralelo con el sistemas dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{sist} + X_{trans}}} \times 60 \text{ Hz} \dots\dots\dots(3.12)$$

La figura 3.14 muestra el efecto del sistema sobre la resonancia serie.

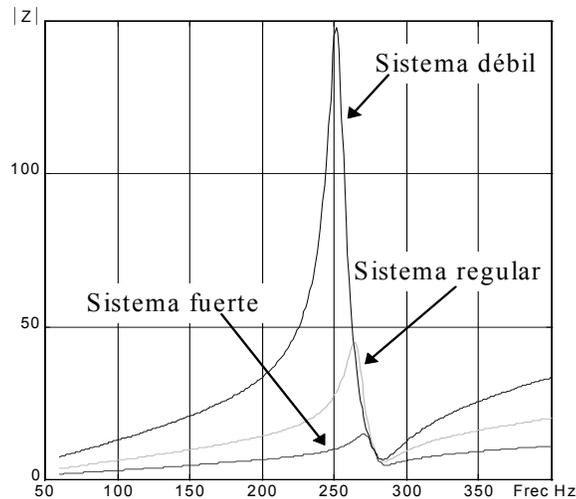


FIGURA 3.14 EFECTO DEL SISTEMA A LA RESONANCIA SERIE

La figura 3.14 muestra que a medida que el sistema es más débil, se tienen impedancias muy grandes antes de la resonancia, pudiendo ocasionar estos picos sobrevoltajes armónicos muy fuertes.

Para determinar el efecto de resonancia de los capacitores, se puede hacer un análisis, simplificando a partir del circuito equivalente de la instalación de un banco de capacitores en un sistema, como se ve en las figuras 3.15 a) y b).

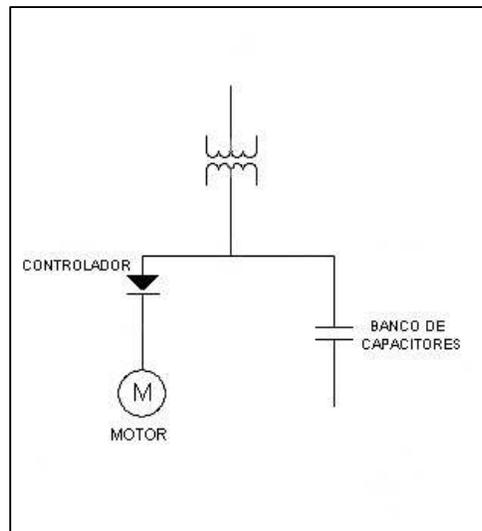


FIGURA 3.15 a) INSTALACIÓN DE UN BANCO DE CAPACITORES EN UN SISTEMA

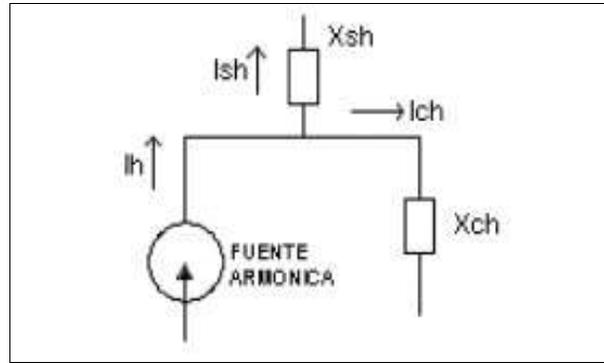


FIGURA 3.15 b) CIRCUITO EQUIVALENTE DE INSTALACIÓN DE UN BANCO DE CAPACITORES EN UN SISTEMA

De la figura anterior:

X_{sh} = Reactancia equivalente del sistema a la armónica h .

I_h = Corriente armónica (h) producida por la fuente armónica.

X_c = Reactancia capacitiva del banco a la armónica h .

I_{ch} = Corriente en el capacitor a la armónica h .

La reactancia del sistema a la frecuencia o armónica h es:

$$X_{sh} = h \cdot X_{s1} \dots \dots \dots (3.13)$$

Donde X_{s1} = reactancia del sistema a la frecuencia fundamental.

También:
$$X_{ch} = \frac{X_{c1}}{h} \dots \dots \dots (3.14)$$

La corriente en la rama capacitiva del circuito es:

$$I_{ch} = \frac{I_h}{1 - \frac{X_{c1}}{h^2 X_{s1}}} \dots \dots \dots (3.15)$$

Y la frecuencia de resonancia:

$$h_o = \sqrt{\frac{X_{c1}}{X_{s1}}} \dots \dots \dots (3.16)$$

También
$$h_o = \sqrt{\frac{KVA_{CC}}{KVAR_C}} \dots \dots \dots (3.17)$$

Siendo: KVA cc = Potencia de corto circuito trifásico.

KVARc = Potencia del capacitor en KVAR.

La corriente a plena carga a la frecuencia fundamental en el banco de capacitores se calcula como:

$$I_{C1} = \frac{Q}{\sqrt{3}kV} \dots\dots\dots(3.18)$$

Donde: Q = Potencia trifásica del banco.

kV = Tensión de fase a fase en kilovolts.

Ic1 = Corriente capacitiva a la frecuencia fundamental

3.3.2.4 RAZÓN DE CORTO CIRCUITO

La razón de corto circuito es la razón que existe entre la capacidad del sistema y la capacidad de la carga no lineal conectado al sistema.

$$SCR = \frac{MVA_{cc}}{MW_{rect}} \dots\dots\dots(3.19)$$

Las recomendaciones expresan que si el SCR es menor a 20 entonces pueden existir fuertes problemas de resonancia.

3.3.3 EFECTO EN TRANSFORMADORES.

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que, operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro.

De manera individual, el efecto de las armónicas en estas pérdidas se explica a continuación:

3.3.3.1 PÉRDIDAS SIN CARGA O DE NÚCLEO

Producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que

no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.

3.3.3.2 PÉRDIDAS I^2R

Si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

3.3.3.3 PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY

Estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto en también en su temperatura). Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h \max} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \dots\dots\dots(3.20)$$

Donde:

h = armónica.

I_h = corriente de la armónica h, en amperes.

I_R = corriente nominal, en amperes.

P_e, R = pérdidas de Eddy a corriente y frecuencia nominal.

3.3.3.4 PÉRDIDAS ADICIONALES

Estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado.

En el caso de transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas múltiplos de 3 circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas en ésta produciendo sobrecalentamiento de los devanados.

Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en el lado primario sean menores que en el secundario.

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran

energía a este tipo de cargas, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1.

Estos transformadores son aprobados por UL (Underwriter's Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están:

El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas múltiplos de 3 circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.

Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado.

Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación (3.21) que lo define es:

$$FactorK = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_{h(pu)}]^2 h^2 \dots\dots\dots(3.21)$$

Donde:

h = armónica

I_{1rms} = Corriente fundamental en rms.

I_{rms} = Corriente total en rms.

I_{h(pu)} = corriente armónica en p.u. tomando como base la corriente Irms.

Con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado. La Tabla 3.8 muestra los valores comerciales de transformadores con factor K.

TABLA 3.8 TRANSFORMADORES CON FACTOR K DISPONIBLES COMERCIALMENTE.

K-4
K-9
K-13
K-20
K-30
K-40

3.3.4 EFECTO EN EL NEUTRO.

En un sistema trifásico, la forma de onda de tensión de cada fase, entre fase y neutro, está desfasada 120° de forma que, cuando cada una de las fases tiene la misma carga, la corriente combinada en el neutro es cero. Cuando las cargas no están equilibradas, por el neutro sólo circulará la corriente neta correspondiente al desequilibrio de las cargas.

En el pasado, los instaladores, con la aprobación de las autoridades que redactan los reglamentos industriales, han aprovechado esta circunstancia para colocar conductores neutros de sección 50% menor que la de los conductores de fase. Sin embargo, aunque las corrientes fundamentales se anulan entre sí, no ocurre lo mismo con las corrientes armónicas. De hecho, aquellas que son un múltiplo impar del triple de la fundamental, los denominados armónicos "triple-N", se suman en el conductor neutro.

Los casos encontrados en edificios comerciales, generalmente muestran corrientes en el neutro de magnitudes comprendidas entre el 150% y el 210% de las corrientes de fase. En muchos casos en un conductor de sección mitad que la de los conductores de fase.

En el caso de que se estén alimentando cargas no lineales, es recomendable que las barras de neutros tengan una capacidad de corriente igual al doble de la de las fases.

La figura 3.16 muestra este efecto. En este diagrama las corrientes de cada fase, que se representan en la parte superior, están desfasadas 120° . El tercer armónico de cada fase es idéntico para las tres, siendo su frecuencia el triple de la fundamental y, por tanto, su periodo un tercio del de la onda fundamental. En la figura se muestra la corriente resultante de los tres terceros armónicos. En este caso una corriente del tercer armónico de una amplitud del 70% de la fundamental en cada fase da como resultado una corriente con una amplitud del 210% en el neutro.

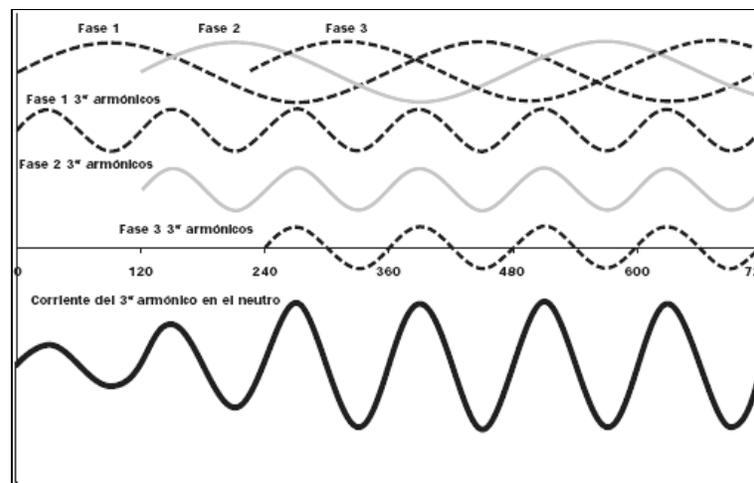


FIGURA 3.16 SUMA DE LAS TRES CORRIENTES TRIPLE-N EN EL NEUTRO.

3.3.5 EFECTO EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

Fundamentalmente, las armónicas producen efectos al disminuir la eficiencia y el torque generado por los motores. Éste ha sido el tema de análisis de muchos artículos por su importancia en la industria.

Si el voltaje que se alimenta a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces incrementarán sus pérdidas I^2R en el rotor y estator, pérdidas de núcleo (Eddy e histéresis) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas de fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas. En forma más detallada, tenemos el siguiente análisis de las pérdidas.

Pérdidas I^2R en el estator: según IEEE, las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R .

Pérdidas I^2R en el rotor: éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

Pérdidas de núcleo: estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Éstas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.

Pérdidas adicionales: son muy difíciles de cuantificar aun bajo condiciones de voltaje senoidal. Al aplicar voltaje no senoidal, éstas aumentan en forma particular para cada máquina.

Torque en el motor de inducción: las armónicas de secuencia positiva producen en el motor de inducción un torque en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de secuencia negativa tienen el efecto opuesto. En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las armónicas múltiplos de tres es igual a cero. Dependiendo del contenido armónico del voltaje aplicado, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente, sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de las de secuencia positiva, por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resultan torques pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a estas variaciones. Estos torques pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica, lo que resultaría

en oscilaciones que pueden causar fatiga de la flecha y otras partes mecánicas conectadas. Por lo general la magnitud de estos torques es generalmente pequeña y su valor promedio es cero.

Respecto a las ondas producidas por ondas de alta frecuencia, tanto en sentido directo como en sentido inverso, se consideran que los flujos magnéticos correspondientes no tienen tiempo de penetrar al fondo de la ranura del rotor y por lo tanto tienen valores insignificantes, aunque si producen ruidos, saturación magnética y pérdidas por efecto joule.

3.3.6 EFECTOS EN OTROS EQUIPOS.

Los equipos electrónicos sensitivos son susceptibles a operación incorrecta a causa de las armónicas. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada.

En lo que respecta a equipo de medición e instrumentación, éstos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

3.3.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS TÍPICOS

Es difícil describir completamente todas las características que afectan a la respuesta en frecuencia del sistema. Sin embargo, es importante observar algunas características básicas para diferentes tipos de sistemas. Esas características básicas, junto con las técnicas de cálculo, se pueden utilizar para determinar, en todo caso, el análisis más detallado para un sistema específico.

TABLA 3.9 EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS SOBRE EQUIPOS

EQUIPO	EFECTO DE ARMÓNICAS	RESULTADO
<p>CAPACITORES</p> <p>(Todos, no sólo los destinados a corregir el factor de potencia)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La impedancia del sistema decrece al incrementarse la frecuencia, así los capacitores actúan como un sumidero a donde las armónicas convergen. Sin embargo, los capacitores no producen armónicas. -La industria del sistema de alimentación puede entrar en resonancia con capacitores a varias frecuencias armónicas, causando grandes corrientes y voltajes. - Los capacitores secos no disipan muy bien el calor y, por consiguiente, son más susceptibles al daño por armónicas. - Ruptura del material aislante. - Los capacitores usados en computadoras son particularmente susceptibles, cuando estas no están usualmente protegidas por fusibles o 	<ul style="list-style-type: none"> - Calentamiento de los capacitores, debido a un incremento en las pérdidas dieléctricas. - Corto circuito. - Fallas de fusibles. -Explosión de capacitores.

	relevadores. - Como regla general, los capacitores y dispositivos de transferencia son incompatibles.	
TRANSFORMADORES	- Las armónicas de voltaje causan alto voltaje y esfuerzos en el aislamiento; normalmente esto no es un problema significativo.	- Calentamiento del transformador. - Reducción de la vida útil. - Incremento de las pérdidas en el hierro y en el cobre. - Esfuerzos en el aislamiento. - Ruido
MOTORES	- Incremento de las pérdidas. - Armónicas del voltaje producen campos magnéticos rotatorios a una velocidad correspondiente a la frecuencia armónica.	-Calentamiento del motor. -Vibraciones mecánicas y ruido. - Impulsos de par de torsión. -Incremento de pérdidas en el hierro y el cobre en los devanados del rotor y del estator. En un 5-10%. - Reducción de la eficiencia. - Reducción de la vida útil. - Esfuerzos en el aislamiento de los devanados del motor.
INTERRUPTORES (Circuit breakers)	Las bobinas pueden no operar apropiadamente en presencia de corrientes armónicas.	- Falla al pretender interrumpir corrientes. - Falla del interruptor.
INDUCCION ELECTROMECHANICA EN DISCOS DE RELEVADORES	Producen componentes adicionales al par, originando un efecto de retraso de tiempo en las características de operación del relevador.	- Velocidad incorrecta en relevador. -Lecturas incorrectas.
WATTHORIMETROS, RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE	Las armónicas producen un par adicional sobre el disco de inducción, causando una operación indeseable pues estos dispositivos son solamente calibrados para operar a la frecuencia fundamental.	-Lecturas incorrectas.
EQUIPOS DE CONTROL ELECTRÓNICO	Los controles electrónicos son usualmente dependientes del cruce cero y picos de voltaje para un control adecuado; sin embargo, las armónicas pueden alterar significativamente estos parámetros, de tal manera que afectan en forma adversa su operación.	

3.3.8 ASPECTOS QUE REDUCEN LA POSIBILIDAD DE FALLA EN CAPACITORES

1. La potencia total reactiva no deberá exceder el 135% de los kVAR's nominales.
2. La corriente de vida a la fundamental, más la de las armónicas, no debe rebasar el 180% del valor nominal RMS.

3. El valor RMS del voltaje aplicado, no debe ser mayor al 110% del voltaje en sus terminales y el valor máximo al 120%.

La aplicación de capacitores para corregir factor de potencia en una instalación donde hay cargas que producen armónicas, pueden entrar en resonancia paralela con la inductancia del sistema de energía, resultando en una amplificación de las corrientes armónicas e incrementando la magnitud de los voltajes del sistema.

CAPITULO IV

LAS CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA

4.1 LA IMPEDANCIA DEL SISTEMA

A la frecuencia fundamental (60 Hz en México) los sistemas de potencia son primeramente inductivos y la impedancia equivalente de los mismos en algunas ocasiones se le llama simplemente "La reactancia de corto circuito". Los efectos capacitivos se desprecian frecuentemente en las redes de distribución y en los sistemas eléctricos industriales.

Una de las cantidades que se usan con mayor frecuencia en el estudio de armónicas de los sistemas eléctricos es la impedancia de corto circuito, al punto en la red en el cual se localiza el capacitor. Cuando no se tiene disponible en forma directa, se puede calcular a partir de los resultados de un estudio de corto circuito expresados en MVA, o bien, de la corriente de corto circuito como se indica a continuación:

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$Z_{cc} = \frac{kV^2}{MVA_{cc}} = \frac{I_{cc}}{\sqrt{3}kV} \dots\dots\dots(4.2)$$

Donde:

- Z_{cc} = Impedancia de corto circuito.
- R_{cc} = Resistencia de corto circuito.
- X_{cc} = Reactancia de corto circuito.
- kV = Voltaje de fase a fase en kV.
- MVA_{cc} = Potencia de cortocircuito trifásico en MVA.
- I_{cc} = Corriente de corto circuito en A.

La porción de reactancia inductiva de la impedancia cambia en forma lineal en la frecuencia y, entonces, es necesario ajustar la reactancia al valor de la frecuencia; el valor de esta reactancia a la armónica se determinará a partir de la reactancia a la frecuencia fundamental X_1 , de acuerdo con la expresión:

$$X_h = hX_1 \dots\dots\dots(4.3)$$

En la mayoría de los sistemas de potencia se puede suponer, por lo general, que la resistencia no cambia en forma significativa cuando se estudia el efecto de las armónicas inferiores a la 9ª.

A los voltajes de utilización, tales como los usados en los sistemas eléctricos de potencia industriales, la reactancia equivalente del sistema está frecuentemente dominada por la impedancia del transformador de servicio, una buena aproximación para la reactancia de corto circuito X_{cc} se puede basar en la impedancia del transformador únicamente.

$$X_{cc} = X_t \dots\dots\dots(4.4)$$

La impedancia del transformador en Ohms se puede determinar de la impedancia en por ciento dada como dato de placa:

$$X_t = \frac{kV^2}{MVA_3\phi} * Z_t(\%) \dots\dots\dots(4.5)$$

kV = Voltaje de fase a fase

La expresión anterior, supone que la impedancia es predominantemente reactiva. Por ejemplo, un transformador de 1 000 kVA a 440 volts en el lado de baja tensión (un 5% de impedancia) tiene un valor de reactancia equivalente referida a 440 V de:

$$X_t = \frac{kV^2}{MVA_3\phi} * Z_t(\%) = \left(\frac{0.440^2}{1.0} \right) * (0.05) = 0.00968\Omega$$

El valor de esta impedancia a tercera armónica sería:

$$X_{t3} = 3 \times 0.00968 = 0.02904 \Omega$$

El valor de la quinta armónica sería:

$$X_{t5} = 5 \times 0.00968 = 0.0484 \Omega$$

4.2 LA IMPEDANCIA DEL CAPACITOR

Los capacitores en derivación, ya sean localizados en el punto del usuario para fines de corrección del factor de potencia, o bien, en la red de distribución de la compañía suministradora, alteran en forma muy importante la impedancia del sistema con la variación de la frecuencia. Los capacitores por sí mismos no crean armónicas, pero algunas distorsiones importantes se pueden atribuir a su presencia, en tanto que la reactancia inductiva de alguna componente aumenta en forma proporcional con la frecuencia, la reactancia capacitiva X_c decrece en forma proporcional.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc} \dots\dots\dots(4.6)$$

Donde C es la capacitancia en Farads, esta cantidad se puede expresar en forma distinta cuando la capacidad del capacitor se expresa por su potencia en MVAR, el valor

equivalente de la reactancia capacitiva de línea a neutro a la frecuencia fundamental para un banco de capacitores se puede calcular con la expresión:

$$X_c = \frac{kV^2}{MVA_r} = \frac{kV^2 * 1000}{kVA_r} \dots\dots\dots(4.7)$$

Cuando se trata de bancos trifásicos, se usa el voltaje de fase a fase y la potencia trifásica, mientras que para unidades monofásicas se usa el voltaje de cada bote o recipiente por fase y el valor nominal de la potencia reactiva.

