



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales

" ARAGON "

**" ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA MANTENER
LA CALIDAD EN EL SUMINISTRO DE
ENERGIA ELECTRICA " .**

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

ALEJANDRO DE JESUS } PEREZ LOPEZ

ENEP



ARAGON

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEXICO

1995.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVIATION DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

ALEJANDRO DE J. PEREZ LOPEZ
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 11 de mayo del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. JUAN MENDEZ MORENO pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado " ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA MANTENER LA CALIDAD EN EL SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Mex., 16 de mayo de 1994
EL DIRECTOR

CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO

Juan Pérez

- c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica.
- c c p Ing. Raúl Barrón Vera, Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- c c p Ing. Juan Méndez Moreno, Asesor de Tesis.

CCMC'AIR'11a.

¡ GRACIAS DIOS !

Por haberme dado la oportunidad de vivir y de tener una familia con la cual hasta ahora he podido crecer y desarrollarme.

Por haberme dado la oportunidad de estudiar y llegar, con la culminación de este trabajo, al final de una etapa de mi vida donde de no haber sido por ti no hubiera podido lograrlo.

Por empujarme, por jalarme y por llevarme de la mano, aunque yo no quería, porque no estaba seguro de lo que quería y a donde es que debía llegar por este camino que trazaste para mí en este mundo que formaste para nosotros.

Por darme la libertad de elegir lo que yo creo que esta mejor para mí, por dejarme ser a mi manera y por estar siempre junto a mi aunque no me haya dado cuenta.

Por este trabajo que nunca pensé llegar a realizar y a terminar y por todo aquello que me has dado y que nunca te he agradecido.

Por todo esto y por todo lo que se me haya olvidado

¡ MIL GRACIAS !

! G R A C I A S !

Al Ing. Juan Mándes Moreno (Q.E.P.D.), a quien no quiero dejar de recordar, por haber dirigido este trabajo de tesis en casi su totalidad y por haber sido siempre un motivador para mí y mis compañeros alentándonos a alcanzar nuestras metas, y por haber sido uno de los mejores profesores que tuve durante mi carrera.

Al Ing. Rudi Barrón Vera por haber dirigido la parte final de este trabajo y por ser siempre un amigo y un gran profesor para todos los alumnos de la carrera de ingeniería mecánica eléctrica, además de estar siempre dispuesto a atender cualquier problema de los alumnos.

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas por haberme dado la oportunidad de realizar mi Tesis en sus instalaciones colaborando y trabajando con ellos, especialmente agradezco el apoyo incondicional de todos los Ingenieros del Departamento de Ingeniería Eléctrica que siempre me apoyaron y me motivaron a terminar este trabajo.

Especialmente al Ing. Arturo Ruiz García por haber sido mi supervisor de tesis en el IIE y por dejarme actuar libremente en la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la **Escuela Nacional Estudios Profesionales ARACÓN** por haber sido la institución que me formó profesionalmente y que me dió las bases para desarrollarme en la vida productiva de este país.

A todos los profesores que dejaron huella en mi vida estudiantil, a todos aquellos que siempre se dedicaron a los alumnos y que siempre se preocuparon por que aprendieramos y fuéramos perseverantes en todas nuestras actividades.

CON CARINO Y AFECTO

Dedico especialmente este trabajo a mi **MAMÁ**, quien ha sido la persona más importante a lo largo de mi vida y a quien le debo gran parte de todo lo que soy y como soy, porque gracias a ella me he formado con bases firmes y sólidas y espero no defraudarla.

MAMÁ ESTO ES TUYO TE LO DEDICO CON TODO MI CORAZÓN PORQUE SIEMPRE ME HAS DADO TU APOYO Y HAS RETADO EN LOS MOMENTOS QUE TE HE NECESITADO, GRACIAS DESDE EL FONDO DE MI CORAZÓN, TE AMO.

Dedico este trabajo a mi **PAPÁ** y a mis hermanos **MUNDO, CLAUDIA** y **EMILIO** por ser una gran familia para mí, unida a pesar de las dificultades y de lo diferente que somos cada uno de nosotros. **Gracias por estar conmigo, LOS AMO.**

Dedico también este trabajo a todos aquellos compañeros y amigos que han formado parte de mi vida; especialmente a todos aquellos que dejaron huella y que fueron una parte muy importante de ella, por su amistad y por su compañía; especialmente a los (as) que aún siguen conmigo porque sé que harían cualquier cosa que yo les pidiera. También a aquellos que hicieron algo por mí sin que yo me diera cuenta y que siempre me trataron bien. A todos les doy las gracias.

UN PEQUEÑO POEMA

" Vengan justo al borde ".

" NO. Tenemos miedo ".

" Acérquense al borde mismo... ".

" ¡ NO !, Nos caeremos ".

" No teman. Vengan al borde del abismo... ".

" ¿ No nos... empujarás ? ".

" Vengan ".

Y fueron.

Y los empujó.

Y volaron.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1-1
--------------------	-----

1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1	INTRODUCCIÓN	1-1
1.2	GENERALIDADES	1-3
1.3	DEFINICIONES	1-5
1.4	COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA	1-7
1.4.1	Compatibilidad Electromagnética (CEM)	1-7
1.4.2	Emisor	1-8
1.4.3	Inmunidad (de un receptor)	1-8
1.4.4	Nivel de compatibilidad electromagnética	1-8
1.4.5	Nivel de emisión (de una fuente perturbadora)	1-8
1.4.6	Límite de emisión (de una fuente perturbadora)	1-9
1.4.7	Nivel de inmunidad	1-9
1.4.8	Límite de inmunidad	1-9
1.4.9	Entorno electromagnético	1-9
1.4.10	Clases de entornos electromagnéticos	1-9
	1.4.10.1 Clase 1	1-10
	1.4.10.2 Clase 2	1-10
	1.4.10.3 Clase 3	1-10
1.4.11	Relación entre niveles de emisión y de inmunidad	1-11
1.5	ÍNDICES DE CONFIABILIDAD	1-12