EJEMPLO:

Para un banco de capacitores trifásico de 1200 KVAR, 13.8 kV, la reactancia en Ohms es:

$$X_c = \frac{kV^2}{MVA_r} = \frac{13.8^2}{1.2} = 158.7\Omega$$

La mayoría de los circuitos tienen capacitancias e inductancias que tienen una o más frecuencias naturales. Cuando una de estas frecuencias se alinea con una frecuencia que se está produciendo en el sistema de potencia, se puede desarrollar la resonancia en la cual los voltajes y corrientes continúan persistiendo a muy altos valores; esta es la raíz de la mayoría de los problemas con distorsión armónica en los sistemas eléctricos.

La frecuencia resonante para una combinación particular de inductancia y capacitancia, se puede calcular con distintas fórmulas, dependiendo de qué variables están disponibles. La ecuación básica de la frecuencia resonante es:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(4.8)$$

Como frecuentemente no se disponen de los valores de L y C, se pueden usar en forma indistinta cualquiera de las fórmulas siguientes:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{cc}}} = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVAR_{cap}}} \dots\dots\dots(4.9)$$

$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_t * 100}{kVAR_{cap} * Z_t(\%)}} \dots\dots\dots(4.10)$$

Donde:

- Hr = Armónica resonante.
- Xc = Reactancia capacitiva.

X_{cc} = Reactancia capacitiva de corto circuito del sistema.
 MVA_{cc} = MVA de corto circuito.
 $MVAR_{cap}$ = MVA del banco de capacitores
 $KVAT$ = KVA del transformador reductor.
 Z_t = Impedancia del transformador reductor.
 $KVAR_{cap}$ = Capacidad en KVAR de banco.

EJEMPLO:

Calcular la armónica resonante para el circuito de una industria en donde el transformador reductor de 1000 KVA con una impedancia dominante del 5% tiene conectado un banco de capacitores en derivación de 300 KVAR.

La armónica resonante es:

$$hr = \sqrt{\frac{kVA_t * 100}{KVAR_{cap} * Z_t(\%)}} = \sqrt{\frac{1000 * 100}{300 * 5}} = 8.16$$

Una respuesta adversa del sistema a las armónicas se puede modificar por diferentes métodos:

1. Agregando un filtro paralelo (derivación).
2. Agregando un reactor para desintonizar el sistema.
3. Cambiando el tamaño del capacitor.
4. Moviendo un capacitor a un punto del sistema con una impedancia de corto circuito diferente o mayores pérdidas.
5. Retirando un capacitor y simplemente aceptando las pérdidas más altas, menores voltajes y penalización por factor de potencia.

4.3 DISPOSITIVOS PARA FILTRAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

Debido a que cuando la distorsión armónica excede a ciertos valores produce los problemas que se han descrito anteriormente, es necesario en ciertos casos diseñar dispositivos para eliminar esta distorsión armónica, estos dispositivos se conocen como filtros.

4.4 TÉCNICAS PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICAS

La forma de mitigar estos problemas se pueden enumerar de la siguiente manera:

4.4.1 REDUCIR LA APORTACIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS

Reducir la aportación de corrientes armónicas provenientes de las fuentes que las generan es mediante:

- Cuando se trata de fuentes de armónicas provenientes de lámparas, es recomendable utilizar conexión delta-estrella del transformador de alimentación con el fin de atrapar las armónicas de secuencia cero.
- Si las armónicas provienen de un transformador, lo mejor será cambiar el transformador o liberarle carga.
- Si se trata de un controlador de velocidad, una buena opción es conectar un reactor limitador en la alimentación de tal manera que atenúe la magnitud de las armónicas, además de servir como protección para estados transitorios.
- Si se trata de un rectificador de 6 pulsos, una opción es cambiarlo por uno de 12 pulsos, aunque económicamente no puede ser factible.
- En caso de tener varias cargas que utilicen rectificación conectadas a un mismo bus, entonces lo recomendable es que unos rectificadores se alimenten de un transformador delta-estrella y otros de un delta-delta, esto con el fin de que se tenga cancelación de armónicas.

4.4.2 UTILIZANDO FILTROS SINTONIZADOS

La utilización de filtros es una buena opción pero no siempre es la más económica o factible, pues depende mucho de que problema se este tratando.

4.4.3 MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA A LA FRECUENCIA

Problema: Operación de los fusibles de bancos de capacitores debido a resonancia

Posible solución:

- Modificar la frecuencia de resonancia
- Poniendo un reactor en terminales del banco de capacitores, de tal manera que se modifiquen los MVAcc, esto no significa que se esté poniendo un filtro sintonizado.
- Cambiar el valor del banco de capacitores, esto traerá cambios en el FP, el cual se puede tratar de corregir mediante capacitores locales.
- Cambiar los capacitores a otros puntos donde se tengan diferentes capacidades de corto circuito.
- Definitivamente quitar los capacitores.

Problema: Interferencia telefónica, y/o mal operación de equipo de computo o equipo de control numérico.

Posibles soluciones:

- La interferencia telefónica se puede resolver mediante la modificación de la trayectoria de las armónicas, esto es: relocalizando capacitores de tal manera que las armónicas se dirijan hacia los bancos. Otra posibilidad es cambiar de lugar los cables por los cuales se sabe que circulan armónicas.

- Para la mala operación de equipos sensibles, la solución se complica un poco más, pues se puede tratar de un problema transitorio, por ejemplo depresiones de voltaje, flickers, sags, etc., dado que estos problemas de calidad de energía afectan grandemente a estos equipos. Lo más importante es tratar de alimentar a estos equipos de un modo tal, que no se esté expuesto o cerca de fuentes tales como: hornos eléctricos, rectificadores, lámparas, etc.
- Hacer lo mismo que para la interferencia telefónica.

4.5 FILTROS ACTIVOS

El principio de los filtros activos consiste en una fuente controlada de corriente cuyas armónicas tienen la misma magnitud y desfasadas 180° de las armónicas a eliminar. El principio de estos filtros se muestra en la figura 4.1

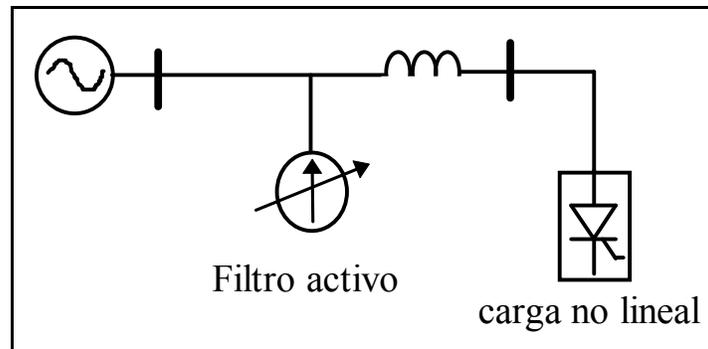


FIGURA 4.1 FILTRO ACTIVO SHUNT

La figura 4.2 muestra la configuración de un filtro activo.

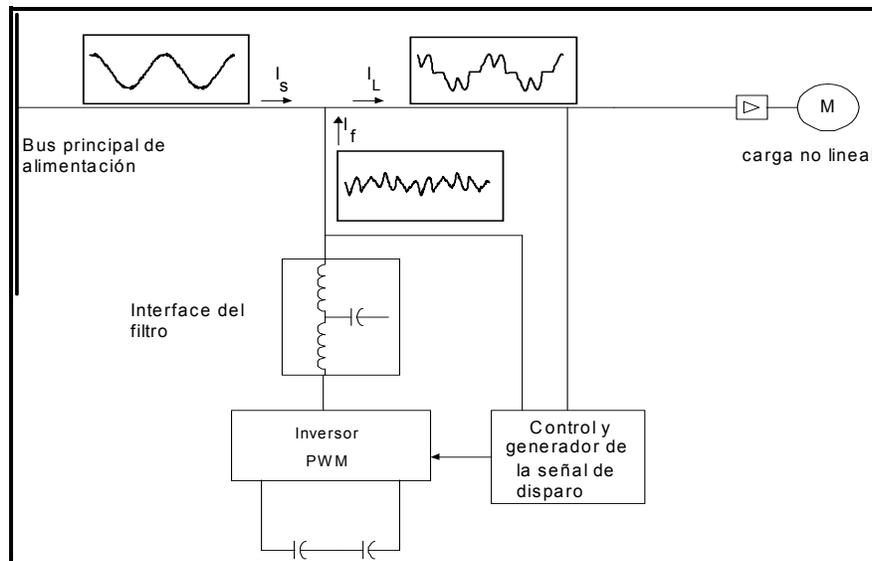


FIGURA 4.2 CONFIGURACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO

4.6 FILTROS PASIVOS

El filtro pasivo es un filtro que se sintoniza para una armónica en especial, o un rango determinado.

Estos filtros son los más utilizados en los sistemas eléctricos por su bajo costo y fácil instalación, aunque en algunos casos trae consigo problemas de resonancia. La figura 4.3 muestra la configuración de estos filtros.

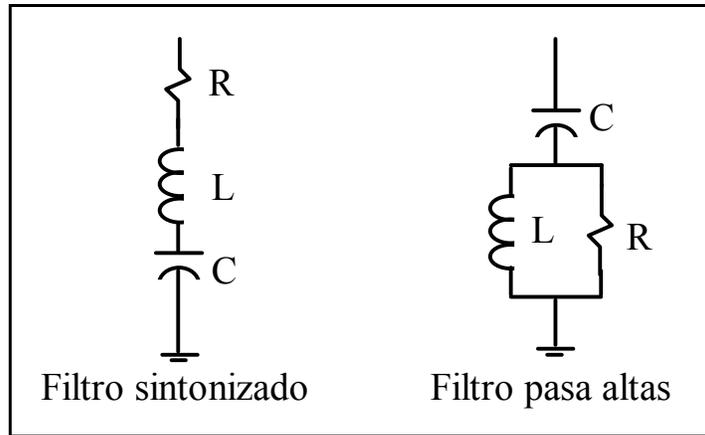


FIGURA 4.3 FILTROS PASIVOS SHUNT

Lo que hace el filtro es presentar una impedancia baja a una corriente de una frecuencia determinada, esto significa que los elementos del filtro entran en resonancia serie, ocasionando la circulación de esta corriente. De esta manera, a partir de un valor del banco de capacitores se obtiene el valor del reactor del filtro:

$$X_{cap} = \frac{KV^2}{MVAr_{CAP}} \dots\dots\dots(4.11)$$

$$X_{reac} = \frac{X_{cap}}{h^2} \dots\dots\dots(4.12)$$

Donde h es la armónica a la cual esta sintonizado el filtro y, por tanto, a la corriente que se quiere drenar.

El filtro sintonizado es utilizado para eliminar en forma individual las armónicas más bajas como la 3^a, 5^a y 7^a. En cambio el filtro pasa altas es utilizado para eliminar un rango de armónicas que tienen un valor pequeño de corriente, por lo general son usados para eliminar armónicas de la 11^a en adelante.

4.6.1 FILTRO SINTONIZADO

El cálculo de la resistencia del filtro ésta dado por la siguiente expresión:

$$R = \frac{X_{\text{reac}}(f_{\text{res}})}{Q} \dots\dots\dots(4.13)$$

Q Factor de calidad 20<Q<30

La figura 4.4 muestra la respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad.

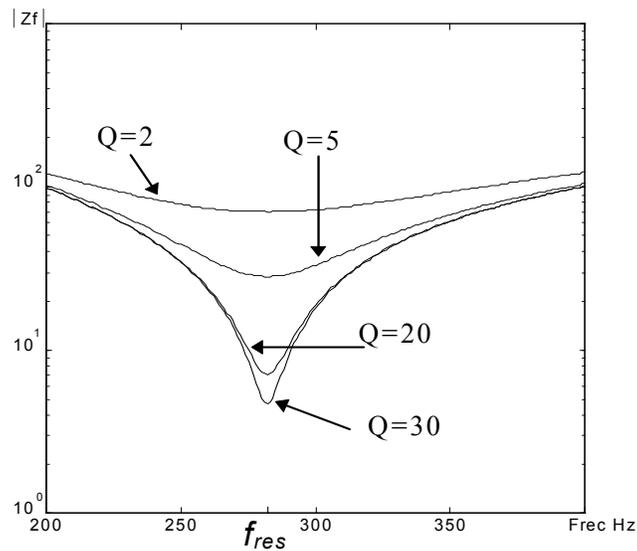


FIGURA 4.4 RESPUESTA DE UN FILTRO DE SINTONIZACIÓN

4.6.2 FILTRO PASA ALTAS

Para el filtro pasa altas el cálculo de la resistencia esta dado por

$$R = QX_{\text{reac}}(f_{\text{res}}) \dots\dots\dots(4.14)$$

Q Factor de calidad 0.5<Q<2

De esta manera la respuesta de este filtro para diferentes valores de factor de calidad se observa en la figura 4.5

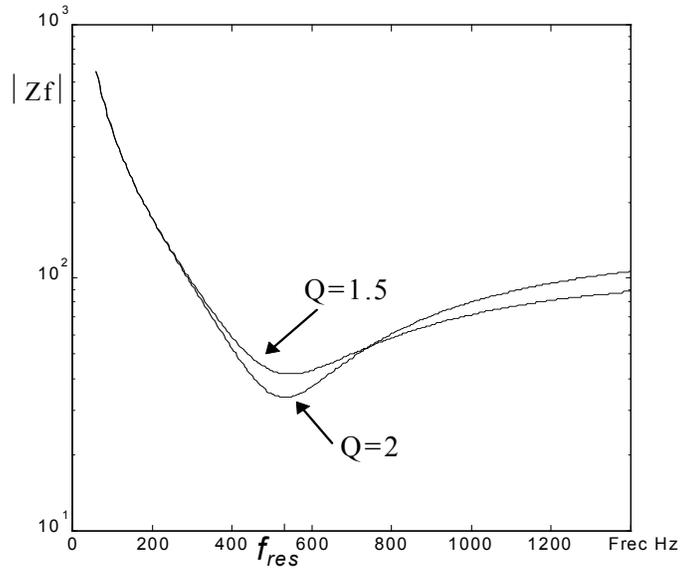


FIGURA 4.5 RESPUESTA DE UN FILTRO PASA ALTAS

En los casos prácticos, muchas veces esta resistencia es la propia del reactor, por lo que no se hace necesario la utilización de resistencias adicionales.

Ejemplo: El sistema de la figura 4.6 muestra un sistema que puede presentar problemas de armónicas por el hecho de tener una carga que las genera y un banco de capacitores el cual es usado para corregir el factor de potencia.

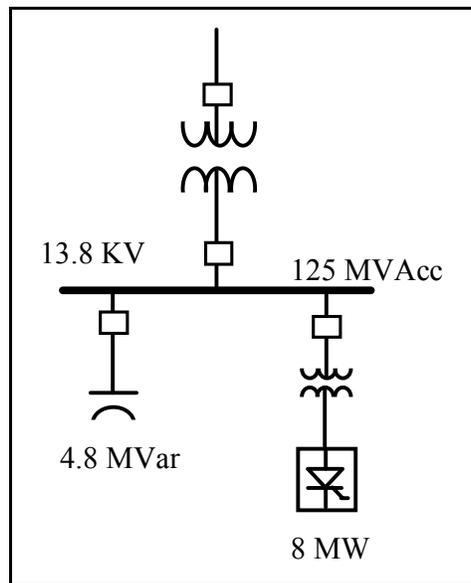


FIGURA 4.6 SISTEMA INDUSTRIAL

Solución: El análisis comienza en conocer la posibilidad de la existencia de algún problema de resonancia, esto se hace mediante:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MV ar_{CAP}}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{125}{4.8}} \times 60 = 306.18 \text{ Hz}$$

$$SCR = \frac{MVA_{CC}}{MW_{rect}} = \frac{125}{8} = 15.62$$

Como en este caso se tiene que el SCR es menor que 20 y la frecuencia de resonancia es muy cercana a la 5ª armónica y esta es generada por el rectificador, por tal motivo es recomendable instalar un filtro de 5ª armónica.

Filtro para eliminar la quinta armónica.

$$X_{cap} = \frac{13.8^2}{4.8} = 39.67 \ \Omega \text{ a } 60 \text{ Hz}$$

$$X_{reac} = \frac{X_{cap}}{5^2} = \frac{39.67}{25} = 1.587 \ \Omega \text{ a } 60 \text{ Hz}$$

Para Q=20

$$R = \frac{X_{reac}(f_{res})}{Q} = \frac{5 \times 1.587}{20} = 0.40 \ \Omega$$

De esta manera el filtro queda como el de la figura 4.7

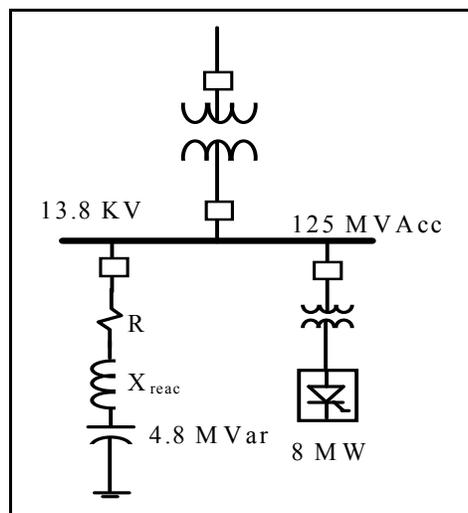


FIGURA 4.7 SISTEMA CON FILTRO PARA LA 5ª ARMÓNICA

La figura 4.8 muestra la configuración típica de un filtro en plantas industriales

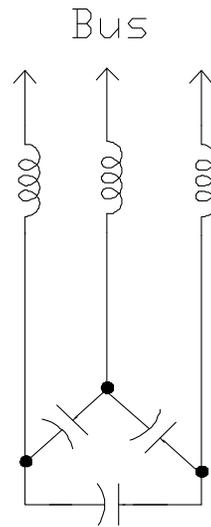


FIGURA 4.8 CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN FILTRO

Los efectos del filtro cambian la respuesta a la frecuencia del sistema como se muestra en la figura 4.9. Por lo que es importante tener presente los problemas que se pueden tener por una mala sintonización del filtro.

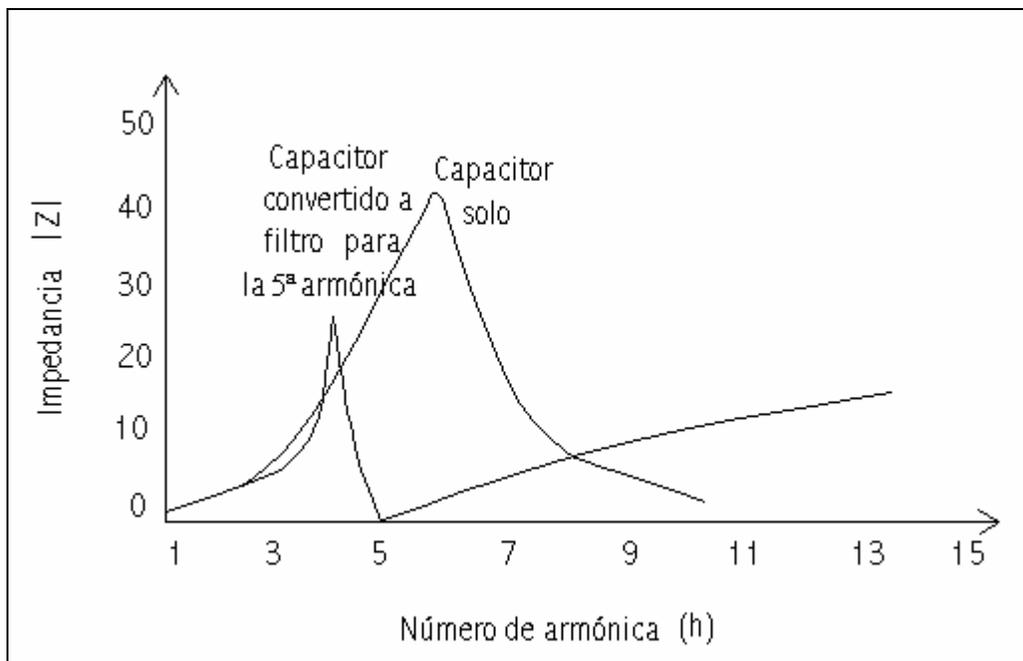


FIGURA 4.9 RESPUESTA DEL SISTEMA AL SER UTILIZADO EL BANCO DE CAPACITORES COMO PARTE DEL FILTRO.

4.7 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS CON ARMÓNICAS

La corrección del factor de potencia se puede ilustrar mediante los siguientes esquemas: en la figura 4.10 se observa que el sistema está entregando una corriente activa I_R y una corriente reactiva I_L , la cual provoca un bajo factor de potencia. Prácticamente este efecto se observa en la facturación y en la medición de los KW y KVAR en el primario del transformador.

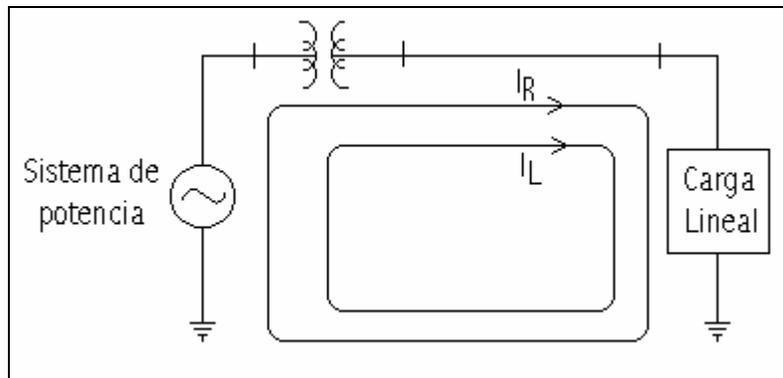


FIGURA 4.10 SISTEMA CON BAJO FACTOR DE POTENCIA

Para compensar este factor de potencia, basta con entregar la corriente reactiva de otro elemento en forma local, el cual puede ser de un banco de capacitores como se muestra en la figura 4.11

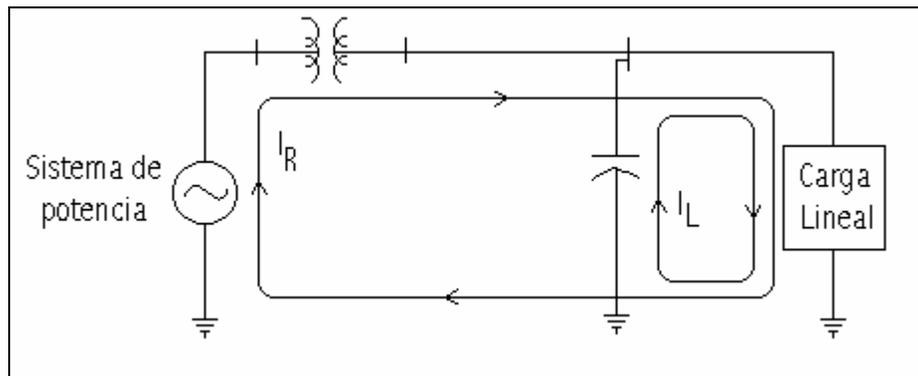


FIGURA 4.11 FACTOR DE POTENCIA COMPENSADO CON UN BANCO DE CAPACITORES

De esta manera se observa que el concepto de corregir el factor de potencia es simple, pero ¿que pasa cuando se tiene que la carga, además de las corrientes activas y reactivas que necesita para su operación, también es generador de una corriente armónica I_h ? , entonces sucede lo mostrado en la figura 4.12. Prácticamente se observaría un bajo factor de potencia en la facturación y también en los KW y KVAR medidos en el primario del transformador, pero la circulación de esta armónica no se conocería con estos aparatos.

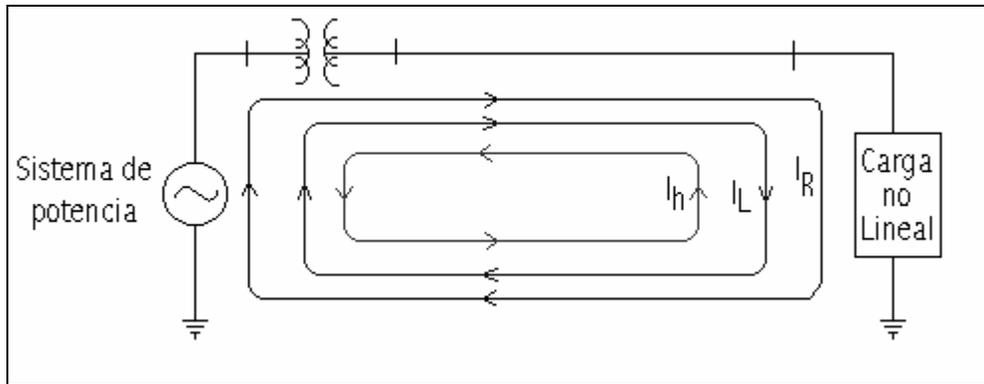


FIGURA 4.12 CARGA CON BAJO FACTOR DE POTENCIA Y CIRCULACIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS

De esta modo, en este sistema se tendría que corregir el factor de potencia en la forma tradicional, como se muestra en la figura 4.13

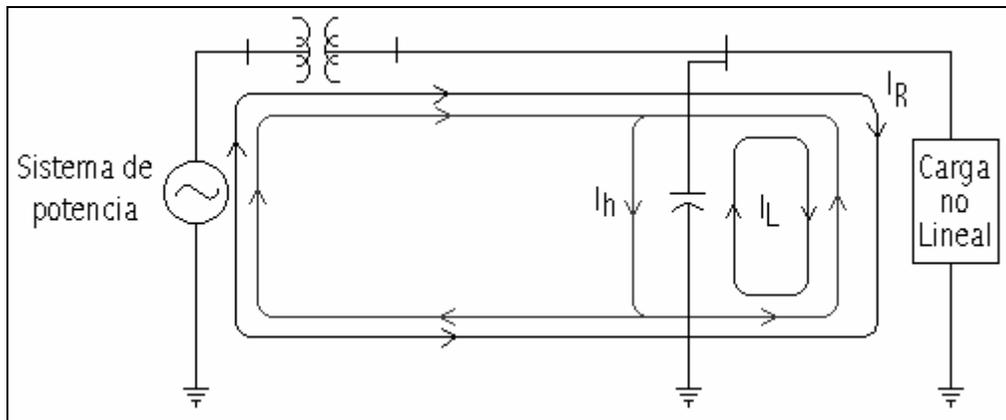


FIGURA 4.13 EFECTO DEL CAPACITOR EN UN SISTEMA CONTAMINADO POR ARMÓNICAS

La figura 4.13 muestra que la corriente reactiva está siendo suministrada en forma local a la carga por el capacitor, pero existe ahora la corriente armónica que circula entre el sistema, el capacitor y la carga. La circulación de esta corriente provoca la excitación del circuito resonante sistema-capacitor, pudiendo llegar a destruir el banco; Entonces se hace necesario cambiar la trayectoria de esta corriente armónica, como se muestra en la figura 4.14, dando lugar a que el sistema solamente entregue la corriente activa, cumpliendo así con la corrección del factor de potencia y el control de armónicas.

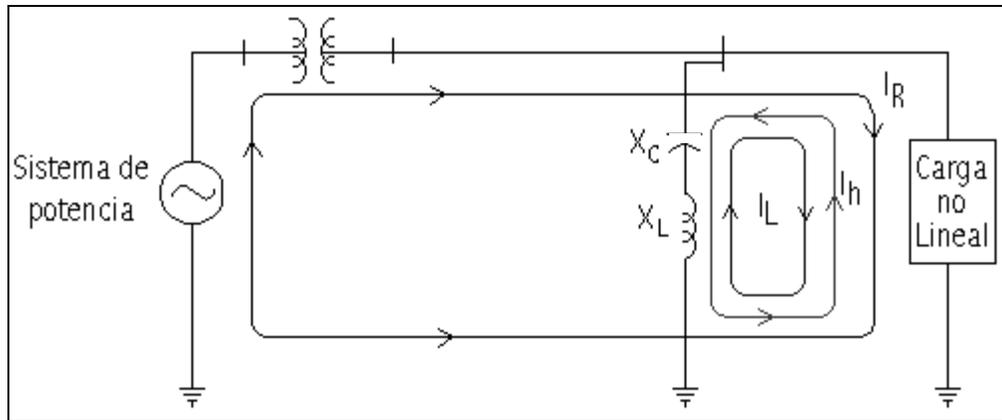


FIGURA 4.14 EFECTO DE UN FILTRO UTILIZADO PARA COMPENSAR EL FACTOR DE POTENCIA

4.7.1 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS EN LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Las consideraciones prácticas para la implementación de un filtro toman en cuenta los límites para capacitores.

TABLA 4.1 LÍMITES PARA EL CAPACITOR

Valores incluyendo armónicas	LÍMITE en % del nominal
I_{RMS}	180
V_{RMS}	110
V_{PICO}	120
$KVAR$	135

La corrección de factor de potencia se hará mediante el siguiente ejemplo:

En una empresa se desea corregir el factor de potencia, en dicha empresa se tiene instalado un transformador de 1000 kVA con impedancia $Z=10\%$ y sirve una potencia de 933 kW, con una corriente de 1405 Amp. a un voltaje de 480 Volts (ver figura 4.15). Como información adicional se tiene que la carga está compuesta por rectificadores de 6 pulsos, dando lugar a una inyección de una corriente de 5ª armónica de magnitud igual al 30% de la corriente fundamental.

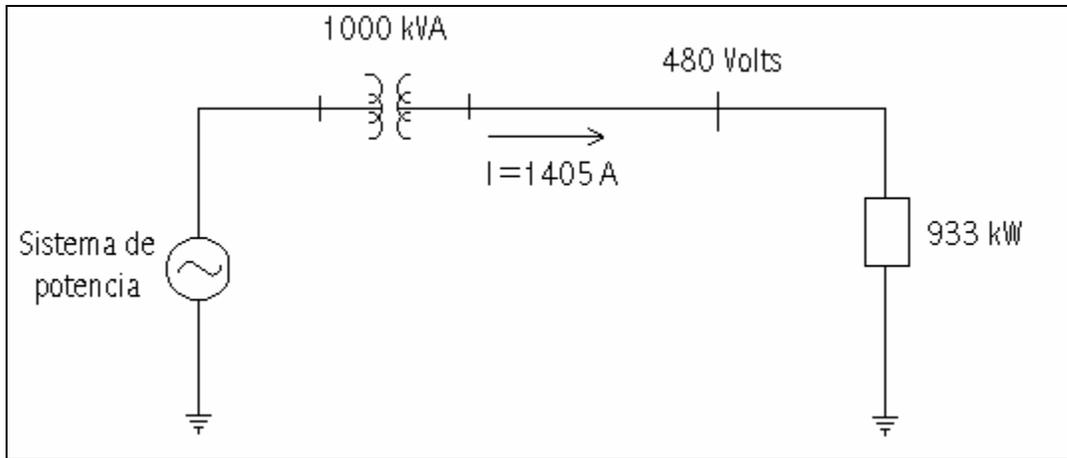


FIGURA 4.15 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Solución:

Para el esquema de la figura 4.15 se tiene que:

La potencia aparente entregada por el transformador es de:

$$S = \sqrt{3}VI = \sqrt{3}(0.480)(1.405) = 1168 \text{ kVA}$$

Entonces, la potencia reactiva está dada por:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(1168)^2 - (933)^2} = 702.82 \text{ kVAr}$$

Y el factor de potencia es:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{933}{1168} = 0.798$$

Se desea elevar el factor de potencia hasta un valor de 0.95 con el fin de poderle liberar carga al transformador, ya que está entregando más carga de su capacidad nominal y además evitar cargos por penalización por bajo factor de potencia. Por lo tanto, la potencia de los capacitores debe ser de:

$$Q_C = P_{MED} (\text{tg } \theta_1 - \text{tg } \theta_2) \dots\dots\dots(4.15)$$

$$Q_C = 933(0.7552 - 0.32868) = 397.93 \text{ kVAr}$$

Se elige un valor de 350 kVAr debido a que es un tamaño de banco de capacitores comercial.

Después de instalar el banco de capacitores el sistema queda como se muestra en la figura 4.16

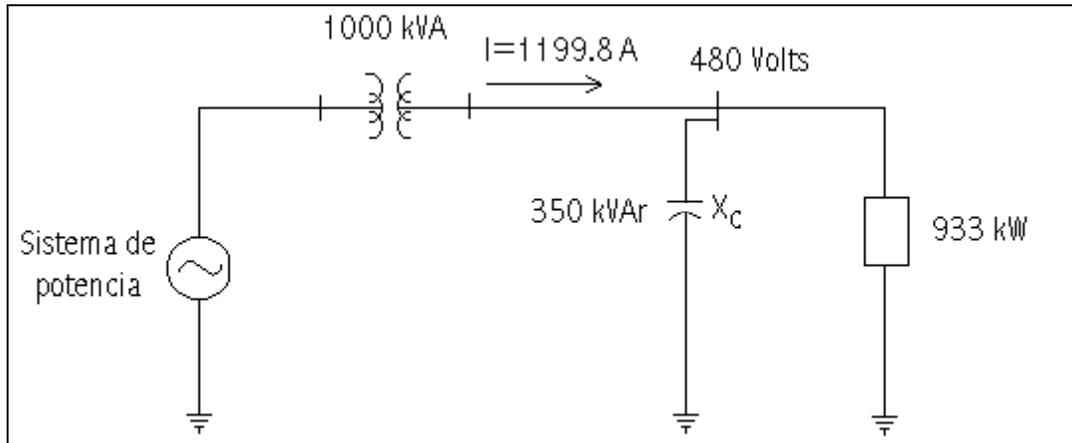


FIGURA 4.16 SISTEMA ELÉCTRICO DESPUÉS DE LA INSTALACIÓN DE LOS CAPACITORES

Por lo tanto la potencia reactiva tomada del transformador es de:

$$Q_L = 702.82 - 350 = 352.82 \text{ kVAr}$$

La potencia aparente entregada por el transformador es de:

$$S = \sqrt{933^2 + 352.82^2} = 997.5 \text{ kVA}$$

Y la corriente que entrega es de:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V} = \frac{997.5 \text{ kVA}}{\sqrt{3}(0.48 \text{ kV})} = 1199.8 \text{ A}$$

Y el factor de potencia es de:

$$fp = \frac{933}{997.5} = 0.935$$

Analizando los resultados se encuentra que el factor de potencia nuevo es bonificable por la compañía suministradora de energía. Además también se reduce la sobrecarga en el transformador así como la corriente total en el circuito alimentador.

Pero como en este caso se trata de una carga la cual genera armónicas, entonces es necesario hacer una serie de cálculos antes de proceder a la adquisición del banco de capacitores.

Antes de hacer el cálculo del filtro para eliminar la 5ª armónica es necesario ver cual es la frecuencia de resonancia. Considerando que el sistema es robusto, entonces los MVAcc en el punto donde está conectado el capacitor depende solamente de la impedancia del transformador, esto es:

$$Z = \frac{Z\%}{100} \frac{kV^2}{MVA_f} \dots\dots\dots(4.16)$$

Y los MVAcc están dados por:

$$MVA_{cc} = \frac{kV^2}{Z} \dots\dots\dots(4.17)$$

Entonces:

$$MVA_{cc} = \frac{100 MVA}{Z\%} \dots\dots\dots(4.18)$$

Que en este caso se tiene:

$$MVA_{cc} = \frac{100(1)}{10} = 10 MVA_{cc}$$

Ahora:

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVA_{r_{CAP}}}} = \sqrt{\frac{10}{0.35}} = 5.35$$

Y como la armónica es muy cercana a la 5ª que está en el sistema, entonces se hace necesario observar la relación SCR, esto es:

$$\frac{MVA_{cc}}{MW_{CARGANONLINEAL}} = \frac{10}{0.993} = 10.72 < 20$$

Por tanto, sí se hace necesario el filtro de 5ª armónica. De lo contrario el banco de capacitores duraría no más de dos meses en operación.

De esta manera se tiene que hacer el cálculo del filtro como se muestra en la figura 4.17

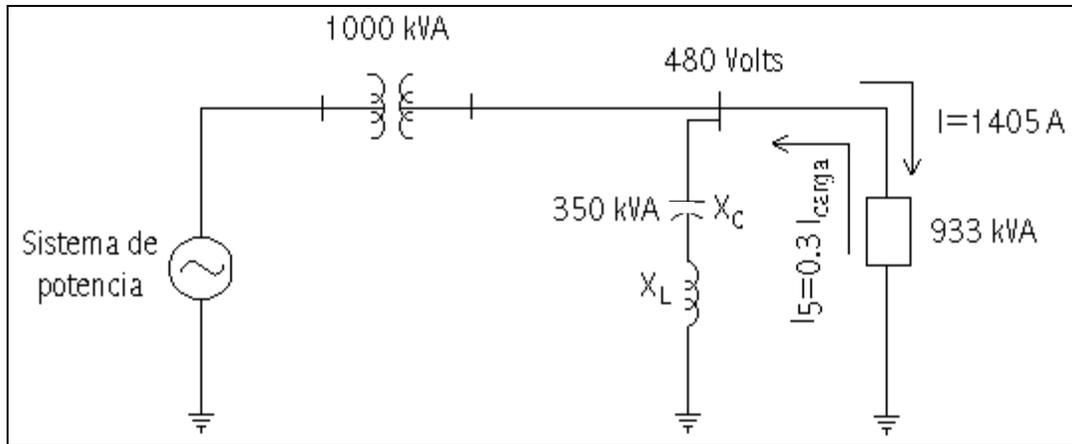


FIGURA 4.17 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO CONTAMINADO CON 5ª ARMÓNICA

Empezando por calcular la impedancia del banco se tiene:

$$X_C = \frac{kV^2}{MVA_r} = \frac{0.480^2}{0.35} = 0.6582 \Omega$$

Sintonizando el filtro a la 4.7ª armónica:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{0.4608}{4.7^2} = 0.02980 \Omega$$

De esta manera los MVA_r's que entregará el filtro al sistema está dado por:

$$MVA_{r_f} = \frac{kV^2}{X_C - X_L} = \frac{0.480^2}{(0.6582 - 0.02980)} = 366.6 \text{ kVA}_r$$

Esto muestra que el factor de potencia se mejorará aún más.