1.5.1	Tiempo de interrupción por usuario (TIU)	1-14
1.5.2	Interrupciones por cada 100 km de línea (FIL)	1-15
1.5.3	Porcentaje de índice de disponibilidad (PID)	1-16
1.5.4	Interrupciones por cada 1000 usuarios (FIU)	1-16
1.5.5	Interrupciones por circuito (FIC)	1-17
1.5.6	Tiempo de interrupción promedio por disturbio (TIPDI)	1-17
1.5.7	Frecuencia equivalente de interrupción por consumidor	1-18
1.5.8	Duración equivalente de la interrupción por consumidor en horas	1-18
1.6	CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL DE CALIDAD	1-20
1.6.1	Estudio de mercado	1-23
1.6.2	Ingeniería de proyecto	1-23
1.6.3	Compras	1-24
1.6.4	Instalación	1-24
1.6.5	Operación	1-24
1.6.6	Mantenimiento preventivo	1-24
1.6.7	Mantenimiento correctivo	1-25
1.7	DEFINICIÓN DE GRADOS DE CONTINUIDAD DE ACUERDO CON EL TIPO DE CONSUMIDORES ATENDIDOS	1-25
1.7.1	Grado 1	1-32
1.7.2	Grado 2	1-32
1.7.3	Grado 3	1-32
1.7.4	Grado 4	1-32
1.8	CLASIFICACIÓN DE PRIORIDADES	1-34
1.8.1	Consumidores con prioridad A	1-35
1.8.2	Consumidores con prioridad B	1-36
1.8.3	Consumidores con prioridad C	1-36
1.8.4	Consumidores con prioridad D	1-37
1.9	CARGAS SENSITIVAS	1-38
1.10	CONSIDERACIONES DE VOLTAJE DE ESTADO ESTABLE	1-39

2 FUENTES QUE DETERIORAN LA CALIDAD DE LA ENERGIA

2.1	INTRODUCCION	2-1
2.2	FUENTES DE INFLUENCIACION NATURALES	2-4
2.3	FUENTES DE INFLUENCIACION ARTIFICIALES	2-4
2.4	ORIGEN DE LAS VARIACIONES LENTAS DE TENSION	2-7
2.5	ORIGEN DE LAS DEPRESIONES DE VOLTAJE	2-9
2.6	ORIGEN DE LAS FLUCTUACIONES RÁPIDAS DE LA TENSION	2-11
2.7	ORIGEN DE LAS TENSIONES TRANSITORIAS (Impulsos)	2-13
2.8	ORIGEN DE LAS VARIACIONES DE FRECUENCIA	2-15
2.9	ORIGEN DE LAS ARMONICAS	2-15
	2.9.1 Fuentes de Armónicas	2-16
	2.9.2 Fuentes Tradicionales de Armónicas	2-17
	2.9.2.1 Transformadores	2-18
	2.9.2.2 Maquinas rotatorias	2-20
	2.9.2.3 Hornos	2-26
	2.9.2.4 Alumbrado fluorescente	2-22
	2.9.2.5 Lámparas fluorescentes con balastras magnéticas	2-22
	2.9.2.6 Lámparas fluorescentes con balastras electrónicas	2-23
	2.9.3 Fuentes Nuevas Generadoras de Armónicas	2-24
	2.9.3.1 Inversores	2-24
	2.9.3.2 Grandes convertidores de potencia	2-25
	2.9.3.3 Convertidor de 6 pulsos	2-25
	2.9.3.4 Convertidor de 12 pulsos	2-26
	2.9.3.5 Convertidores de mediano tamaño	2-26
	2.9.3.6 Aparatos electrónicos de baja potencia	2-27
	2.9.4 Fuentes Futuras de Generación Armónica	2-31
2.10	ORIGEN DE LOS INTERARMONICOS	2-32
2.11	ORIGEN DE LOS DESEQUILIBRIOS	2-32
2.12	ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES	2-33
	2.12.1 Sobretensiones de origen interno	2-33
	2.12.2 Sobretensiones de origen externo	2-36

2.12.2	Subtensiones de origen externo	2-36
2.13	ORIGEN DEL RUIDO ELECTRICO (Interferencia)	2-40
2.14	ORIGEN DE LAS INTERRUPCIONES DE ENERGIA	2-40
2.15	ATERRIZAMIENTO	2-42

3 EFECTOS CAUSADOS POR DETERIORO EN LA CALIDAD DE LA ENERGIA

3.1	INTRODUCCION	3-1
3.2	EFECTOS DE LAS VARIACIONES LENTAS DE TENSION	3-3
3.3	EFECTOS DE LAS FLUCTUACIONES RAPIDAS DE LA TENSION	3-4
3.4	EFECTOS DE LAS TENSIONES TRANSITORIAS	3-4
3.5	EFECTOS DE VARIACIONES EN LA FRECUENCIA	3-5
3.6	EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS	3-5
3.6.1	Efectos en los Capacitores	3-8
3.6.2	Efectos en Interruptores y Fusibles	3-9
3.6.3	Efectos en los Conductores	3-11
3.6.4	Efectos en Equipo Electrónico	3-12
3.6.5	Alumbrado	3-15
3.6.6	Medidores	3-16
3.6.7	Efectos en Relevadores de Protección	3-17
3.6.8	Efectos en Máquinas Rotatorias	3-18
3.6.9	Efecto en las líneas Telefónicas (Interferencia)	3-20
3.6.10	Efecto en los Transformadores	3-22
3.7.11	Efectos en los Convertidores de Potencia Estáticos	3-25
3.7	RESONANCIA	3-25
3.7.1	Resonancia en Paralelo	3-27
3.7.2	Resonancia en Serie	3-29
3.8	EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS EN SISTEMAS AEREOS	3-30
3.9	EQUIPO INDUSTRIAL AFECTADO POR DEPRESIONES DE VOLTAJE	3-35

2.12.2	Sobretensiones de origen externo	2-38
2.13	ORIGEN DEL RUIDO ELECTRICO (Interferencia)	2-40
2.14	ORIGEN DE LAS INTERRUPCIONES DE ENERGIA	2-40
2.15	ATERRIZAMIENTO	2-42

3 EFECTOS CAUSADOS POR DETERIORO EN LA CALIDAD DE LA ENERGIA

3.1	INTRODUCCION	3-1
3.2	EFECTOS DE LAS VARIACIONES LENTAS DE TENSION	3-3
3.3	EFECTOS DE LAS FLUCTUACIONES RAPIDAS DE LA TENSION	3-4
3.4	EFECTOS DE LAS TENSIONES TRANSITORIAS	3-4
3.5	EFECTOS DE VARIACIONES EN LA FRECUENCIA	3-5
3.6	EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS	3-5
3.6.1	Efectos en los Capacitores	3-8
3.6.2	Efectos en Interruptores y Fusibles	3-9
3.6.3	Efectos en los Conductores	3-11
3.6.4	Efectos en Equipo Electrónico	3-12
3.6.5	Alumbrado	3-15
3.6.6	Medidores	3-16
3.6.7	Efectos en Relevadores de Protección	3-17
3.6.8	Efectos en Máquinas Rotatorias	3-18
3.6.9	Efecto en las líneas Telefónicas (Interferencia)	3-20
3.6.10	Efecto en los Transformadores	3-22
3.7.11	Efectos en los Convertidores de Potencia Estáticos	3-25
3.7	RESONANCIA	3-25
3.7.1	Resonancia en Paralelo	3-27
3.7.2	Resonancia en Serie	3-29
3.8	EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS EN SISTEMAS AEREOS	3-30
3.9	EQUIPO INDUSTRIAL AFECTADO POR DEPRESIONES DE VOLTAJE	3-35

3.10	EFFECTOS DE LOS DESEQUILIBRIOS	3-37
------	--------------------------------------	------

4 SOLUCIONES

4.1	INTRODUCCION	4-1
4.2	CONTROL DE VOLTAJE DE LA COMPAÑIA	4-2
4.3	COMPENSADOR DE VAR ADAPTIVO [Adaptive Var Compensation (AVC)]	4-5
4.4	SOLUCIONES CON ELECTRONICA DE POTENCIA	4-7
4.5	SOLUCIONES EN EL LADO DEL USUARIO SEGUN EPRI	4-9
4.6	SOLUCIONES EN EL LADO DE LA COMPAÑIA ELECTRICA SEGUN EPRI	4-13
4.7	SOLUCIONES DEL LADO DEL USUARIO SEGUN IEEE	4-16
4.7.1	Acondicionadores de energia eficientes	4-18
4.7.2	Supresores de Transitorios	4-19
4.7.3	Filtros	4-22
4.7.4	Transformadores de aislamiento	4-23
4.7.5	Reguladores de voltaje	4-24
4.7.6	Motores Generadores	4-30
4.7.7	Alimentadores dobles con transferencia estática	4-33
4.7.8	Unidades de Suministro de Energia Ininterrumpible [UPS]	4-36
4.7.9	UPS y Máquinas Generadoras	4-41
4.7.10	Armónicas en el punto de acoplamiento común	4-43
4.8	SOLUCIONES DEL LADO DE LA COMPAÑIA ELECTRICA SEGUN IEEE	4-45

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	INTRODUCCION	5-1
-----	--------------------	-----

5.2	CONCLUSIONES	5-2
5.3	RECOMENDACIONES	5-7
5.3.1	Evaluación de soluciones	5-8
5.3.2	Tendencias actuales para mejorar la calidad de la energía eléctrica en el lado del usuario	5-9
5.3.3	Concientizar	5-11
5.3.4	Mantenimiento Preventivo	5-12
5.3.5	Corrección de Factor de Potencia	5-13
5.3.6	Medidas Tomadas en México por CFE	5-16
BIBLIOGRAFÍA		B-1



INTRODUCCIÓN

En todo sistema eléctrico ocurren perturbaciones y problemas inesperados y en algunos casos inevitables por causa de fenómenos naturales, tales como las descargas atmosféricas, el clima, vientos intensos, por factores humanos o por la operación de la misma red. Esto provoca variaciones en la calidad de la energía eléctrica como son las interrupciones del servicio, depresiones o impulsos de voltaje, variaciones en la frecuencia y la generación de armónicas, que son algunas de las perturbaciones típicas en el suministro de energía.

La mayoría de los usuarios de energía eléctrica, principalmente los usuarios domésticos, experimentan pocos problemas con la "calidad de la energía" ya que sus cargas son insensibles a estos disturbios, pero ello no quiere decir que no sufran las consecuencias de los mismos y que no deban preocuparse por tener un buen suministro de energía eléctrica.

Actualmente el desarrollo tecnológico en el área de las telecomunicaciones y sistemas de control eléctricos y electrónicos basados en dispositivos de estado sólido, ha permitido la participación de otra serie de disturbios que contaminan la energía en forma preocupante alterando en forma directa los equipos y sistemas críticos (informáticos, de procesos, control estratégico, etc.).

El uso cada vez mayor de equipo electrónico y de control utilizado en la mayoría de los sistemas industriales modernos, trae consigo el surgimiento de nuevos disturbios eléctricos que alteran aún más la calidad de la energía. Además de algunos problemas como:

- Pérdidas económicas a causa de que se detienen procesos completos.
- Daños en equipos sensibles.
- Pérdidas de información en equipos de informática.
- Operación deficiente de sistemas de señalización.
- Acortamiento de la vida útil de los equipos, etc.

La seguridad del suministro es un aspecto importante en la alimentación de sistemas sensibles y cargas críticas. Una interrupción en la alimentación

puede causar la pérdida de muchas horas de trabajo y dinero, en centros de gestión, cálculo, diseño, instalaciones industriales de procesos continuos e incluso poner en peligro la vida de las personas (control de vuelos, unidades de vigilancia intensiva en hospitales, etc).