La corriente inicial en el banco de capacitores:

$$I_C = \frac{kVA_r}{\sqrt{3}kV} = \frac{350}{\sqrt{3}(0.480)} = 420.98 \text{ A}$$

La corriente en el filtro es:

$$I_F = \frac{kVA_{r_f}}{\sqrt{3}V_{bus}} = \frac{366.6}{\sqrt{3}(0.480)} = 440.95 \text{ A}$$

La corriente de 5ª armónica se obtiene como el 30% de la fundamental, esto es:

$$I_1 = \frac{kW}{\sqrt{3}kV} = \frac{933}{\sqrt{3}(0.48)} = 1122.22 \text{ A}$$

Entonces:

$$I_5 = 30\%I_1 = 0.3 (1122.22) = 336.67 \text{ A}$$

Por lo tanto la corriente rms en el filtro es:

$$I_{RMS} = \sqrt{(336.67)^2 + (440.95)^2} = 554.74 \text{ A}$$

Y la corriente pico máxima que se puede presentar está dada por:

$$I_{PICO} = 336.67 + 440.95 = 777.62 \text{ A}$$

El voltaje en el capacitor es:

$$V_C = \sqrt{3}I_F X_C = \sqrt{3}(440.95)(0.6582) = 502.69 \text{ V}$$

Y el voltaje armónico es:

$$V_{C_5} = \sqrt{3}I_5 \frac{X_C}{5} = \sqrt{3}(336.67) \left[\frac{0.6582}{5} \right] = 76.76 \text{ V}$$

El voltaje rms es:

$$V_{CAP_{RMS}} = \sqrt{502.69^2 + 76.76^2} = 508.52 \text{ V}$$

El voltaje pico en el capacitor está dado así:

$$V_{CAP_{PICO}} = 502.69 + 76.76 = 579.45 \text{ V}$$

Ahora los kVAr que entrega al banco están dados por:

$$kVAr = \sqrt{3}VI = \sqrt{3}(508.52)(554.74) = 488.6 \text{ kVAr}$$

Los resultados se comparan con los límites standard para capacitores de la tabla 4.1 obteniéndose los resultados de la tabla 4.2

TABLA 4.2 RESULTADOS DEL FILTRO PARA EL CAPACITOR

	CÁLCULO (%)	LÍMITE (%)	EXCEDE LÍMITE
I_{RMS}	135.20	180	NO
V_{RMS}	106.1	110	NO
V_{PICO}	114.8	120	NO
kVAr	140	135	SI

Como el límite de sus kVAr se excedió, entonces la opción es utilizar un banco más grande o dividir el banco en dos para hacer dos filtros. La opción más económica es utilizar un banco de 400 kVAr.

De ésta manera se repiten todos los cálculos:

$$h = \sqrt{\frac{10}{0.4}} = 5$$

Por tanto, sigue teniendo problemas, entonces:

$$X_C = \frac{0.480^2}{0.40} = 0.58 \Omega$$

$$X_L = \frac{0.58}{4.7^2} = 0.02608 \Omega$$

$$MVAr = \frac{0.48^2}{(0.58 - 0.02608)} = 415.94 \text{ kVAr}$$

$$I_C = \frac{400}{\sqrt{3}(0.480)} = 481.13 \text{ A}$$

$$I_F = \frac{415.94}{\sqrt{3}(0.480)} = 500.3 \text{ A}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{(336.67)^2 + (500.3)^2} = 603.03 \text{ A}$$

$$I_{pico} = 336.67 + 500.3 = 836.97 \text{ A}$$

$$V_C = \sqrt{3}(500.3)(0.58) = 502.60 \text{ V}$$

$$V_{C_5} = \sqrt{3}(336.67)\left(\frac{0.58}{5}\right) = 67.64 \text{ V}$$

$$V_{cap_{RMS}} = \sqrt{502.6^2 + 67.4^2} = 507.13 \text{ V}$$

$$V_{cap_{PICO}} = 502.6 + 67.64 = 570.24 \text{ V}$$

$$kVAr_{CAP} = \sqrt{3}(603.03)(507.13) = 529.7 \text{ kVAr}$$

Ahora la nueva tabla se muestra en: 4.3

TABLA 4.3 RESULTADOS DEL FILTRO PARA EL CAPACITOR

	CÁLCULO (%)	LÍMITE (%)	EXCEDE LÍMITE
I _{RMS}	125	180	NO
V _{RMS}	106	110	NO
V _{PICO}	119	120	NO
kVAr	132	135	NO

De esta manera el filtro quedará especificado con un banco de capacitores de 400 kVAr para 480 V. Un reactor de 26.08 mH a 60 Hz, para 480 V el cuál debe soportar una corriente de 5ª armónica de 336.67 amperes.

Como se puede observar ahora el filtro inyectará una potencia reactiva de 415.94 kVAr, esto significa corregir el factor de potencia.

La potencia que entrega el transformador es:

$$S = \sqrt{(933)^2 + (702.82 - 415.94)^2} = 976.11 \text{ kVA}$$

Por tanto el nuevo factor de potencia es:

$$f.p. = \frac{933}{976.11} = 0.96$$

Esto muestra que el factor de potencia se mejoró y además el banco de capacitores no tendrá problemas de resonancia por el hecho de formar parte de un filtro.

4.7.2 PROTECCIONES PARA LOS FILTROS

La protección o protecciones con que deben contar los filtros para la eliminación de armónicas deben cumplir con lo siguiente:

- Deben de proteger tanto a los capacitores y equipo del filtro, como al usuario contra descargas o choques eléctricos.
- Deben ser seguros ya que por el filtro va a circular la corriente a frecuencia fundamental y la corriente a la frecuencia de la armónica.

- De igual manera sucedería con el voltaje en terminales de dicho filtro.

Algunas de las maneras para la protección del filtro son las siguientes:

- Protección térmica para bobinas.
- Capacitores sobre dimensionados.
- Protección contra sobrevoltaje.
- Protección contra sobrecorriente.

Si en una misma línea o bus se tiene conectados varios filtros sintonizados a diferentes frecuencias armónicas; es recomendable que dichos filtros lleven una secuencia, ya sea para entrar y salir.

Dicha secuencia se debe hacer de la siguiente manera: para entrar deben colocarse los filtros de la frecuencia armónica más baja hasta los de frecuencia armónica más alta.

Para sacar los filtros se debe de hacer en sentido contrario a lo descrito anteriormente, es decir, el de la frecuencia más alta hasta el de menor frecuencia, esto con el fin de evitar problemas de resonancia.

Otro punto muy importante es que el filtro, por protección, se debe sintonizar a una frecuencia un poco más baja a la deseada, por ejemplo para eliminar la 5^a armónica, es recomendable sintonizar el filtro a la 4.7^a. Esto es porque, por lo general, la corriente armónica no va a estar exactamente a la frecuencia de la armónica, sino a una frecuencia menor.

4.8 MEDIDAS CORRECTIVAS

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

- a) Medidas que tienden a bloquear el paso de las corrientes armónicas hacia equipos especialmente sensibles, quedando éstos protegidos de la influencia de las mismas, aunque estas armónicas sigan circulando por el resto de la red.
- b) Medidas que tienden a bloquear y/o absorber las corrientes armónicas confinándolas a circular por zonas limitadas de la red, preferentemente circunscritas a los focos emisores de las mismas.
- c) Medidas tendientes a sobredimensionar, recurriendo incluso a diseños especiales. Los equipos y conductores sometidos al flujo de corrientes armónicas con objeto de minimizar los efectos nocivos provocados en los mismos.

A continuación se exponen una serie de medidas concretas, cada una de ellas clasificable en alguno de los incisos anteriores.

4.8.1 FILTROS DE CHOQUE.

La figura 4.18 muestra el funcionamiento de filtros de choque. En serie con los capacitores se instala un reactor de inductancia L , sintonizado con la capacitancia C del capacitor a una frecuencia inferior a la de cualquier armónica significativa existente en el sistema. En el caso de la figura A, el reactor se ha sintonizado con el capacitor a una 4ª armónica; este dispositivo hace imposible la resonancia e impide que los capacitores absorban una corriente armónica excesiva, por consiguiente, el uso del filtro de choque permite:

1. Proteger los capacitores.
2. Evitar resonancias
3. Corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental

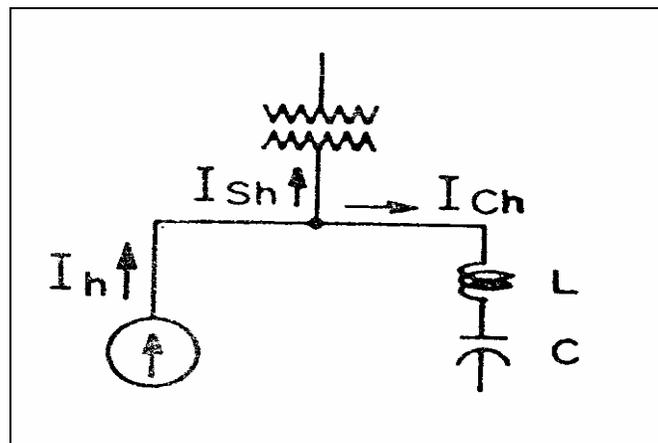
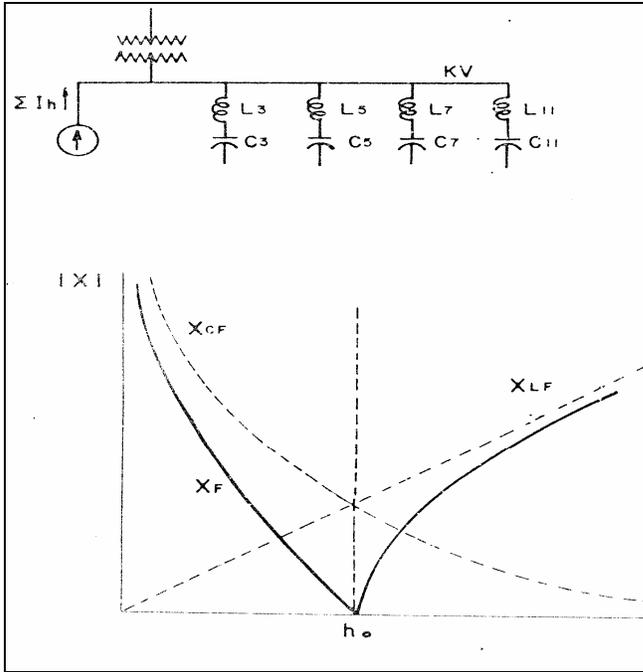


FIGURA 4.18 PROTECCIÓN DE CAPACITORES Y ELIMINACIÓN DE RESONANCIAS CON FILTRO DE CHOQUE.

4.8.2 FILTROS DE ABSORCIÓN.

La figura 4.19 muestra el funcionamiento de los filtros de absorción, en este caso se instalan reactores en serie con los capacitores pero ahora sintonizados a las frecuencias armónicas mas significativas existentes en el sistema, y al presentar una impedancia casi nula, cada sección del filtro para la armónica a la que se ha sintonizado, dicha reacción se comporta como un sumidero de energía que puede fallar si no se dimensiona correctamente, el uso del filtro de absorción permite:

1. Proteger a los capacitores
2. Evitar resonancias
3. Eliminar armónicas en el sistema.
4. Corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental.



$$X_{LF} = \frac{X_{CF}}{h^2}$$

$$XF = |X_{CF} - X_{LF}|$$

h (ORDEN DE ARMÓNICA)

FIGURA 4.19 MEDIDAS CORRECTIVAS
ELIMINACIÓN DE ARMÓNICAS, PROTECCIÓN DE CAPACITORES Y
ELIMINACIÓN DE RESONANCIAS CON FILTROS DE ABSORCIÓN.

$$X_{L3} = \frac{X_{c3}}{3^2}$$

$$X_{L5} = \frac{X_{c5}}{5^2}$$

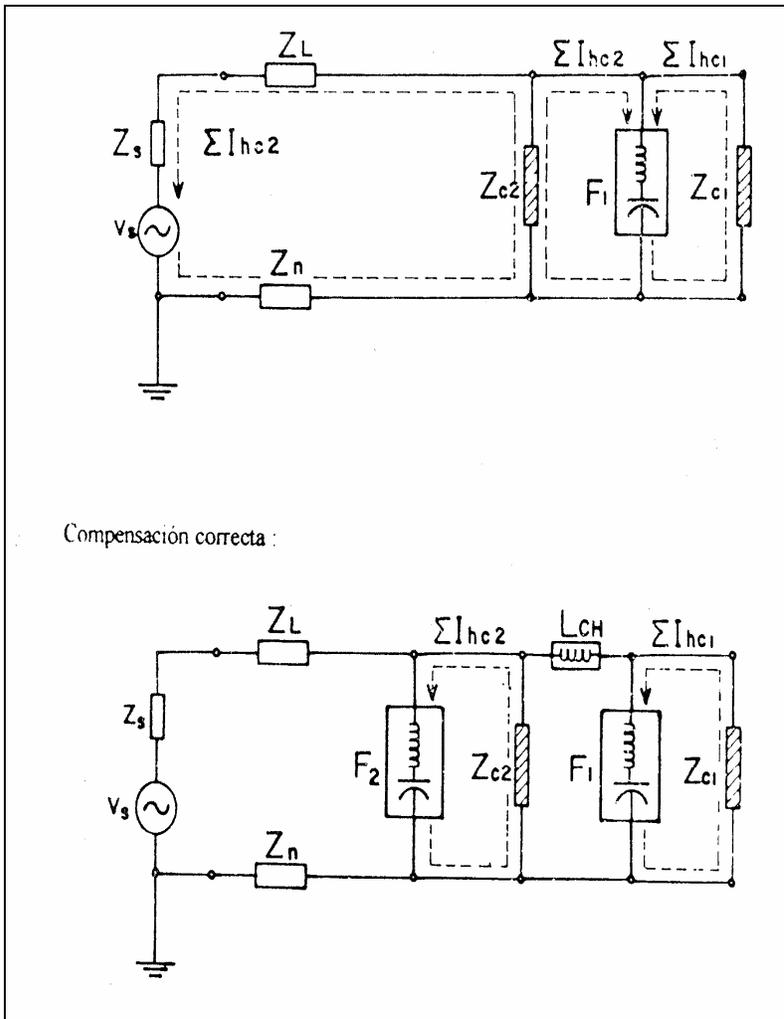
$$X_{L7} = \frac{X_{c7}}{7^2}$$

$$X_{L11} = \frac{X_{c11}}{11^2}$$

$$Q = 10^3 \cdot KV^2 \left(\frac{1}{X_{c3} = X_{L3}} + \frac{1}{X_{c5} - X_{L5}} + \frac{1}{X_{c7} - X_{L7}} + \frac{1}{X_{c11} - X_{L11}} \right)$$

La figura 4.20 muestra la localización adecuada de filtro de absorción y su protección respecto a cargas no lineales adyacentes.

Efecto indeseado:



CARGAS NO LINEALES

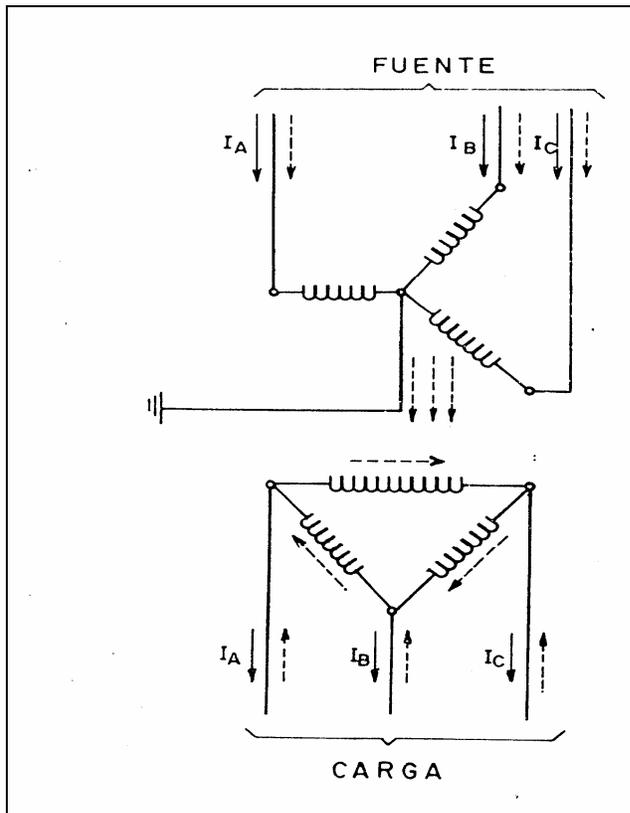
CARGAS NO LINEALES

4.20 LOCALIZACIÓN DE FILTROS DE ABSORCIÓN Y PROTECCIÓN RESPECTO A CARGAS NO LINEALES ADYACENTES.

El reactor de choque L_{CH} desintoniza el filtro F_1 de las armónicas producidas por la carga Z_{C2} al presentar ahora frecuencias mas bajas de sintonía serie, el arreglo L_{CH} con F_1 esto bloquea el paso de armónicas $\sum I_{hc2}$ hacia el filtro F_1 además, se provee a Z_{C2} de su propio filtro F_2 , para evitar el flujo de $\sum I_{hc2}$ por la red.

4.8.3 BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS DE SECUENCIA CERO CON TRANSFORMADORES ESTRELLA DELTA.

La figura 4.21 muestra como los transformadores devanados en estrella pueden cumplir con esta función.



Las corrientes armónicas de secuencia que provienen de la fuente fluyen hacia el neutro o hacia afuera, o bien recirculan por el devanado delta.

Las corrientes armónicas de secuencia cero que provienen de la carga quedan bloqueadas recirculando por el devanado en delta.

Igual sucede con las corrientes armónicas de secuencia cero generadas por la magnetización del núcleo del transformador.

FIGURA 4.21 BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS DE SECUENCIA CERO (3^a , 6^a , 9^a , ETC) CON TRANSFORMADORES DEVANADOS EN ESTRELLA DELTA.

OBSERVACIONES:

- En presencia de capacitores puede presentarse de todas formas, el fenómeno de resonancia.
- El espectro de corrientes armónicas es diferente según se mida en el lado primario o secundario del transformador. Esto debe tomarse en cuenta al efectuar estudios de corrientes armónicas.

4.8.4 BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS CON TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO.

La figura 4.22 muestra el principio de funcionamiento y capacidad de bloqueo de los transformadores de aislamiento. Estos son transformadores diseñados a la medida de la aplicación: tamaño de la carga, espectro emitido por la misma impedancia de la fuente, etc., con blindajes y efectos capacitivos en el núcleo para impedir el paso de altas frecuencias hacia el lado de la fuente, normalmente la relación es de 1/1; son de diseño delicado y su costo suele ser bastante más alto que el del filtro (capacitor reactor) equivalente.

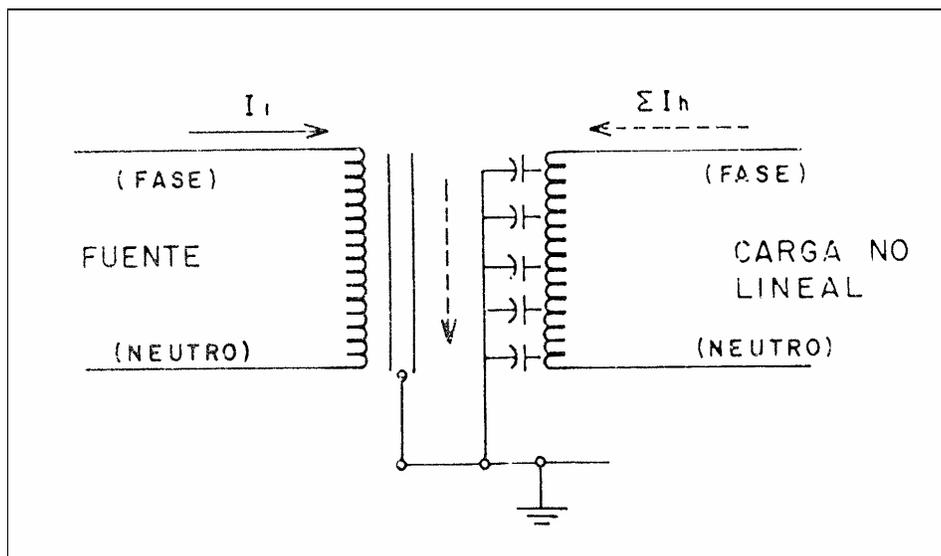


FIGURA 4.22 BLOQUEO DE CORRIENTES ARMÓNICAS CON TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO

4.8.5 BLOQUEO CON TRANSFORMADORES ZIG-ZAG.

La figura 4.23 se refiere al efecto de bloqueo que puede lograrse con transformadores zig-zag. El transformador zig-zag proporciona un bloqueo muy eficaz de armónica de secuencia cero. Ya que el devanado en zig-zag produce el mismo desplazamiento angular que un devanado en delta, proporcionando un hilo de neutro para cargas monofásicas.

Aunque para su construcción se necesita 15% más material conductor, constituye una buena alternativa para sustituir a un transformador estándar, cuando éste está sobrecalentado por el flujo de corrientes armónicas, especialmente la de secuencia cero, como en el caso de instalaciones de alumbrado fluorescente y computadoras personales. Combinado con filtros de 5ª y 7ª armónicas (en sustitución del reactor de choque) puede constituir un sistema de bloqueo (o filtro) general excelente. Se usa también para proteger UPS que alimentan a computadoras.

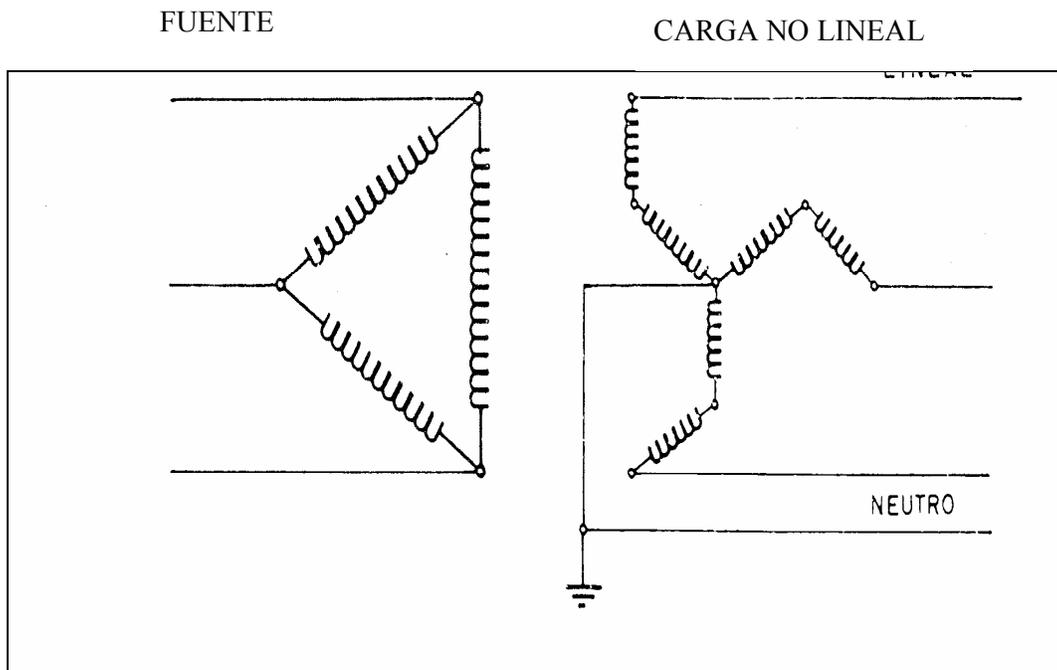


FIGURA 4.23 BLOQUEO DE CORRIENTES ARMONICAS DE SECUENCIA CERO CON TRANSFORMADORES ZIG-ZAG.

4.8.6 BLOQUEO DE 5ª Y 7ª ARMONICAS.

La figura 4.24 presenta una técnica de bloqueo de 5ª y 7ª armónicas usando doble variador de frecuencia con defases de $+15^\circ$ y -15° en el disparo de ambos rectificadores de 6 pulsos.

Se usan dos variadores A y B idénticos para alimentar en paralelo a la carga con 15° de adelanto, respecto a una referencia común, en el variador A y 15° de atraso en el B, el comportamiento ante las barras de alimentación es como el de un sólo variador de 12 pulsos.

El arreglo resulta más barato que un sólo variador de 12 pulsos, aunque más caro que un sólo variador de 6 pulsos, sin embargo, el ahorro en filtros de armónicas puede producir un ahorro global importante.

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

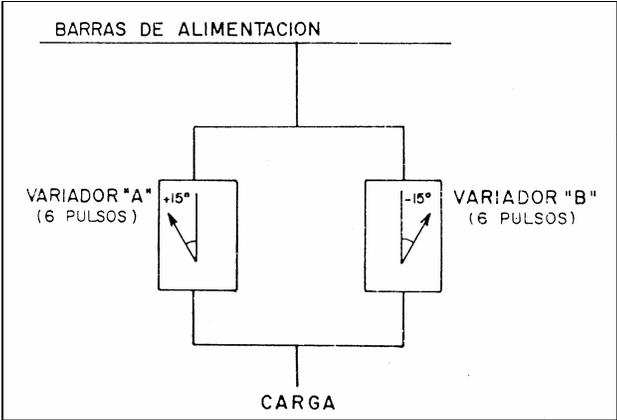


FIGURA 4.24

CAPITULO V

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Una vez recopilada la información del sistema eléctrico y en base a un estudio previo de las condiciones del sistema, se conecta el analizador de redes eléctricas en el Centro de Computo de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, para obtener datos en tiempo real y promedio de: corriente, voltaje, factor de potencia, TDH I, TDH V, desbalanceo entre fases, etc, para poder determinar el tipo de disturbio que afecta en mayor medida al sistema eléctrico y poder proponer una solución.

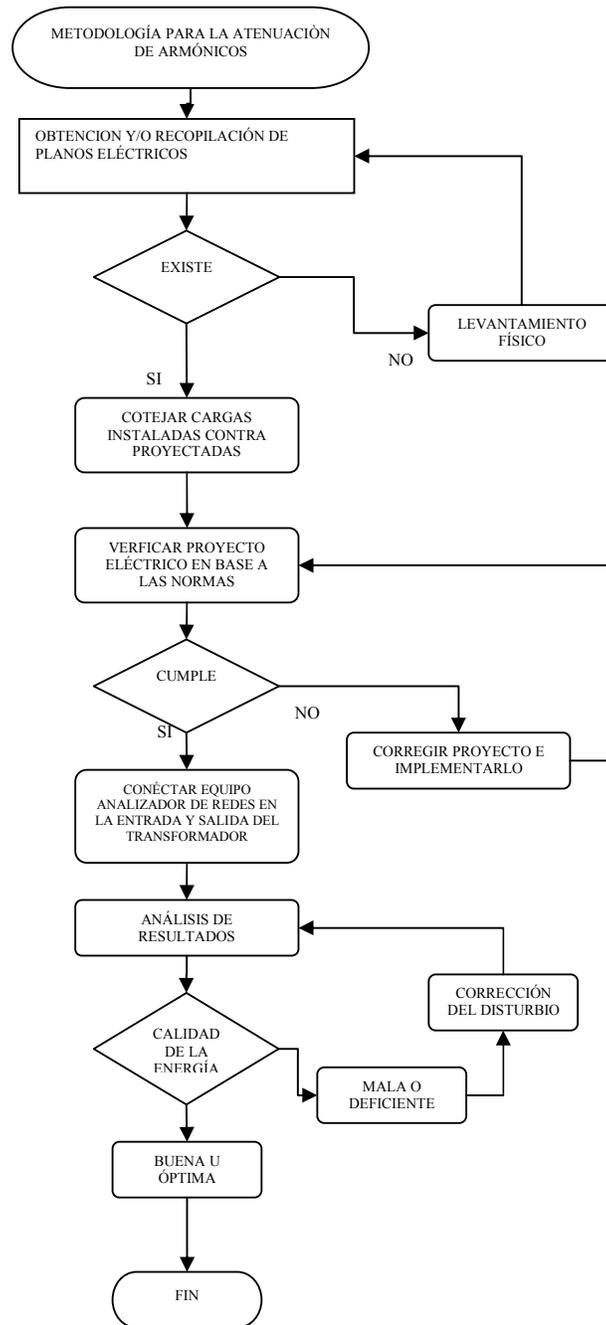
Dado que las cargas del centro de cómputo son en mayor medida del tipo no lineal, se espera que exista una distorsión severa en la forma de onda de corriente, es esta la razón por la cual se escogió precisamente el Centro de Cómputo como caso de estudio para la atenuación de armónicas.



FIGURA 5.1 CENTRO DE COMPUTO FES ARAGON

Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se propone una metodología resumida en el diagrama de flujo 5.1

DIAGRAMA DE FLUJO 5.1



5.1 METODOLOGÍA PARA ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS

En base a la metodología del diagrama de flujo 5.1, se busco la información actualizada para tener una mejor perspectiva del punto de la red eléctrica que nos interesa analizar, encontrando que la información obtenida de los planos no es congruente, pues el transformador de 150KVA tiene una protección de 200Amp. Y el tablero que alimenta tiene una protección de 500Amp.

DIAGRAMA UNIFILAR I

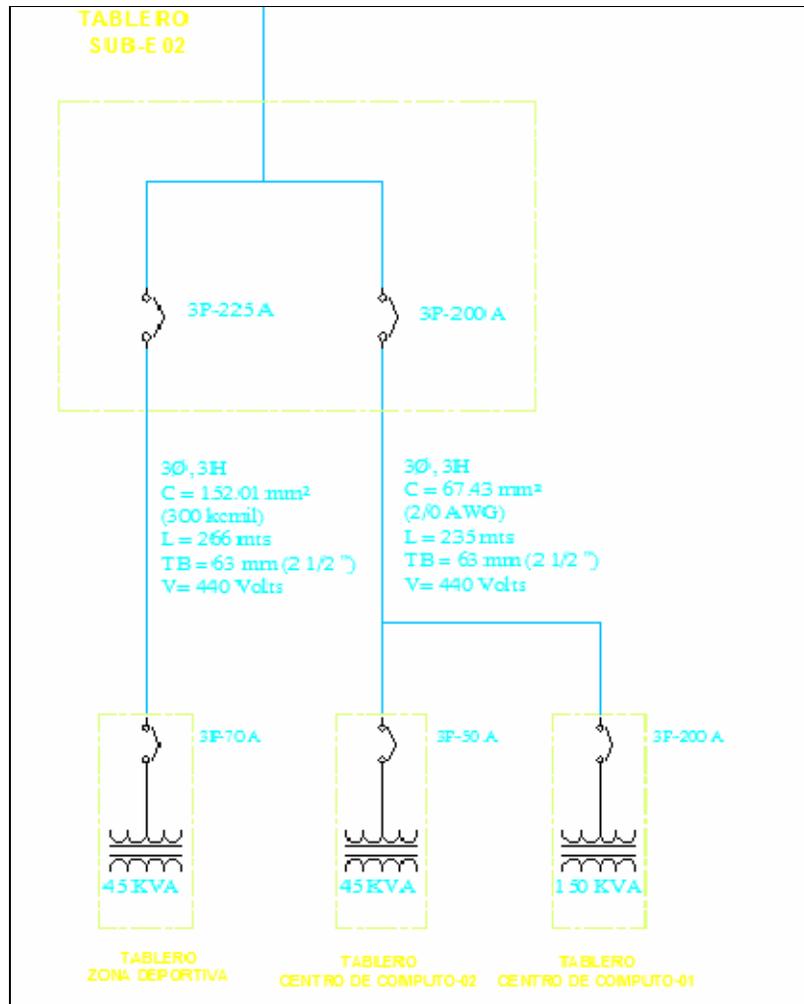


FIGURA 5.2 ACERCAMIENTO DE LOS TABLEROS DEL CENTRO DE CÓMPUTO

DIAGRAMA UNIFILAR II

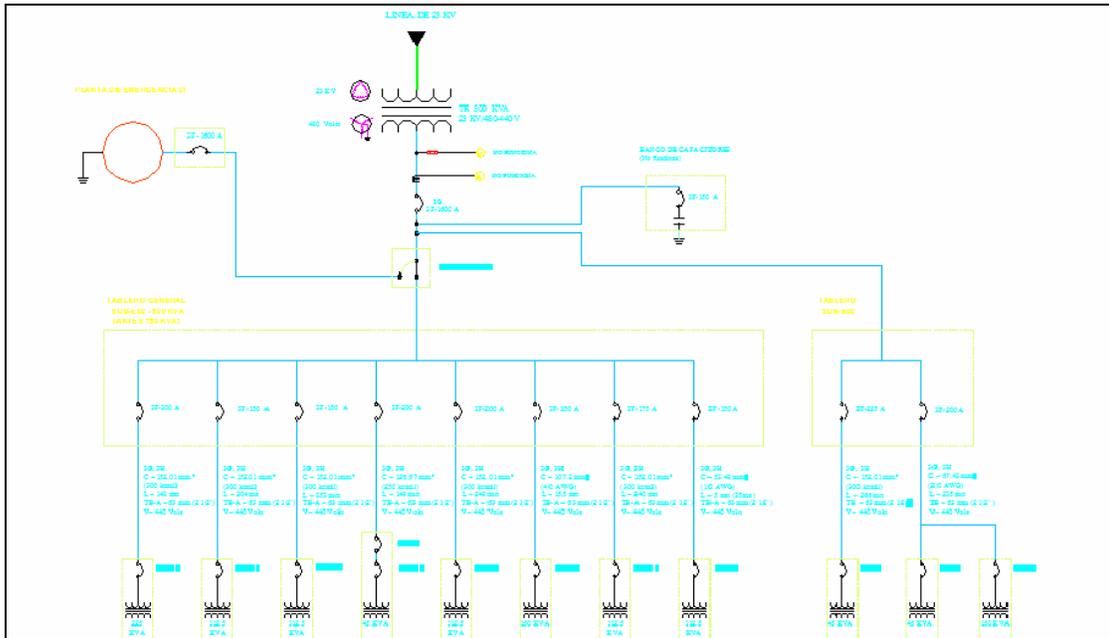


FIGURA 5.3 DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL DE LA FES ARAGÓN

5.2 ELABORACIÓN DE LEVANTAMIENTO

Se procede a la elaboración de levantamiento de las instalaciones eléctricas en el centro de cómputo para realizar los planos. Iniciándose con mediciones de las cargas en los tableros derivados, identificación de circuitos, verificación de carga instalada por cada circuito, verificación de protecciones térmicas, inspección de canalizaciones y sistema de tierras.

5.3 CUMPLIMIENTO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA RESPECTO A LA NORMA NOM-001-SEDE-2005

Se detectó que la instalación no cumple con los requerimientos de la NOM-001-SEDE-2005, ya que los circuitos derivados del tablero general de la planta baja no tiene el conductor de puesta a tierra según artículo 250, los cables no tienen ninguna identificación para determinar el número de circuito al que pertenecen, así como la identificación de fases. Los receptáculos para las computadoras no cuentan con un sistema de tierra aislada, ni cuentan con UPS para acondicionar y respaldar la energía en caso de falla en el suministro de la misma, además que la canalización de algunos circuitos no existe o es muy deficiente. Otro problema es el desbalanceo de fases provocada por una mala ejecución del proyecto.



FIGURA 5.4 TABLERO PRINCIPAL DEL CENTRO DE CÓMPUTO

5.4 CONEXIÓN DE EQUIPO PARA ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Aunque la instalación eléctrica no cumple las especificaciones de la norma, para los fines de este estudio, se procedió a conectar el analizador de calidad de energía eléctrica POWERPAD MODELO 3945-B, (figura5.5) dejando como antecedente que es mejor realizar los cambios a la instalación para posteriormente conectar al equipo, ya que de esta forma se reducen las posibles fallas y/o lecturas erróneas, los resultados medidos serán sólo producto de los tipos de cargas. Se recomienda de manera práctica realizar mediciones en la entrada y salida del transformador, tableros generales y el grupo electrógeno. Para una mejor referencia de las características del equipo, forma de instalarlo, tipos de mediciones, interpretación de resultados, características técnicas, etc. leer el apéndice A.



FIGURA 5.5 ANALIZADOR DE REDES ELÉCTRICAS

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El resultado arrojado por el analizador de calidad de energía eléctrica se muestra en los gráficos del Apéndice B. En donde podemos notar los siguientes detalles de la instalación eléctrica:

- En la tabla 1.- Voltaje RMS; Se observa que el valor promedio del voltaje de línea de cada una de las fases, es como sigue: Línea 1: 116.38V, Línea 2: 118.11V, Línea 3: 118.36V.
- En la tabla 2.- Voltaje RMS; Se observa que el valor promedio del voltaje entre fases, es como sigue: Línea 1 y 2: 202.42 Volts, Línea 2 y 3: 205.19 Volts, Línea 3 y 1: 203.65 Volts.
- En la tabla 3.- Amperaje RMS; Se nota que existe un desbalanceo considerable de un 35.20 % aproximadamente entre la línea 1 y la línea 2, de 7% entre línea 2 y línea 3 y entre las líneas 3 y 1 es de 30.31%, lo que nos provoca una corriente elevada en el conductor neutro de hasta de 47.302 Amperes.
- En la tabla 4.- Distorsión Armónica Total en Voltaje y Corriente (THD); La distorsión total armónica promedio en voltaje de las líneas, es como sigue: Línea 1: 3.24%, Línea 2: 3.15%, Línea 3: 3.02%. La distorsión total armónica promedio en corriente corresponde en las líneas a, Línea 1: 17.97%, Línea 2: 16.31%, Línea 3: 106.88 %.
- El Factor de potencia se encuentra representado en la tabla 5.- Factor de Potencia; debido a que éste gráfico nos entrega los resultados por fase, se procede a calcular el factor de potencia del sistema por el método numérico, con los datos de la potencia activa y la potencia aparente, medidas por el analizador:

$$F.P = \frac{KW}{KVA} = \frac{5.27}{7.093} = 0.74 \dots\dots\dots(5.1)$$

Éste factor de potencia es bajo con respecto a lo indicado en la NOM 001 SEDE 2005 y a las recomendaciones de las compañías suministradoras de energía eléctrica; Luz y Fuerza del Centro y Comisión Federal de Electricidad.

- De la tabla 6.- Orden de armónicos de Voltaje presentes en el sistema. Se muestra que los armónicos más representativos son del 5° Orden es decir son voltajes que presentan una frecuencia de 300 Hz. El voltaje armónico 5° en las líneas es como sigue: Línea 1: 3.27%, Línea 2: 3.16%, Línea 3: 3.04%.
- La tabla 7.- Orden de armónicos de Corriente presentes en el sistema. Se nota que los armónicos presentes en el sistema son del orden de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11va, 13 va, 15 va, 17 va y 19 va; específicamente los valores en la línea 3 son los siguientes: 76.80%, 57.40%, 34.30%, 16.80%, 7.90%, 6.60%, 4.80%, 3.00% y 2.67% respectivamente para cada orden de armónico. Armónicos en la fase 2 son como a continuación se describe: 3ª armónica= 11.33%; 5ª=7.40%, 7ª= 4.50%; 9ª= 2.50%; 11va= .80%; 13va= 1.20%; 15va= 1.00%, 17va= .82%, 19va= 0.12%.