Es por esto y por algunas otras razones que el concepto de calidad de la energía ha llegado a tomar gran importancia en años recientes. Diferentes países, como son E.U. y Canadá en América y en Europa la comunidad Europea, llevan ya algunos años estudiando este tema, incluso ya se han realizado encuentros y seminarios para tratar todos los temas relacionados con la calidad de la energía. Y no es sólo por el hecho de que las compañías suministradoras de servicio eléctrico estén interesadas en profundizar en este tema sino que también los usuarios, principalmente los industriales que son de los más afectados han tomado conciencia de que cuando existe una mala calidad en la energía puede afectar sus procesos en incluso detenerlos y esto les cuesta mucho dinero. Pero también se están realizando investigaciones en la forma en que afecta a la calidad de la energía el equipo conectado a la red, porque el problema no es sólo de la compañía eléctrica sino que también el usuario tiene equipo que afecta esta calidad y que también puede dañar al equipo conectado cerca de ellos.

Este trabajo de tesis pretende ser un aporte importante en el estudio de la calidad de la energía al presentar aspectos fundamentales y básicos que ayuden a concientizar y ayudar a todos los que están involucrados en este problema. Se pretende que sea una base para estudios más profundos en temas específicos que quieran ser estudiados a detalle, además de concentrar en un

solo libro estos conceptos, ya que muchas veces esta información no está al alcance de cualquier persona, principalmente para los estudiantes de ingeniería.

Este trabajo está dividido en 5 capítulos presentados de la siguiente forma:

El capítulo 1 contiene conceptos fundamentales para comprender lo que es la calidad de la energía y todo lo que ello implica e involucra. Se menciona en este capítulo, entre otras cosas, el concepto de compatibilidad electromagnética que es muy importante para entender como puede llegar a influir algún equipo perturbador sobre otro cercano a el.

El capítulo 2 presenta fuentes que hasta ahora se han identificado y que producen disturbios que afectan la calidad de la energía, se identifican fuentes artificiales y fuentes naturales, se presentan desde el punto de vista del origen de los diversos disturbios que se producen.

El capítulo 3 presenta los efectos causados por deterioro de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y en equipo específico a causa de los disturbios originados en la red.

El capítulo 4 presenta soluciones que se pueden tomar para corregir o evitar cada tipo de disturbio producido en la red, se habla en forma general del equipo que puede ser utilizado y que está disponible. Estas soluciones se presentan desde el punto de vista de instituciones dedicadas a la investigación como lo son EPRI y la IEEE.

PAGINACION VARIA

COMPLETA LA INFORMACION

El capítulo 5 presenta conclusiones y recomendaciones sobre los problemas que se originan debido a un mala calidad de la energía, se habla de que no es sólo la compañía eléctrica la causante o responsable de los problemas de calidad de la energía sino que también el usuario es participe de esta responsabilidad.

Es importante destacar que se le da una especial importancia a la generación de armónicas, ya que es un tema que se ha estudiado desde hace tiempo y que tiene gran importancia debido a que es uno de los principales disturbios que afecta la calidad de la energía.



CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 INTRODUCCIÓN

En todo sistema eléctrico ocurren perturbaciones y problemas inesperados y en algunos casos inevitables por causa de fenómenos naturales como las descargas atmosféricas, el clima, vientos intensos, por factores humanos o por la operación de la misma red. Lo anterior provoca variaciones en la calidad de la energía eléctrica: interrupciones del servicio, depresiones o impulsos de voltaje, variaciones en la frecuencia y la generación de armónicas.

Esta situación afecta la continuidad de las actividades productivas, en particular de las industrias que emplean equipos electrónicos cada vez mas sensibles.

Hace algunos años cuando se iniciaba el crecimiento espectacular de los equipos electrónicos, el concepto de calidad del suministro eléctrico no tenía ninguna importancia. Estudios realizados consideran que hacia el año 2000 el 50% de las cargas conectadas a las líneas eléctricas serán electrónicas.

El reconocimiento por parte de las compañías eléctricas de los problemas de una mala calidad de la energía eléctrica a usuarios con cargas que involucran equipo sensible es relativamente nuevo. En Estados Unidos y Canadá las compañías eléctricas iniciaron en 1986 la conceptualización y evaluación del problema.

En forma general, los problemas asociados con la calidad de la energía eléctrica se han relacionado con las siguientes cuestiones: factores climatológicos (descargas atmosféricas y vientos), falla de equipo de la red, accidentes de tráfico o construcción y contacto por animales y por árboles. Sin embargo, a esta lista pueden agregarse otros factores, no menos importantes, tales como la conexión y desconexión de cargas de gran tamaño y la distorsión de la señal de alimentación producida por armónicas.

Debido a la naturaleza tan variada de los factores que influyen en la calidad de la energía eléctrica es difícil establecer un "patrón de disturbio" general.

1.2 GENERALIDADES

En México el suministro de energía eléctrica es el principal producto o bien que proporciona la CFE a usuarios. Las características de calidad de dicho producto son continuidad, variación de voltaje, variación de frecuencia, contenido de armónicas y capacidad para atender el crecimiento de la demanda. El área de distribución es el cliente interno de los sistemas de transmisión y generación, y se negocia con estas entidades de la CFE que en los puntos de entrega se reciba la energía con calidad en sus aspectos de continuidad, voltaje y frecuencia.

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:

- La microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas residenciales, comerciales e industriales que son muy sensibles a las variaciones de la calidad de la energía. Los esquemas de diseño de integración a gran escala (LSI)¹ y a muy gran escala (VLSI)² de los chips 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. Desafortunadamente estos niveles de tensión son más fáciles de perturbar.

¹ LSI - Large Scale Integer

² VLSI - Very Large Scale Integer

- 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 que 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 10-20% al 50-60% en el año 2010.

- 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 de calidad de la energía, ya que son como una "coladera" para corrientes de alta frecuencia y pueden mejorar la situación o agravarla significativamente, al incrementar los niveles de armónicas, dependiendo de los parámetros del sistema.

La proliferación de cargas y fuentes no lineales (electrónica de potencia) 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 sucia" 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.

1.3 DEFINICIONES

La definición de calidad de energía es un tanto vaga. Si un dispositivo es conectado a una fuente de energía eléctrica y este funciona como se espera, no existe problema de calidad de energía. Sin embargo, si el dispositivo no funciona como se desea debido a un problema relacionado con el suministro de energía eléctrica, existe entonces un problema de calidad de energía.