Armónicos en la fase 1 son como a continuación se describe: 3ª armónica= 15.20%; 5ª=8.80%, 7ª= 1.70%; 9ª= 1.30%; 11va= .1.10%; 13va= .50%; 15va= .40%.

Éstos problemas encontrados específicamente en las ondas de corriente se deben a el tipo de cargas instaladas y a los problemas existentes en la instalación eléctrica como el desbalanceo de las fases, carencia del sistema de tierras con una impedancia adecuada, a la inconciencia de los usuarios al conectar cargas diferentes a la permitidas y a un proyecto carente de una ingeniería adecuada.

5.6 APLICACIÓN DE LAS DIFERENTES NORMAS A LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

De acuerdo al análisis nos damos cuenta que la instalación eléctrica carece de elementos básicos que nos podrían ayudar a atenuar en gran parte los problemas de calidad de la energía.

Analizando resultados de las mediciones en base a los diversos reglamentos y/o normas se encuentra lo siguiente:

- El desbalanceo existente entre fases es mayor al 35% lo cual queda fuera de lo indicado en la NOM 001 SEDE 2005 y el código NEC, los cuales establecen que para una operación adecuada y óptima de las cargas instaladas y por mantener una vida útil proyectada de aparatos y equipos, recomiendan que no debe existir un desbalanceo mayor al 5.0 % ya que las cargas que no se balancean adecuadamente causan un flujo excesivo de corriente en el neutral y como resultado una caída de voltaje mayor a través del conductor neutral, al balancear las cargas se reducirán las lecturas de voltaje y corriente.
- La instalación en circuitos derivados carece de conductor de puesta a tierra, lo cual representa un problema ya que los códigos NEC y NOM requieren adherencia a ciertas prácticas importantes de conexiones o puestas a tierra. La adherencia a éstas prácticas en trabajos de montajes eléctricos de cualquier edificio, es principalmente por razones de seguridad. Asimismo, nos indican que cualquier circuito que inyecte una corriente a un conductor debe proveer una trayectoria de retorno al origen; y, sobretodo, por que las corrientes producidas en sistemas digitales modernos, fluctúan entre el espectro de frecuencia de corriente continua y las radiaciones electromagnéticas de la luz visible.



FIGURA 5.6 BARRA DE TIERRAS SIN DERIVADOS

- El conductor neutral para cargas no lineales, con cargas como alumbrado fluorescente y computadoras personales; la NOM 001 SEDE 2005 recomienda que por lo menos el conductor neutral se calcule como un conductor portador de corriente y que se seleccione para conducir el 80% de su capacidad nominal. Debido a las corrientes armónicas generadas por cargas lineales fluirán por el conductor neutral en un sistema trifásico a cuatro hilos y que la corriente máxima teórica puede estar entre 1.73 hasta 3 veces la corriente por fase, el código NEC recomienda que éste conductor debe ser calibrado para portar dos o tres veces la corriente de los conductores individuales de fase, es decir, si en un sistema las fases conducen 50 Amperes, el conductor neutral debe calcularse para manejar 100 o 150 amperios.
- Los conductores de conexión a tierra y neutral deben ser unidos conjuntamente en un sólo punto, éste sería el secundario del transformador aislado, que esté situado dentro o inmediatamente adyacente al equipo electrónico computarizado.
- El sistema no cuenta con tierra aislada o referencia cero para las computadoras, al respecto el NEC recomienda un cable aislado, separado y dedicado (aislamiento verde o verde con rayas amarillas) conectado a tierra, instalado para computadoras y equipos a base de microprocesadores. El propósito de ésta tierra aislada, es proporcionar un sistema limpio, libre de ruidos (interferencia electromagnética), de referencia cero de tierra para las fuentes de potencia de Corriente Continua y datos. La sección 250-74 excepción Número 4 y la excepción de la sección 384-20 del NEC, permiten que un conductor de puesta a tierra, separado y aislado, corra solo desde el punto de unión neutral/tierra (equipo de servicio de entrada o Terminal Xo de una fuente derivada separadamente) al equipo, o a los receptáculos aislados a tierra para el equipo. El conductor para la tierra aislada no se conecta a ningún conducto o tablero de distribución por los cuales se desplaza, éste termina solamente en los bloques de terminales “aislados” o el cable aislado principal de tierra u otra tierra

aislada o receptáculo, o la tierra aislada lógica del equipo y en único punto de unión de la fuente de potencia.

- Existe en algunos receptáculos una referencia de voltaje entre neutro y tierra mayor a 1 Volt, para ello el código NEC indica que un voltaje alto entre tierra y conductor neutro puede causar disrupción en las operaciones y errores de datos a la electrónica cuando ese ruido de voltaje es acoplado en la fuente de potencia de CC. Los fabricantes de equipos electrónicos especifican un máximo voltaje neutral-tierra para sus respectivos equipos, éste puede estar especificado en RMS, como por ejemplo 0.5 VRMS o en términos de pico a pico, por ejemplo 2 Vpp.
- Por lo tanto es necesario implementar las diversas recomendaciones de los códigos para corregir el problema de calidad de la energía.

5.7 CORRECCIÓN DEL DISTURBIO

Las lecturas dadas por el analizador, indican que tenemos varios problemas de calidad de la energía, por lo que se procede a dar las soluciones recomendadas por la NOM y el NEC.



FIGURA 5.7 VERIFICACIÓN DE MEDICIONES

De acuerdo a la carga instalada medida con el analizador, se procede a calcular el conductor neutral para permitir un mejor flujo de las corrientes armónicas a través del mismo.

De acuerdo a la tabla 3 de las mediciones tomadas por el analizador de calidad de la energía, la corriente total que consume el tablero principal del centro de cómputo es de 60.76A. En proyecto, la cantidad de potencia considerada es mucho mayor, por eso existen cables e interruptores robustos en el tablero medido.

Dicho tablero tiene un alimentador principal de 300MCM, 2Xfase, así como el neutro, y un interruptor principal de 500A, por lo que aplicando el cálculo de conductores eléctricos en base a la NOM de acuerdo a la carga real, se tiene que la caída de tensión es igual a:

$$e\% = \frac{2 * \sqrt{3} * L * I_c}{V_f * S} \dots\dots\dots(5.2)$$

Donde:

L = longitud en metros = 40m

$$I_c = \text{corriente corregida} = \frac{I_n}{F.A. * F.T.} = 60.76 / (0.7*1)$$

F.A. = Factor de agrupamiento

F.T. = Factor de temperatura

Vf = Voltaje entre fases = 220V

S = Sección transversal en mm² del conductor 300MCM = 152.02* 2hilos = 304.02

Aplicando la formula (5.2) para la medición real.

La caída de tensión.

$$e\% = \frac{\sqrt{3} * 40 * 86.8}{220 * 304.02} = 0.17\%$$

Los conductores instalados cumplen con lo especificado en las normas ya que la caída de tensión no excede el 3%.

El conductor de puesta a tierra debe ser de calibre 1/0 AWG según la tabla de la NOM 250-94 para el conductor alimentador de 2Xfase de 300MCM. El calibre que esta instalado en el centro de cómputo es menor al que recomienda la norma.

Se deberá instalar una malla de tierras de seguridad y otra de referencia cero, interconectadas en el punto de menor impedancia, que es en el electrodo de tierra, con el fin de no tener diferentes potenciales, tal como indica la NOM-001-SEDE-2005, en su artículo 250 de puesta a tierra.

Según el diagrama unifilar del centro de cómputo el tablero principal se conecta desde un transformador de 150KVA. Que proporciona 135000W y esto a su vez una corriente de 393.64Amp. como máximo.

El interruptor principal es de 3X500Amp. en realidad este interruptor jamás se botará por sobrecarga, ya que el transformador no llegará a los 500Amp, por lo que no existe una adecuada coordinación de interruptores.

Para resolver los problemas de armónicos en la red eléctrica, específicamente en el tablero del centro de cómputo donde se realizaron las mediciones, se debe tomar las siguientes consideraciones:

a) Corregir todos los problemas en la instalación eléctrica para poder dar una propuesta de atenuación de armónicos más adecuado al problema real. Una vez realizados dichos cambios se vuelve a tomar mediciones para verificar los tipos de disturbios representativos y poder atacarlos de manera eficaz.

Para este ejemplo práctico, se tomaran los valores medidos sin las correcciones indicadas con anterioridad.

Para la atenuación de armónicos, se determina la utilización de un transformador en zig-zag, el cual proporciona un bloqueo muy eficaz de armónica de secuencia cero (3, 6, 9, 12, etc). Ya que el devanado en zig-zag produce el mismo desplazamiento angular que un devanado en delta, proporcionando un hilo de neutro para cargas monofásicas.

En el centro de cómputo existen las cargas antes mencionadas por lo que es altamente recomendable la utilización de este tipo de transformador combinado con filtros de 5ª y 7ª armónicas.

La armónica de tercer y de noveno orden recirculan a través del devanado del secundario, proporcionando un aislamiento o blindaje contra los armónicos que se inyectan al sistema desde la carga.

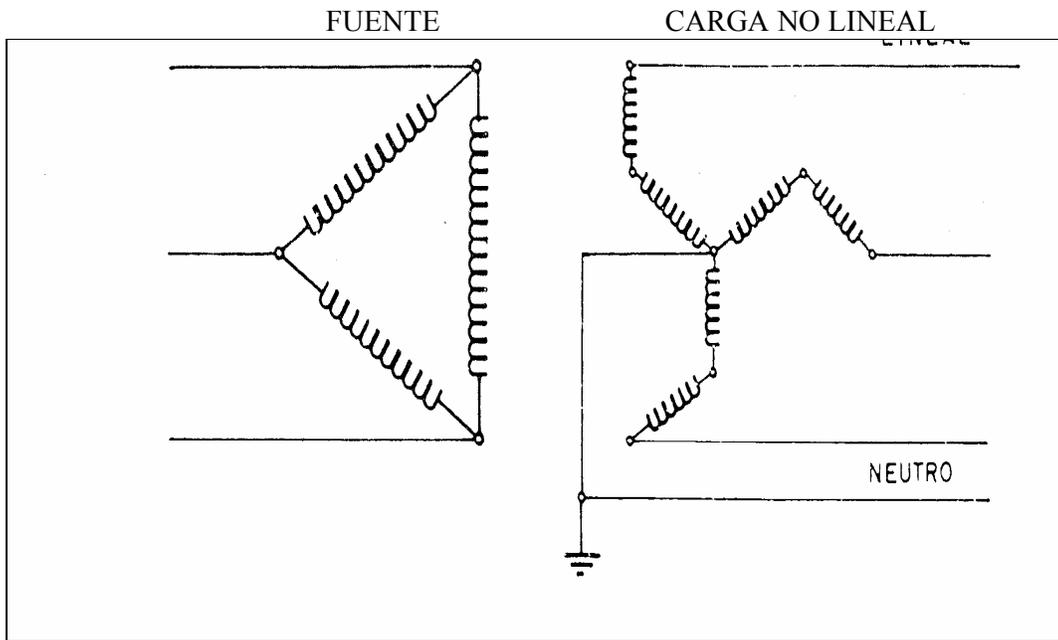


FIGURA 5.8 TRANSFORMADOR ZIG-ZAG

b) Una vez resueltos los armónicos de secuencia cero, se procede a realizar el cálculo para el filtro de 5ª y 7ª armónica. El analizador nos indica que tenemos una corriente total promedio de 60.76 A, convirtiendo este dato a potencia en watts nos da como resultado: 17112.69 W; este dato lo utilizamos para saber cual es la potencia en KVAR requerida del capacitor para mejorar nuestro F.P. de 0.74, utilizamos la tabla 1.2 de mejoramiento de factor de potencia, la cual nos da como resultado lo siguiente:

KVAR necesarios para pasar de un F.P. de 0.74, a F.P. de 0.9, utilizando el método de tablas.

$$\text{KVAR} = \text{KW} \text{ FACTOR DE MEJORAMIENTO.}$$

$$\text{KVAR} = 17.11\text{W} * 0.425 = 7.27 \text{ KVAR}$$

Esta cantidad de reactivos es la que necesitamos para el diseño del filtro, modulamos el filtro de 7.27 KVAR de la siguiente forma: Para 5ª armónica 66.67%, 4.85 KVAR y para la 7ª armónica 33.33%, 2.42 KVAR

5.7.1 CÁLCULO PARA LA SECCIÓN DE 5ª ARMONICA

La sección se debe sintonizar a 300 Hz. Por lo tanto, la frecuencia de resonancia será de 300 Hz.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 300\text{Hz} \dots\dots\dots(5.3)$$

A medida que se aumenta la frecuencia de la corriente, va aumentando la reactancia inductiva (XL) y disminuye la reactancia capacitiva (XC). Se requiere entonces que para la 5ª armónica las reactancias se igualen para que el circuito entre en resonancia y la impedancia para la 5ª armónica sea nula.

$$X_{L5} = n_0 X_L \dots\dots\dots(5.4)$$

$$X_{C5} = \frac{X_C}{n_0} \dots\dots\dots (5.5)$$

donde :

X_{L5} : Reactancia inductiva para 300 Hz. (5ª armónica)

n_0 : Orden de la armónica

X_L : Reactancia inductiva a 60 Hz. (Componente fundamental)

X_{C5} : Reactancia capacitiva a 300 Hz. (5ª armónica)

X_C : Reactancia capacitiva a 60 Hz. (componente fundamental)

Se requiere que:

$$X_{L5} = X_{C5}$$

Sustituyendo las ecuaciones (5.4) y (5.5) en la ecuación (5.6):

$$n_0 X_L = \frac{X_C}{n_0}$$

Despejando X_L :

$$X_L = \frac{X_C}{n_0^2}$$

Para calcular la capacitancia se emplea la siguiente fórmula:

$$C = \frac{KVAR}{2\pi f (KV)^2 * 10^{-3}}$$

Donde:

C: Capacitancia en (µf)

f: frecuencia

Donde:

$$C = \frac{4.85}{2\pi f (0.22)^2 * 10^{-3}} = 265.80 \mu F$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(60)(265.80 \times 10^{-6})} = 9.98 \Omega$$

Sustituyendo en la ecuación (5.5)

$$X_{C5} = \frac{X_C}{n_0} = \frac{9.98}{5} = 1.996 \Omega$$

De acuerdo a la ecuación (5.6)

$$X_{L5} = X_{C5} = 1.99 \Omega$$

Despejando X_L de la ecuación (5.4)

$$X_L = \frac{X_{L5}}{n_0} = \frac{1.996}{5} = 0.3992 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.3992}{2\pi(60)} = 1.05 \text{ mH}$$

Por lo tanto, la sección sintonizada a la 5ª armónica con 4.85 KVAR tiene un capacitor de 265.80 (μf) y un inductor de 1.05 (mH). Con estos elementos se logra la resonancia a 300 Hz.

Por el filtro circulará toda la corriente de 5ª y 7ª armónicas generadas por la carga. Por lo tanto, estas armónicas no viajarán por la red ni afectarán a otros equipos.

Toda la corriente de 5ª armónica generada por la carga circulará a través de la sección filtro sintonizada a 300 Hz., mientras que toda la corriente de 7ª armónica circulará a través de la sección sintonizada a 420 Hz.

Por la sección de] filtro de 5ª armónica pasará también una corriente de frecuencia fundamental (60 Hz) que tendrá el siguiente valor:

$$I_{fs} = \frac{V_{f-n}}{j(X_L - X_C)} = \frac{127}{j(0.3992 - 9.98)} = 14.13 \angle 90^\circ \text{ Amp.} \dots \dots \dots (5.7)$$

La potencia reactiva de la sección de 5ª armónica será:

$$KVAR = \sqrt{3} * V * I = \sqrt{3} * 220 * 14.13 = 5.38 KVAR$$

Como se puede observar, la reactancia capacitiva es mayor a la reactancia inductiva, lo que nos lleva a una corriente adelantada al voltaje. Por lo tanto, se concluye que esta corriente de frecuencia fundamental es la que nos ayuda a mejorar el factor de potencia de la red.

Además de esta corriente, por la sección pasará también la componente de 5ª armónica que genere la carga no-lineal. Sin embargo, la corriente que puede absorber cada sección estará limitada por la capacidad térmica del inductor.

5.7.2 CÁLCULO PARA LA SECCIÓN DE 7ª ARMÓNICA

El cálculo se realiza de manera similar que para la sección de 5ª armónica:

$$C = \frac{KVAR}{2\pi f (KV)^2 * 10^{-3}} = \frac{2.42}{2 * \pi * 60 * 0.22^2 * 10^{-3}} = 132.62 \mu F$$

La reactancia capacitiva es:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(60)(132.62 \times 10^{-6})} = 20 \Omega$$

La reactancia capacitiva para la 7ª armónica X_{C7} será:

$$X_{C7} = \frac{X_C}{n_0} = \frac{20}{7} = 2.85 \Omega$$

La reactancia inductiva para la 7ª armónica X_{L7} será:

$$X_{L7} = n_0 X_L$$

Despejando X_L de la ecuación anterior:

$$X_L = \frac{X_{L7}}{n_0} = \frac{2.85}{7} = 0.408\Omega$$

Posteriormente se calcula la inductancia del inductor:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.408}{2\pi(60)} = 1.08mH$$

La sección sintonizada a la 7ª armónica con 2.42 KVAR tiene un capacitor de 132.62 (µf) y un inductor de 1.08 (mH). Con estos elementos se logra la resonancia a 420 Hz.

Por la sección del filtro sintonizada a 420 Hz. pasará también una corriente de frecuencia fundamental que tendrá el siguiente valor:

$$I_{f7} = \frac{V_{f-n}}{j(X_L - X_C)} = \frac{127}{j(0.408 - 20)} = 6.48\angle 90^\circ \text{ Amp.} \dots\dots\dots(5.8)$$

La potencia reactiva de la sección de 7ª armónicas será:

$$KVAR = \sqrt{3} * V * I = \sqrt{3} * 220 * 6.48 = 2.47KVAR$$

Por lo tanto, de acuerdo a las ecuaciones (5.7) y (5.8), cada módulo del filtro tomará corriente de la red, que tendrá el siguiente valor:

$$I_f = 14.13 + 6.48 = 20.61 [A]$$

Como se mencionó anteriormente, ésta es una corriente reactiva capacitiva que beneficia al sistema, corrigiendo el factor de potencia de la red.

Para el cálculo del alimentador de los filtros de 5ª y 7ª armónica, dada la corriente que manejarán, se utilizara un calibre 8 AWG, que soporta hasta 50Amp a 75° tipo THHW, el fusible será de 30Amp.

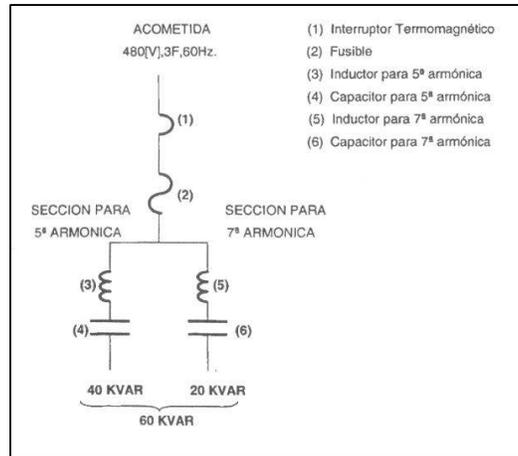


FIGURA 5.9 EJEMPLO DE FILTRO DISEÑADO PARA 5ª Y 7ª ARMONICA

CONCLUSIONES:

Los fenómenos que son objeto de estudio para la calidad de la energía como es el caso de las corrientes armónicas presentes en una instalación en la cual se tienen en su mayoría cargas no-lineales, es muy común que se presenten dichos disturbios.

El caso de estudio del Centro de Computo de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, presentan problemas que nos distorsionan la forma de onda de corriente principalmente y voltaje; ya que debido a las características de operación de las cargas no lineales se generan corrientes múltiples de la frecuencia fundamental lo que nos ocasiona en algunos casos ruido eléctrico, lectura de datos erróneos de procesadores de datos y sobrecalentamiento de conductores, corrientes excesivas por el neutro, accionamiento de interruptores electromagnéticos sin causa aparente, calentamiento y zumbido del transformador, etc.

Nos queda claro que para mantener o conseguir una calidad de la energía eléctrica óptima, es necesario tener al menos las siguientes condiciones: Un sistema de tierras con una baja impedancia menor a 10 Ohm; un reparto equivalente o balanceo de las cargas instaladas en un sistema trifásico de 4 hilos; Implementar las recomendaciones por los códigos y las normas que indican ciertas prácticas de puesta a tierra y dimensionamiento de conductores como por ejemplo el sobredimensionamiento del conductor neutral al 200% para cargas no lineales, de la capacidad de los conductores de fases, mantener un sistema de tierra aislada para los equipos de comunicaciones y datos, dimensionar los cables de fases y protecciones de acuerdo a lo que indica la NOM-001-SEDE-2005.

La metodología para la atenuación de armónicos, pretende ser una guía general para resolver problemas de calidad de la energía en redes eléctricas de baja tensión, cabe mencionar que en este caso particular, no se realizó la corrección del proyecto eléctrico por la carencia de información de las cargas que controla el tablero analizado, en su lugar se utilizaron los resultados del analizador para realizar los cálculos de los filtros.

Es de vital importancia dejar en claro que este estudio corresponde a la atenuación de armónicos y por ello se realizó los cálculos con los datos obtenidos; pero lo más adecuado sería realizar en primer término, las soluciones técnicas de la instalación eléctrica como tal y posteriormente realizar la medición de los disturbios. Es en este punto donde se debe determinar una solución integral en base al análisis de los resultados.

Existen diferentes métodos para la reducción de armónicos, para el caso del centro de cómputo se implementó para solucionar este problema, un transformador zig-zag, que hace que circulen por los devanados las armónicas de secuencia cero y un filtro de 5ª y 7ª armónica sintonizados.

El cambio de un transformador existente implica un costo mucho más elevado, pero para los fines que persigue esta investigación que es la de atenuación de los armónicos es lo más idóneo. Esta solución se puede implementar si en algún momento deciden arreglar los problemas de suministro de energía que se tienen en el centro de cómputo.

Cabe mencionar que obteniéndose una calidad óptima de energía el costo de generación de la misma se reduciría debido a que la eficiencia de aprovechamiento de la misma sería más alta, a su vez nos permite hacer conciencia de la utilización racional de los recursos con los cuales se genera la energía eléctrica, ya que por el mal uso de la misma se tienen pérdidas considerables en la transmisión, generación y sobretodo la utilización, siendo un problema grave para el país debido a que los usuarios finales siempre tendrán que pagar cada vez costos más altos por la utilización de éste recurso básico.

APENDICE A

Analizador de Calidad de Energía Eléctrica
Trifásica PowerPad® Modelo 3945-B



Muestra registro de onda, transientes, datos de tendencia y acontecimientos simultáneos

¿No sería bueno si uno pudiese mirar dentro de su sistema eléctrico y ver qué está ocurriendo? La detección de fallas sería tanto más fácil si usted pudiese ver los volts, amperes y contenido de armónicos en tiempo real y tomar fotografías para documentar y analizar. Ahora usted puede hacer exactamente eso y más con el AEMC PowerPad. El display gráfico a todo color le permite ver y analizar cada señal claramente. Su alta velocidad de muestreo, a 256 muestras por ciclo, proporciona una excelente fidelidad al reproducir formas de onda y capturar transientes que ocurren tan rápidamente como en 62.5μ

La memoria de 6MB del PowerPad se encuentra convenientemente dividida para permitirle almacenar cuatro tipos diferentes de datos, sincronizados o independientes unos de otros. Usted puede almacenar hasta 12 fotos instantáneas de la pantalla, hasta 50 transientes capturados que contienen cuatro ciclos para cada entrada activa, y 4096 eventos de alarma. Usted también puede registrar datos de tendencia durante días, semanas e incluso meses.

Seis botones de acceso directo a funciones le permiten ver rápidamente:

- **Forma de ondas:** Presenta Volts, Amps, THD y Factor de Cresta por fase o en todas las fases, usted puede presentar todas las entradas de voltaje en una pantalla, fase-a-fase o fase-a-neutro. Se pueden presentar diagramas de fasores en tiempo real para volts y amps, también por fase o en todas las fases.
- **Armónicos:** Presenta armónicos hasta la 50va. para Volts, Amps y VA. Los armónicos individuales se presentan como un porcentaje y en valor real. También se puede presentar la dirección y la secuencia de los armónicos.
- **Transientes:** Ajuste, capture y presente los transientes usted selecciona el umbral y el número de transientes a capturar. Luego el PowerPad captura cuatro formas de onda para cada transiente; la forma de onda de disparo como también un pre- y dos post-forma de onda de disparo.

Se puede capturar hasta 1200 formas de onda.

- **Alarmas:** Configura, captura y presenta hasta 4096 eventos de alarma basados en hasta diez variables de disparo diferentes. Cada evento de alarma capturado mostrará la fase, la variable y el valor como también la hora y duración.

- **Registro:** Ajusta y registra datos de tendencia a velocidades seleccionables desde una muestra/segundo hasta una muestra cada 15 minutos en 22 variables diferentes para todas las fases. Vea en pantalla los datos registrados, acérquese o aléjese y desplácese por el eje tiempo para analizar los datos.
- **Potencia & Energía:** Presenta Watts, VARs y VA por fase y total. Acumula totales y vea si la energía es inductiva o capacitiva.

Si aún no está convencido considere estas otras funciones y características:

- El PowerPad usa sensores de corriente que configuran automáticamente el rango y la escala del canal de corriente del instrumento.
- El PowerPad viene con un sistema de ayuda en línea que le da información clara sobre las funciones y los botones en cada pantalla.
- El PowerPad viene con todas las opciones y los accesorios necesarios para capturar, presentar, bajar, analizar y almacenar datos. No se requiere aditamentos que aumenten su costo. El PowerPad se entrega con el software para graficar/analizar DataView de AEMC sin costo adicional (un valor de 395 dólares)
- El software permite configurar y capturar datos completamente en tiempo real en su computadora. Usted puede bajar todos los datos almacenados del PowerPad e imprimir informes mediante una biblioteca de plantillas prediseñadas o diseñar sus propias plantillas e informes.

Además de todo esto, el PowerPad habla seis idiomas diferentes. Al pulsar un botón, la información puede presentarse en Inglés, Español, Francés, Portugués, Italiano y Alemán.



El apoyo inclinable le facilita la visión

Características:

- Mediciones de RMS verdadero mono-, di- y tri-fásicas a 256 muestras/ciclo, más CC
- Formas de onda en color en tiempo real
- Ajustes en pantalla fáciles de usar
- Reconocimiento del sensor de corriente y ajuste de escala automáticos
- Mediciones RMS verdaderas de voltaje, corriente
- Mide volts, amps y potencia CC
- Presenta y captura armónicos de voltaje, corriente y potencia hasta el orden 50va, incluyendo dirección en tiempo real
- Captura transientes hasta 1/256th de ciclo
- Presentación de diagrama de fasores
- Voltaje y corriente de pico
- Frecuencia nominal de 40 a 70Hz
- VA, VAR y W por fase y totales
- KVAh, VARh y KWh por fase y totales
- Presentación de corriente neutra para tri-fásicas
- Factores de cresta para corriente y voltaje
- Presentación de factor K de transformador
- Presentación de Factor de potencia, FP de desplazamiento
- Captura hasta 50 transientes
- Presentación de fluctuaciones de corta duración
- Desbalance de fases (corriente y voltaje)
- Distorsión Armónica (total e individual) de 1^a. A 50va.
- Alarmas, golpes y caídas de voltaje
- Registra fecha y características de las perturbaciones
- Impresión inmediata directa a la impresora
- Función foto instantánea de la pantalla captura formas de onda u otra información en pantalla
- Puerta de comunicación RS-232 ópticamente aislada
- Incluye software DataView® para el almacenaje de datos, muestra en tiempo real, el análisis y la generación de informe
- Cumple la categoría de seguridad 600V Cat. IV



Aplicaciones

- Verificación de circuitos de distribución de energía eléctrica
- Medición y registro de la calidad de los sistemas de potencia (KW, VA, VAR)
- Medición de energía (kVAh, VARh, kWh)
- Detección de fallas en planta, de los paneles de distribución y maquinarias individuales
- Monitoreo de transformadores montados sobre base de concreto

- Determinación de problemas de armónicos originados en la fuente o en la carga
- Monitoreo de desbalances de fases
- Determinación de factor K de transformadores



Pantallas Funcionales

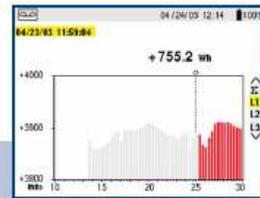
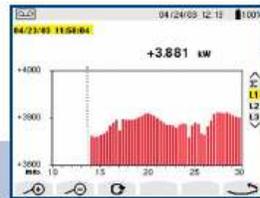
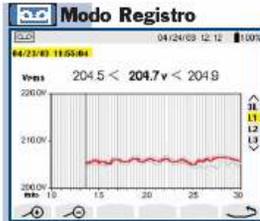


Se puede presentar las formas de onda en tiempo real de cualquiera y todas las entradas. Se puede presentar gráficamente los Diagramas de Fasores en las presentaciones de RMS, THD y Factor de Cresta, mostrando la relación de fases como también los valores reales de los voltajes y las corrientes fase-a-fase. También se presenta el porcentaje de desbalance.



Fecha	Hora	Condición	Valor	Estado
09/20/02	15:04	L1 Tan	010	44
		L1 Armo	1A	565
		L2 Armo	0A	565
		L3 Armo	0A	565
		L1 Tan	010	76
		L1 W	SSW	79
		L1 Armo	1A	7974
		L2 Armo	0A	7974
		L3 Armo	0A	7974
16/16/02	09:22	L1 W	04PW	359
		L2 W	1038W	359

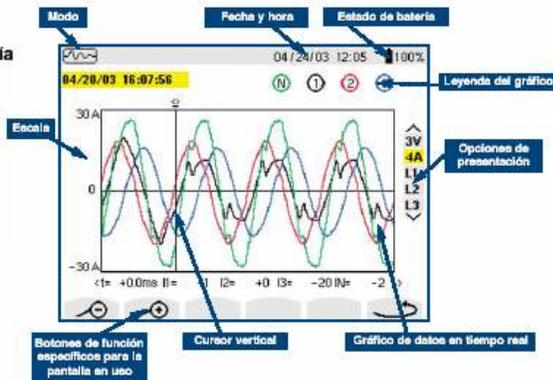
Se puede registrar y presentar hasta 4096 condiciones de alarma. Cada alarma muestra fecha, hora, función, valor y duración (hasta 10ms).



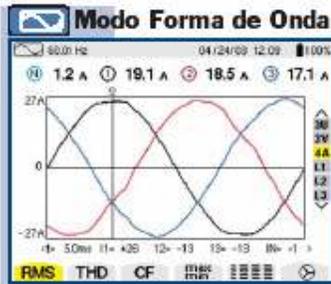
Se puede programar, almacenar y presentar el registro de tendencia de una a 22 variables y de una a seis entradas, a velocidades de almacenaje entre un segundo y 15 minutos. Se puede analizar en pantalla los datos moviendo el cursor horizontal para ver valores MW, MAX e instantáneos como también hora y fecha. El eje de tiempo puede ser acercado o alejado. También se puede registrar y presentar el consumo de potencia y energía.



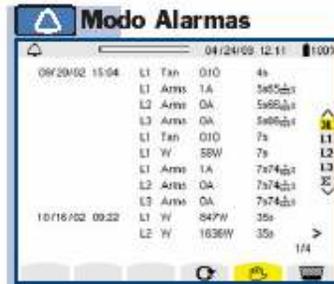
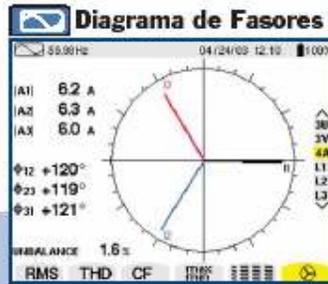
Se puede presentar la Potencia y la Energía por fase o total, incluyendo kW, Watts-horas, VARhoras, VA y VAhoras. Se puede totalizar la energía y también presentar las componentes inductiva y capacitiva.



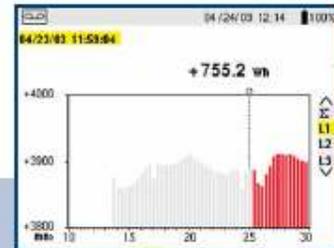
Pantallas Funcionales



Se puede presentar las formas de onda en tiempo real de cualquiera y todas las entradas. Se puede presentar gráficamente los Diagramas de Fasores en las presentaciones de RMS, THD y Factor de Cresta, mostrando la relación de fases como también los valores reales de los voltajes y las corrientes fase-a-fase. También se presenta el porcentaje de desbalance.



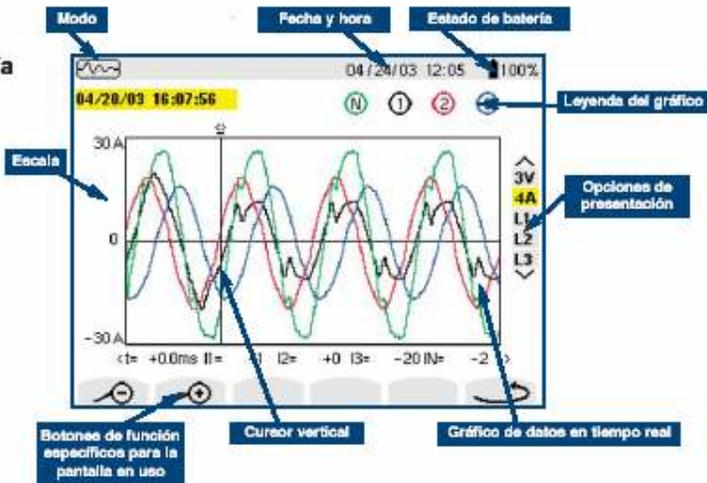
Se puede registrar y presentar hasta 4096 condiciones de alarma. Cada alarma muestra fecha, hora, función, valor y duración (hasta 10ms).



Se puede programar, almacenar y presentar el registro de tendencia de una a 22 variables y de una a seis entradas, a velocidades de almacenaje entre un segundo y 15 minutos. Se puede analizar en pantalla los datos moviendo el cursor horizontal para ver valores MIN, MAX e instantáneos como también hora y fecha. El eje de tiempo puede ser acercado o alejado. También se puede registrar y presentar el consumo de potencia y energía.



Se puede presentar la Potencia y la Energía por fase o total, incluyendo kW, Watts-horas, VARhoras, VA y VAhoras. Se puede totalizar la energía y también presentar las componentes inductiva y capacitiva.



MODELO		3945-B	
ELECTRICAS			
Frecuencia de Muestreo		256 muestras por ciclo	
Almacenamiento de datos		4MB partidos para formas de onda, transientes, alarmas y registro	
Voltaje (TRMS)		Fase-a-Fase:960V Fase-a-Neutro:480V	
Corriente (TRMS)		Tenaza MN: 0 a 6A/120A o 0 a240A Tenaza MR: 0 a 1200Aca, 0 a 1400Acc Tenaza SR: 0 a 1200A AmpFlex®: 0 a 6500A ¹	
MEDICION	RANGO	RESOLUCION	EXACTITUD
Voltajes RMS Mono-Fásicos	15 a 480V	0.1V	$\pm 0.5\% \pm 2\text{cts}$
Voltajes RMS Fase-a-Fase	15 a 960V	0.1V	$\pm 0.5\% \pm 2\text{cts}$
Componente de Voltaje CC	15 a 680V	0.1V	$\pm 1\% \pm 2\text{cts}$
Voltajes de Pico Mono-Fásicos	15 a 680V	1V	$\pm (1\% + 5\text{cts})$
Voltajes de Pico Fase-a-Fase	15 a 1360V	1V	$\pm (1\% + 5\text{cts})$
Frecuencia (Hz)	40 a 69Hz	0.01Hz	$\pm 0.01\text{Hz}$
Sensores de corriente (Arms) Tenaza M Tenaza SR Sensor AmpFlex®	0 a 240A 0 a 1200A 10 A 6500A	0.1A 0.1A;1A $\geq 1000\text{A}$ 0.1A;1A $\geq 1000\text{A}$	$\pm (0.5\% + 2\text{cts})$ $\pm (0.5\% + 2\text{cts})$ $\pm (0.5\% + 1\text{A})$
Potencia Activa (Real) (KW)	0 a 9999Kw	4 dígitos (10,000ct)	$\pm 1\% \pm 1\text{ct} @ \text{PF} \geq 0.8$
Potencia Reactiva (kVAR)	0 a 9999kVAR	4 dígitos (10,000ct)	$\pm 1\% \pm 1\text{ct} @ \text{PF} \leq 0.8$
Potencia Aparente (kVA)	0 a 9999kVA	4 dígitos (10,000ct)	$\pm 1\% \pm 1\text{ct}$
Factor Potencia (PF Y DPF)	-1.000 a 1.000	0.001	$\pm (1.5\% + 0.01)$
Energía Activa (kWh)	0 a 9999MWh	4 dígitos (10,000ct)	$\pm 1\% \pm 1\text{ct} @ \text{PF} \geq 0.8$
Energía Reactiva (kVARh)	0 a 9999MVARh	4 dígitos (10,000ct)	$\pm 1\% \pm 1\text{ct} @ \text{PF} \leq 0.8$
Energía Aparente (kVARh)	0 a 9999MVAh	4 dígitos (10,000ct)	$\pm 1\% \pm 1\text{ct}$
Desbalance (V & A)	0 a 100%	0.1%	$\pm 1\% \pm 1\text{ct}$
Angula de Fase (V-A, A-A, V-V)	-179° a +180°	1°	$\pm 2^\circ \pm 1\text{ct} \pm$
Armónicos (1° a 50va.) F= 40 A 69Hz (V $\geq 50\text{v}$, A $> \text{Inom}/100$)	0 a 999%	0.1%	$\pm 1\% \pm 5\text{ct}$
Distorsión Armónica Total	0 a 999%	0.1%	$\pm 1\% \pm 5\text{ct}$

(V Y a)			
Factor-K (Akf)	1 a 99.99%	0.01	$\pm 5\% \pm 5ct$
Parpadeo (Pst)	0.00 a 9.99	0.01	=
Alimentación	Juego de baterías recargables NiMH de 9.6V Alimentación CA: 110/230Vca $\pm 20\%$ (50/60Hz)		
Vida de la Batería	≥ 8 hrs.con pantalla encendida; ≤ 35 hrs con pantalla apagada (en modo registro)		
MECANICAS			
Dimensions	9.5 x 7 x 2" (240 x 180 x 55 mm)		
Weight	4.6 lbs (2.1kg)		
PANTALLA			
Tipo de Pantalla	LCD de color ¼ VGA (320 X 240)		
AMBIENTALES			
Temperatura de operación	32° A 122°F (0° A 50°C)		
Temperatura de Almacenaje	-4° a + 122°F (-20° a +50°C)		
SEGURIDAD			
Clasificación de Seguridad	EN 61010-1,600V Cat.IV ² , Grado de Contaminación 2		
Doble Aislamiento	Sí		
Marca CE	Sí		

DataView® Software

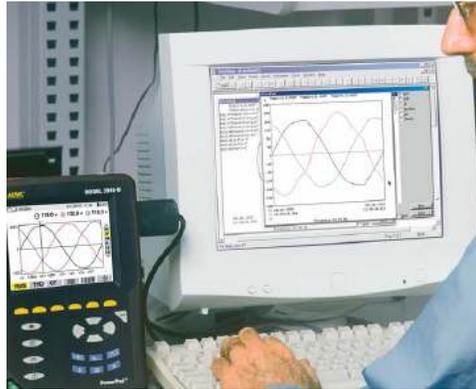
Características:

Configure todas las funciones del PowerPad®
Modelo 3945-B

- Presente y analice datos en tiempo-real en su PC
- Configure todas las funciones de PowerPad desde su PC
- Personalice vistas, plantillas e informes de acuerdo a sus necesidades exactas
- Cree y almacene una biblioteca completa de configuraciones que pueden ser transferidas al PowerPad según se necesita
- Acérquese, aléjese y desplácese por las secciones del gráfico para analizar los datos
- Presente formas de onda, gráficos de tendencia, espectros de armónicos, resúmenes en texto, transientes, registro de eventos y alarmas almacenadas
- Imprima informes usando plantillas estándar o personalizadas que usted diseñe.