Calidad de energía quiere decir diferentes cosas para diferente gente. Para el usuario industrial, el aspecto mas importante es la continuidad de la energía. Para la compañía suministradora de servicio eléctrico, el aspecto importante es la integridad de la forma senoidal de la onda de voltaje.

La continuidad de la energía es dependiente de muchos aspectos de el diseño y operación del sistema. Algunos de los factores que afectan la continuidad de energía son: protección contra sobretensión, interrupción y recierre por falla, diseño de la línea de transmisión, y diseño y operación del sistema. Si un sistema de Transmisión o Distribución es diseñado apropiadamente para resistir relámpagos y otras sobretensiones, la continuidad de la energía y la fiabilidad del sistema se incrementa. Del mismo modo, con una apropiada protección contra fallas y una rápida coordinación de relevadores , el sistema es mas fiable.

No existe un consenso en la terminología que defina las alteraciones más comunes que afectan la calidad de la energía. A continuación se enlistan los términos más utilizados y aceptados en este campo, tanto por fabricantes como

usuarios de equipo de monitoreo de calidad de la energía.

- **Depresiones de voltaje ("voltage sags").** Es un término aceptado comúnmente y que significa una reducción breve en el voltaje nominal, con una duración que va desde 10ms (0.6 ciclos) hasta 2.5 seg (150 ciclos).
- **Impulso.** Pulso unidireccional con duración menor a dos milisegundos. La magnitud es el valor absoluto del pulso después de filtrar la componente fundamental.
- **Sobretensión.** Un aumento en el voltaje nominal mayor a 0.01 s (0.6 ciclos) y menor que 2.5 seg (150 ciclos).
- **Bajo voltaje.** Una reducción en el voltaje nominal por más de 2.5 seg.
- **Alto voltaje.** Un incremento en el voltaje nominal por más de 2.5 seg.
- **Distorsión armónica.** Significa sencillamente 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.
- **Variaciones de tensión.** Lentas y rápidas.

Estos conceptos se ampliarán un poco en el capítulo 2.

1.4 COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Dentro de ciertos límites, cualquier receptor conectado a una red de suministro eléctrico debe ser capaz de funcionar de forma correcta frente a las perturbaciones antes descritas, es decir, debe ser compatible con esta red. Aparece así el término de Compatibilidad Electromagnética (CEM).

Por ello los equipos eléctricos deben ser diseñados para mantener esta CEM con la red de suministro. Esto permite establecer normas que definan las características a medir y de funcionamiento, así como guías de utilización.

El análisis de las perturbaciones en un sistema de distribución de energía eléctrica puede realizarse a través de la CEM, estableciendo previamente las siguientes definiciones:

1.4.1 Compatibilidad Electromagnética (CEM)

Aptitud de un aparato, equipo o sistema, para funcionar de manera satisfactoria en su red de suministro, sin producir el mismo perturbaciones intolerables para cualquier otro receptor que se encuentre conectado a esta red.

Respecto a la misma deben considerarse tres elementos principales:

- La fuente de la perturbación (Emisor)
- La Vía de transmisión
- El receptor perturbado

Para asegurar la CEM es necesario actuar sobre los mismos, es decir:

En la fuente de perturbación:	Reducir la emisión
En la Vía de transmisión:	Atenuar la propagación
En el receptor perturbado:	Reforzar su inmunidad

1.4.2 Emisor

Dispositivo, equipo o sistema que puede generar eventualmente tensiones, corrientes o campos perturbadores.

1.4.3 Inmunidad (de un receptor)

Capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar correctamente sin alterar sensiblemente sus características en presencia de una perturbación electromagnética.

1.4.4 Nivel de compatibilidad electromagnética

Para cada tipo de perturbación, nivel especificado de la misma, para lo cual debe existir una probabilidad aceptable de compatibilidad electromagnética (CEM).

1.4.5 Nivel de emisión (de una fuente perturbadora)

El nivel de una determinada perturbación electromagnética emitida por un

dispositivo, equipo o sistema medido de acuerdo con unas especificaciones.

1.4.6 Límite de emisión (de una fuente perturbadora)

Es el nivel máximo de emisión admisible.

1.4.7 Nivel de inmunidad

El nivel máximo de una determinada perturbación electromagnética que incide de una forma especificada en un dispositivo, equipo o sistema, para el cual no se produce ninguna alteración sensible de sus características de funcionamiento.

1.4.8 Límite de Inmunidad

El valor mínimo especificado del nivel de inmunidad

1.4.9 Entorno electromagnético

Ámbito que se considera sensible a las perturbaciones electromagnéticas.

1.4.10 Clases de entornos electromagnéticos

Existe gran cantidad de tipos de entornos electromagnéticos, pero para evitar su proliferación, se proponen únicamente tres. Las clases que se consideran son:

1.4.10.1 Clase 1

Se aplica a alimentaciones protegidas y tiene niveles de compatibilidad inferiores a los de la red de distribución. Permite el empleo de equipos muy sensibles a las perturbaciones provenientes de las fuentes de alimentación, tales como equipos de laboratorio, equipos de automatización y protección, ordenadores, etc.. Esta clase requiere generalmente medidas de protección, instalación de sistemas ininterrumpibles de energía, filtros y/o descargadores de sobretensiones.

1.4.10.2 Clase 2

Se aplica al Punto Común de Conexión (PCC) y al Punto de Conexión Interno de la Planta, en ambientes industriales en general. Los niveles de compatibilidad de esta clase son idénticos a los correspondientes a las redes de distribución: esto permite el empleo en un ambiente industrial de componentes diseñados para funcionar en redes de distribución.

1.4.10.3 Clase 3

Se aplica exclusivamente en puntos de conexión internos de ámbitos industriales. Esta clase permite valores más elevados para algunos tipos de perturbaciones que la clase 2. Por lo tanto, esta clase se debería tener en cuenta cuando se dan algunas de las circunstancias siguientes :

- Una parte importante de la carga se alimenta a través de convertidores.

- Existen máquinas de soldadura eléctrica.
- Hay grandes motores con arranque frecuente.
- Hay cargas fluctuantes.
- Etc...

1.4.11 Relación entre niveles de emisión y de inmunidad

El nivel de emisión es siempre menor que su nivel máximo admisible, o sea, el límite de emisión y el nivel de inmunidad es siempre mayor que su nivel mínimo requerido, o sea, el límite de inmunidad.

El límite de inmunidad se toma por encima del límite de emisión, y el nivel de compatibilidad electromagnética (nivel de CEM) es un valor situado entre el nivel de emisión y el nivel de inmunidad requerido del dispositivo considerado. El nivel de inmunidad requerido se especifica mediante un nivel de ensayo (nivel de severidad de ensayo). El nivel de susceptibilidad de un dispositivo debe ser por lo menos igual o mayor que los niveles de inmunidad y/o ensayo.

Sin embargo, se han de tener en cuenta que generalmente el nivel de perturbación (emisión) responde a una distribución estadística. En la práctica es muy difícil, sino imposible, determinar el máximo nivel de perturbación, ya que este puede aparecer muy ocasionalmente. Por otra parte, puede resultar antieconómico definir el nivel de compatibilidad de acuerdo con este valor tan elevado, el cual, la mayoría de dispositivos no estarían expuestos casi nunca.

Por estos motivos, parece adecuado definir el *nivel de compatibilidad* no

como el "valor máximo" de una perturbación sino como el nivel de perturbación que se podría sobrepasar en un número pequeño o muy pequeño de ocasiones. La especificación de este valor debería correr a cargo del organismo competente o por acuerdo entre las partes involucradas.

Se debe observar que el nivel de susceptibilidad puede responder a una distribución de tipo estadístico. En la práctica se puede definir un límite mínimo de susceptibilidad mediante un ensayo de nivel de inmunidad, funciona/no funciona.

1.5 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

La dependencia cada vez mayor de todas las actividades humanas del suministro de energía eléctrica ha traído como consecuencia que la continuidad y calidad del servicio sea más exigido a las empresas eléctricas por los usuarios en todos los niveles de tensión ofrecidos; sin embargo, sólo hasta décadas recientes el modelado y evaluación de la confiabilidad en los sistemas de distribución ha recibido el mismo interés que se le ha dado en los sistemas de potencia. La razón principal de esta situación radica en que tanto las centrales eléctricas como las líneas de transmisión representan cantidades mucho mayores en cuanto a inversión inicial, que las de un sistema de distribución, y una falla en ellas significa en muchas ocasiones situaciones catastróficas debido a la energía tan grande que generan y transportan. En consecuencia, se había resaltado en gran medida el asegurar la confiabilidad de esta parte de los sistemas eléctricos.

Un sistema de distribución es relativamente barato y sus interrupciones tienen un efecto muy localizado; es por esto que hasta ahora se han dedicado menos esfuerzos en la estimación cuantitativa de la confiabilidad de las estructuras y equipos empleados en su construcción. Sin embargo, un análisis de las estadísticas de falla demuestra que el sistema de distribución tiene la mayor contribución individual en la indisponibilidad del suministro a los usuarios. En la tabla 1.1 se muestra el tiempo de interrupción por usuario (TIU) de un sistema eléctrico nacional en un lapso de un año.

<i>Sistema de distribución</i>	<i>Sistema de generación y transmisión</i>	<i>Total del sistema</i>
34.81 h 87.52 %	4.96 h 12.48 %	39.77 h 100 %

Tabla 1.1 Análisis de fallas

La verificación continua de la calidad de suministro de energía eléctrica se basa en la comparación de los valores previamente fijados por las compañías de distribución de energía eléctrica y los que se presentan en la operación real de los sistemas a través del tiempo; estas metas son conocidas como *metas de calidad*.

Cabe señalar que las metas de calidad deben ser fijadas en función de las necesidades de suministro de los consumidores, tomando en cuenta siempre las inversiones necesarias que deberán erogarse en el equipo y su mantenimiento. La consideración de estas metas debe ser establecida a través de índices numéricos conocidos como *Índices de confiabilidad*. A continuación se resumen los más usuales.

1.5.1 Tiempo de interrupción por usuario (TIU)

Este índice está definido como:

$$TIU = \frac{\sum_{i=1}^T \sum_{l=1}^{M_i} D_{il} UA_{il}}{\sum_{i=1}^T NUI} \quad (1)$$

en donde:

- D_{il} = Duración de la interrupción (1) en minutos ocurrida durante el mes (i) en un circuito de distribución de la zona que se trata.
- UA_{il} = Usuarios afectados por la interrupción (1) ocurrida durante el mes (i) en un circuito de distribución de la zona que se trata.
- NUI = Número total de consumidores del sistema o alimentador.
- i = Mes de que se trata, variando desde 1 hasta T , en donde 1 corresponde al mes del inicio del período y T al término.
- 1 = Número ordinal en que aconteció la interrupción (1) durante el mes (i), variando desde 1 hasta M_i , en donde M_i es la última interrupción ocurrida durante el mes (i).

En la figura 1.1 se muestra el tiempo de interrupción por usuario (TIU) de un sistema de distribución real de una empresa eléctrica durante los años de 1987 y 1988.

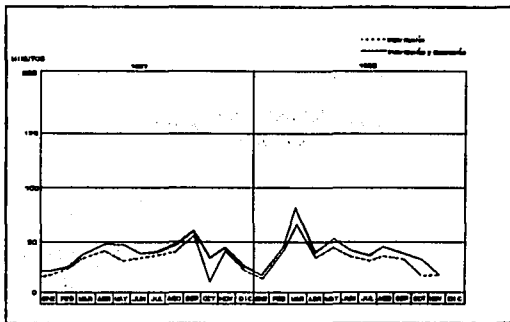


Figura 1.1 Tiempo de Interrupción por usuario (TIU)

1.5.2 Interrupciones por cada 100 km de línea (FIL)

Este índice está definido como:

$$FIL = \frac{IS}{LP} \times 100 \quad (2)$$

en donde:

IS = Total de interrupciones sostenidas y no continuas, ocurridas durante el período especificado, en los circuitos de distribución de la zona que se trata.