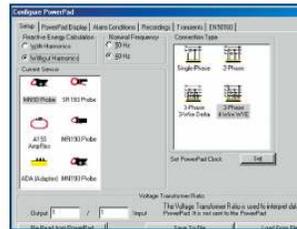
Requerimientos mínimos del Sistema

- Windows®95/98/2000/ME/XP o Windows®NT 4.0
- 32MB de RAM (128MB recomendados)
- 35MB espacio en disco duro (200MB recomendados)
- Lector de CD Rom

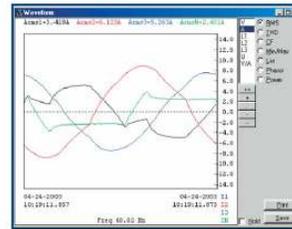


Presenta formas de ondas en tiempo real en su computadora

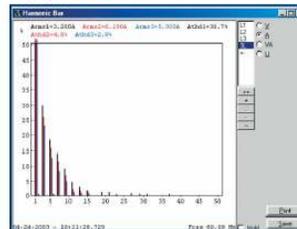
DataView® Pantallas



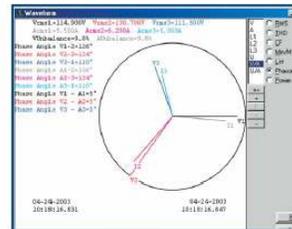
Fácil y claro ajuste de todas las funciones en un cuadro de diálogo que se recorre con la tecla de tabulación.



Presente formas de onda en tiempo real por fase, parámetro o total.



Presente todos los armónicos del 1º al 50º en gráfico de barras para voltaje, corriente y potencia.



Presente diagramas de fasores en tiempo real. Incluye desbalance tanto para voltaje como para corriente.

Parámetro	V1	V2	V3	Total
P (W)	100.0	100.0	100.0	300.0
Q (VAr)	50.0	50.0	50.0	150.0
S (VA)	111.8	111.8	111.8	335.4
E (Wh)	10.0	10.0	10.0	30.0

Presente parámetros de potencia y energía – tanto instantáneos como total.

Orden Armónico	Voltaje (%)	Corriente (%)	Potencia (%)
1	99.9	99.9	99.9
2	0.1	0.1	0.1
3	0.1	0.1	0.1
4	0.1	0.1	0.1
5	0.1	0.1	0.1

Presente armónicos en una tabla de texto desde el armónico 0 (CC) hasta el 50º.

Construcción



Los conectores de entrada codificados con colores proporcionan entradas dedicadas para sensores de corriente y voltaje.



Las conexiones ubicadas a un costado del Modelo 3945-B proporcionan una puerta de comunicación ópticamente aislada RS-232 y conexión a la línea de 85 a 256 V_{CA} (50/60Hz).

Accesorios

Una familia completa de sensores de medición de corriente para satisfacer la mayoría de las mediciones CA (o CC) hasta 6500Arms



SR193 Tamaño máximo de conductor: 2.05" (52mm)
Rango de medición: 3 a 1200A

Conjunto de tres sensores de corriente con código de color SR193 (1200A)
Cat. #2140.10 (10 ft leads); Cat. #2140.25 (30 ft leads)



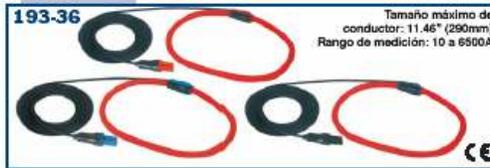
MN93 Tamaño máximo de conductor: 0.78" (20mm)
Rango de medición: 2 a 240A

Conjunto de tres sensores de baja corriente con código de color MN93 (240A)
Cat. #2140.09 (10 ft leads); Cat. #2140.24 (30 ft leads)



193-24 Tamaño máximo de conductor: 7.64" (190mm)
Rango de medición: 10 a 6500A

Conjunto de tres sensores de corriente flexibles con código de color AmpFlax 193-24 (6500A) con sensores de 24"
Cat. #2140.11 (10 ft leads); Cat. #2140.26 (30 ft leads)



193-36 Tamaño máximo de conductor: 11.46" (290mm)
Rango de medición: 10 a 6500A

Conjunto de tres sensores de corriente flexibles con código de color AmpFlax 193-36 (6500A) con sensores de 36"
Cat. #2140.12 (10 ft leads); Cat. #2140.27 (30 ft leads)



MN193 Tamaño máximo de conductor: 0.78" (20mm)
Rangos de medición: 5mA a 6A
100mA a 120A

Conjunto de tres sensores de baja corriente con código de color MN193 (6A/120A)
Cat. #2140.14 (10 ft leads); Cat. #2140.29 (30 ft leads)



MR193 Tamaño máximo de conductor: 1.6" (41mm)
Rangos de medición: 10 a 1000Aca
10 to 1400Acc

Conjunto de tres sensores de corriente CA/CC con código de color MR193 (1000Aca/1400Acc)
Cat. #2140.13 (10 ft leads); Cat. #2140.30 (30 ft leads)



MR193 sonda (conector negro) (1000Aca/1400Acc)
de catálogo 2140.28 (10 ft leads)

La Caja Adaptadora de 5A facilita el uso de sensores de corriente con salida de corriente con el PowerPad. Las razones se pueden programar hasta 2999:1 o 2999:5. La Caja Adaptadora funciona con entradas de corriente mono-, bi- o tri-fásicas.



Caja Adaptadora de 5A
de catálogo 2140.17

Contactos

América del Sur, América Central, México, Caribe, Australia y Nueva Zelanda:

Chauvin Arnoux®, Inc
d.b.a. AEMC® Instruments
15 Faraday Drive
Dover, NH 03820 USA
(978) 526-7667 Fax (978) 526-7605
export@aemc.com
www.aemc.com

Servicio al cliente - para hacer un pedido, obtener precio y envíos:
customerservice@aemc.com

Departamento de Ventas – para información de ventas en general:
sales@aemc.com

Servicio de Reparación y Calibración – para información en reparación y calibración,
obtener manual del usuario:
repair@aemc.com

Soporte Técnico y aplicación de Producto – para soporte técnico y aplicación:
techinfo@aemc.com

Webmaster – para información referente a www.aemc.com:
webmaster@aemc.com

Estados Unidos y Canadá:

Chauvin Arnoux®, Inc
d.b.a. AEMC® Instruments
200 Foxborough Blvd.
Foxborough Blvd.
Foxborough, MA 02035 USA
(508) 698-2115 Fax (508) 698-2118

Otros Países:

Chauvin Arnoux
190, rue Championnet
75876 Paris Cedex 18, France
33 1 44 85 45 28 Fax 33 1 46 27 73 89
info@chauvin-arnoux.xom
www.chauvin-arnoux.com

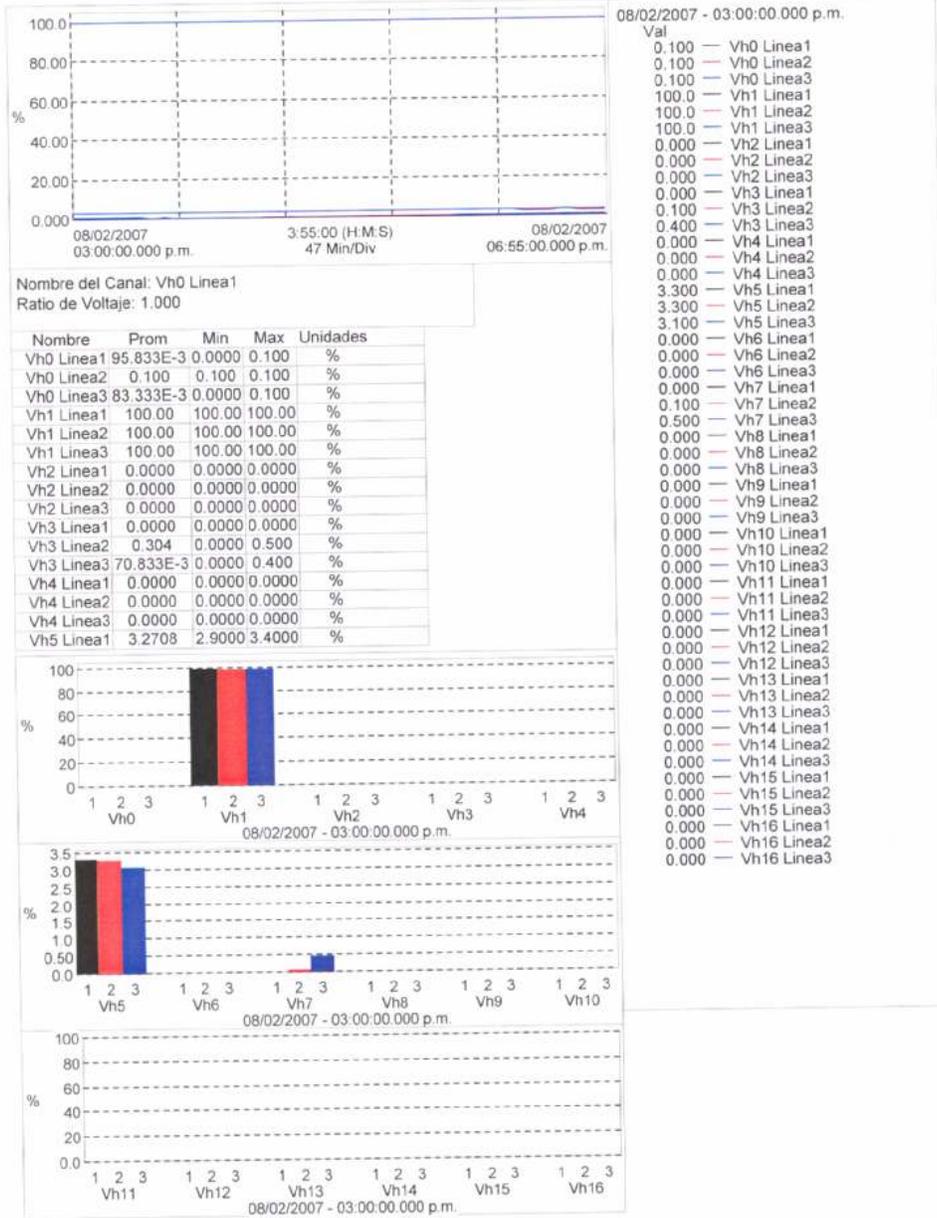
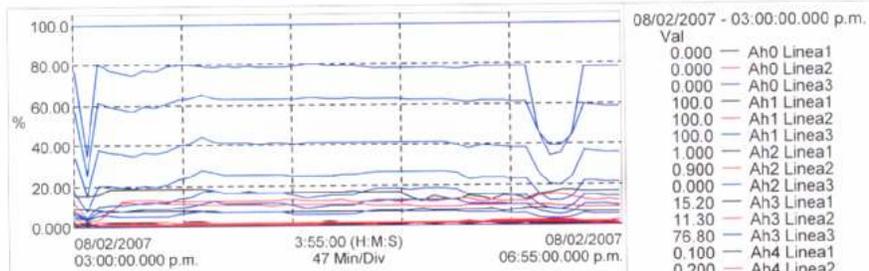


TABLA 6



Nombre del Canal: Ah0 Linea1
 Ratio de Corriente: 1.000

Nombre	Prom	Min	Max	Unidades
Ah0 Linea1	0.0000	0.0000	0.0000	%
Ah0 Linea2	0.0000	0.0000	0.0000	%
Ah0 Linea3	0.0000	0.0000	0.0000	%
Ah1 Linea1	100.00	100.00	100.00	%
Ah1 Linea2	100.00	100.00	100.00	%
Ah1 Linea3	100.00	100.00	100.00	%
Ah2 Linea1	1.8208	1.0000	2.7000	%
Ah2 Linea2	65.417E-3	0.0000	2.5000	%
Ah2 Linea3	0.188	0.0000	3.4000	%
Ah3 Linea1	16.217	12.000	18.600	%
Ah3 Linea2	12.394	4.7000	15.500	%
Ah3 Linea3	74.535	34.100	80.500	%
Ah4 Linea1	0.146	0.0000	0.600	%
Ah4 Linea2	20.833E-3	0.0000	0.800	%
Ah4 Linea3	8.3333E-3	0.0000	0.300	%
Ah5 Linea1	7.3688	6.3000	8.9000	%

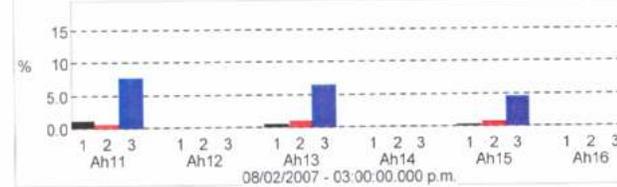
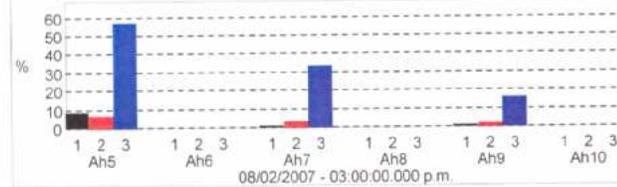
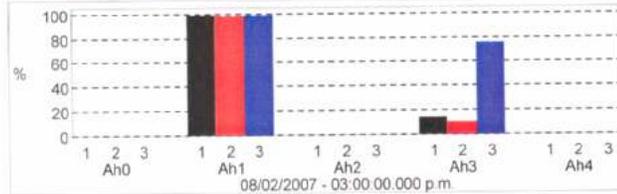
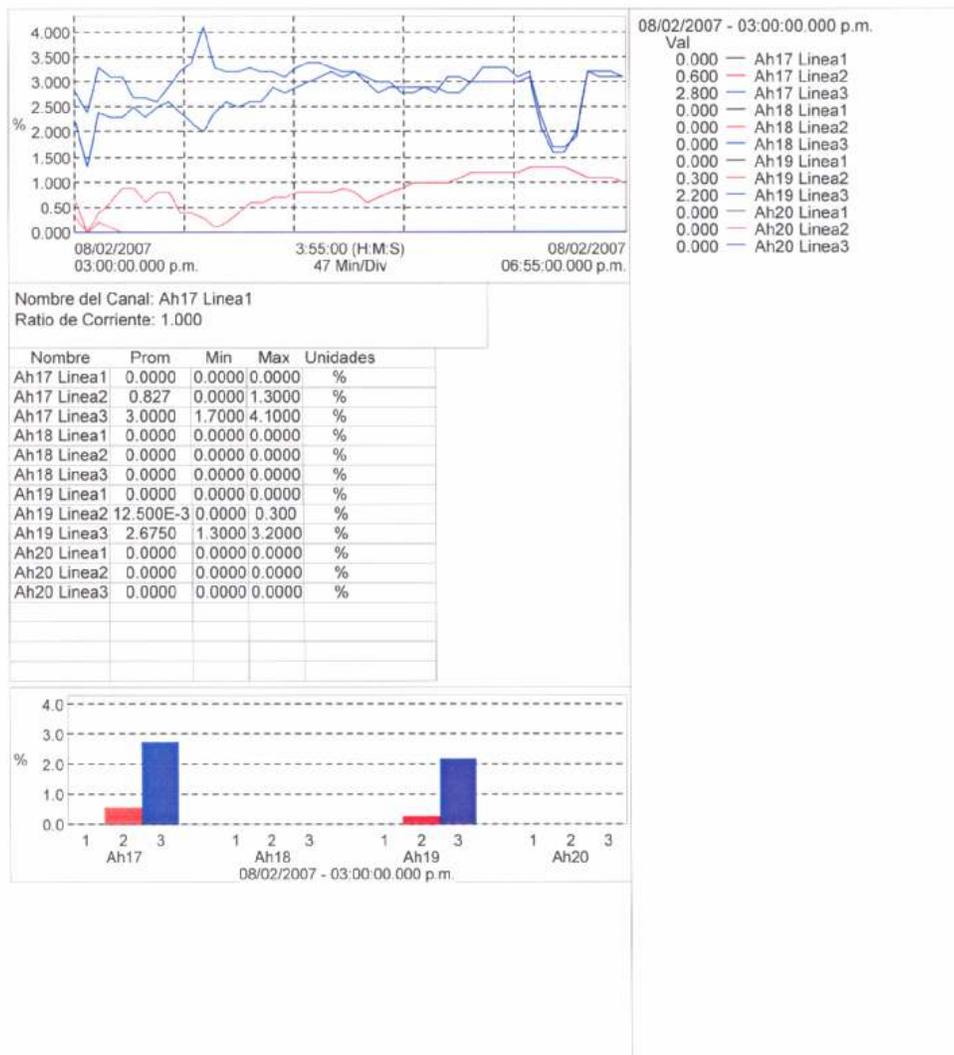


TABLA 7



CONTINUACION TABLA 7

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Enríquez Harper. EL ABC DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. Editorial Limusa.
- 2) William H. Hayt jr, Jack E. Kemmerly. ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN INGENIERÍA. Editorial McGraw-Hill
- 3) Ing. Navarro Crespo Alfredo. CORRIENTES ARMÓNICAS. Técnica Salgar S.A de C.V.
- 4) Herrera Sordo, Javier. AGENDA DEL INGENIERO ELECTRICISTA. Editorial Agenda del abogado.
- 5) NATIONAL ELECTRICAL CODE 1993 (NEC)
- 6) NOM-001-SEDE-2005
- 7) Especificación Provisional CFE-L0000-45, PERTURBACIONES PERMISIBLES EN LAS FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, Comisión Federal de Electricidad, enero 1995.
- 8) Rives, E. González, V.R. Portilla, “EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ARMÓNICAS EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE COMPAÑÍA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S.A.”, 5ª Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México, en Acapulco, Gro. 1992, pp. 67-74.
- 9) R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, ELECTRICAL POWER SYSTEMS QUALITY, McGrall- Hill, 1996.
- 10) A. A. Mahmoud (Editor), W. M. Grady, M.F. McGranaghan (Co-Editors), POWER SYSTEMS HARMONICS, IEEE Tutorial Course, 1984.
- 11) IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR POWERING AND GROUNDING SENSITIVE ELECTRONIC EQUIPMENT. IEEE std 1100-1992, IEEE Press.
- 12) D. A. González, J. C. McCall, “ DESIGN OF FILTERS TO REDUCE HARMONIC DISTORTION IN INDUSTRIAL POWER SYSTEMS, IEEE Trans. on Ind. Appl. vol Ia-23, no. 3, May/Jun 1987. pp 504-511.