LP = Longitud total en km de líneas primarias en operación, al último día del mes (*i*), de la zona que se trata

1.5.3 Porcentaje de índice de disponibilidad (PID)

Este índice está definido como:

$$PID = \frac{MM\ NU - MU}{MM\ NU} \times 100 \quad (3)$$

en donde:

MU = Total de minutos usuario no disponibles debido a las interrupciones ocurridas durante el período especificado.

MM NU = Total de minutos usuario demandados durante el período especificado, en los circuitos de distribución de la zona que se trata.

1.5.4 Interrupciones por cada 1000 usuarios (FIU)

Este índice está definido como:

$$FIU = \frac{IS}{NU} \times 1000 \quad (4)$$

en donde:

IS = Total de interrupciones sostenidas y no continuadas, ocurridas durante el período especificado, en los circuitos de distribución de la zona que se trata.

NU = Total del número de usuarios al día último de los meses del

período especificado de las zonas de que se trata.

1.5.5 Interrupciones por circuito (FIC)

Este índice está definido como:

$$FIC = \frac{IS}{NC} \quad (5)$$

en donde:

IS = Total de interrupciones sostenidas y no continuadas, ocurridas durante el período especificado, en los circuitos de distribución de la zona de que se trata.

NC = Total del número de circuitos en operación durante los meses del período especificado de la zona que se trata.

1.5.6 Tiempo de interrupción promedio por disturbio (TIPDI)

Este índice está definido de la siguiente manera:

$$TIPDI = \frac{\sum_{i=1}^n DII}{\sum_{i=1}^n NDI} \quad (6)$$

en donde:

DII = Duración en minutos de la interrupción (1) ocurrida en un

círculo de distribución de la zona que se trata.

NDi = Número de disturbios durante el mes en el sector considerado.

1.5.7 Frecuencia equivalente de interrupción por consumidor

$$FEC = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j n_j C_{aj}}{C_s} \quad (7)$$

en donde:

- C_s = Número total de consumidores del sistema (equivalente a NUi).
- λ_j = Tasa de falla de la componente j , en fallas/unidad/año o fallas/km/año.
- n_j = Número de componentes j existentes en el sistema, en unidades o km en caso de alimentadores.
- C_{aj} = Número de consumidores afectados en la interrupción por una falla en la componente j (equivalente a UAi).
- m = Número de diferentes tipos de componentes.

1.5.8 Duración equivalente de la interrupción por consumidor en horas

Esta expresión es similar a la del TIU ; sin embargo, en este caso estará expresada en función del tiempo medio de reparación r de la componente y de su tasa de falla λ característica, quedando la expresión como sigue:

$$DEC = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j r_j C_{aj}}{C_s} \quad (8)$$

en donde:

r_j = Tiempo medio de restablecimiento de la componente j , en horas.

Período: 1° al 31 de mayo de 1988 Tensión: 23 KV			
Índice	Líneas aéreas		
	Norte	Sur	Oriente
TIU (Tiempo en minutos)	13.30	48.80	18.40
FIL (I.M./100 km.)	2.73	5.19	2.84
PID (%)	99.97	99.99	99.95
FIU (I.M./1000 usuarios)	0.08	0.16	0.05
FIC (I.M./circuitos)	0.40	1.00	0.67
TIPDI (Min. I.M./interrupción.)	28.24	48.00	27.75
I.M.	21	53	32
Interrupciones instantáneas	83	94	128
Alimentador en servicio	53	53	48
Tiempo de interrupción (Min.)	593	2544	888
km de circuito	769.4	1021	1128
No. de usuarios	267 384	324 887	590 231
I.M. = Interrupciones mayores: > de 5 minutos			

Tabla 1.2 Índices de confiabilidad.

En la tabla 1.2 se muestra un ejemplo de algunos de estos índices de un sistema real de distribución aérea³.

1.6 CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de cualquier empresa de manufactura o servicios, tal como los de una compañía suministradora de energía eléctrica, debe ser una de sus principales preocupaciones y objetivos; por tanto, ésta debe fijar sus niveles de confiabilidad relacionándolos con los usuarios que debe atender. Aunque existe un departamento o gerencia directamente responsable de la calidad de los equipos y materiales que entran a la empresa y finalmente se instalarán en los circuitos de distribución, la calidad del servicio debe ser entendida como la responsabilidad de todos los miembros de la organización, desde el director general hasta los obreros o trabajadores que mantienen el sistema. Un control total de la calidad de un producto o servicio será únicamente posible hasta que exista una mentalidad de calidad y por ende de la responsabilidad que ésta representa en todos los escalones o niveles de jerarquía de los miembros de la organización. Todo esto llevará una producción de bienes o servicios a niveles más económicos, proporcionando con ello la completa satisfacción de los usuarios.

A medida que la industria en general se ha tornado más compleja, el control de calidad de los servicios o bienes se ha vuelto prioritario, y, siendo la industria eléctrica tan importante para el desarrollo y sostenimiento de toda actividad humana, no puede ser la excepción a estos conceptos. En la figura 1.2

³Roberto Espinoza y Lara. Sistemas de Distribución, pág. 336, 1990.

se observa que el hombre al inicio de su desarrollo moderno era tanto productor como consumidor; luego, el hombre producía y vendía sus productos a terceros, como se muestra en la figura 1.3. Sin embargo, la necesidad de un intermediario se hizo indispensable a medida que las necesidades y empresas se expandieron (figura 1.4), requiriéndose con ello una reorganización total, ya que un solo hombre o grupo no es capaz de controlar la calidad de los servicios ofrecidos. Por tanto, las empresas eléctricas han formado ingenieros de diseño, creado laboratorios de prueba y grupos de expertos para controlar la calidad tanto de los equipos que se instalan en los circuitos como el servicio de energía eléctrica que se ofrecen a los usuarios.

El problema de la calidad de energía ofrecido por las empresas eléctricas puede ser resumido como sigue:

- Estudio del mercado.
- Ingeniería de proyecto o diseño de los sistemas y protección.
- Compras.
- Instalación.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento correctivo.
- Operación.

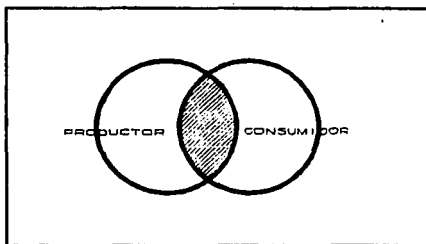


Figura 1.2 El hombre primitivo era tanto el productor como el consumidor.

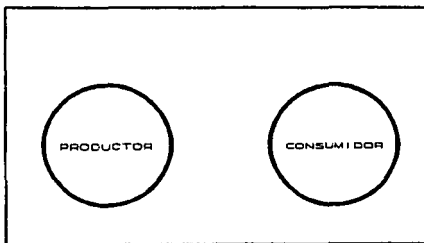


Figura 1.3 El productor y el consumidor se separan con los posteriores desarrollos.

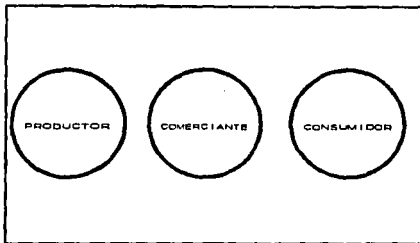


Figura 1.4 Con la revolución industrial surgió la necesidad del intermediario o comerciante.

1.6.1 Estudio de mercado

Es indispensable que los niveles de continuidad se establezcan de acuerdo con las necesidades de los consumidores, por lo que es necesario aplicar correctamente todos los conceptos referentes a esto.

1.6.2 Ingeniería de proyecto

A este respecto, el diseño de una estructura adecuada y su protección son indispensables para ofrecer un servicio de energía eléctrica conforme a las necesidades de los consumidores.

Asimismo, dentro de la ingeniería del proyecto deben considerarse como indispensables la creación y establecimiento de las especificaciones adecuadas de todo el equipo que se instale en los circuitos de distribución e instructivos de

operación adecuados a los equipos y estructuras diseñadas.

1.6.3 Compras

Como en cualquier empresa, la calidad del servicio ofrecido dependerá también de la selección cuidadosa de los proveedores de material y equipo, debiéndose complementar esta medida con un control adecuado de los bienes recibidos.

1.6.4 Instalación

La construcción adecuada de los circuitos y equipos jugará, por supuesto, un papel fundamental en el control de calidad del servicio ofrecido a los usuarios.

1.6.5 Operación

La operación correcta de los equipos y circuitos de acuerdo con las especificaciones y manuales de operación será garantía que la calidad del servicio de energía se mantenga dentro de los niveles de continuidad establecidos.

1.6.6 Mantenimiento preventivo

Todos los trabajos y programas de mantenimiento preventivo serán indispensables para conservar y operar el sistema en forma adecuada y, por

ende, respetar los niveles de continuidad establecidos.

1.6.7 Mantenimiento correctivo

Como se mencionó anteriormente, el sistema de distribución se encuentra sujeto por su naturaleza a muchas causas de falla; sin embargo, una rápida y adecuada atención y reparación cuando esto suceda redundará en la calidad del servicio.

La calidad en el suministro de energía ofrecido por una empresa no podrá mantenerse dentro de los límites ofrecidos sin considerar estas siete variables o funciones en conjunto, es decir, como componentes de un sistema global y no individualmente, debiendo tener en cuenta siempre que la calidad deberá comprender desde el proyecto hasta el servicio y atención prestados a los usuarios.

1.7 DEFINICIÓN DE GRADOS DE CONTINUIDAD DE ACUERDO CON EL TIPO DE CONSUMIDORES ATENDIDOS

No es difícil aceptar el principio de que el grado de continuidad de suministro debe ser función del tipo, importancia y características específicas de la carga servida. De acuerdo con esta premisa, los niveles de continuidad deberán ser establecidos de acuerdo a estos tres factores, independientemente de su localización; sin embargo, la consideración de otros factores importantes, tales como aspectos económicos, características propias de los sistemas de distribución, localización de cargas con características totalmente diferentes en la misma zona, etc., obligan en la mayoría de los casos a establecer los grados

de continuidad en función de la zona típica del mercado. Entonces, para poder definir o fijar los grados de continuidad requeridos en términos globales y que puedan ser comparados con los índices obtenidos en diversos sistemas de distribución, es necesario establecerlos por bloques de consumidores que representen las diversas zonas atendidas. La adopción de estos índices de referencia permiten el análisis crítico comparativo entre la situación real de operación de un sistema de distribución y sus índices establecidos, o bien con, los de otros sistemas similares.

Existen varios criterios para el establecimiento de estos grados de continuidad, mismos que dependerán de las políticas de diseño, servicio y operación de cada empresa. A continuación, y a manera de ejemplo, se presenta uno de estos criterios, normalizado ya por grandes empresas de distribución de Latinoamérica. Los grados de continuidad se establecieron dentro de una escala de 1 a 4, siendo el valor más bajo o deficiente el grado 4, límite inferior mínimo que para este caso debe cumplirse.

En la clasificación que a continuación se presenta las zonas fueron divididas en seis tipos diferentes. Los parámetros utilizados para la clasificación reflejan más la energía requerida o suministrada en esta zona que la confiabilidad requerida; sin embargo, esto es justificable, dada la correlación que existe entre las grandes concentraciones de carga y sus necesidades de alto grado de continuidad.

Zona tipo A

Son zonas que se caracterizan básicamente por tener un mínimo de consumidores mayor a 50 000, o consumo de carga industrial superior a los 100 000 MWh/año; otras características típicas encontradas en estas zonas son:

- Alta densidad demográfica mayor ó igual que 2000 hab/km².
- Área urbana mayor a los 100 km².
- Crecimiento vertical acentuado.
- Densidades de carga mayor a 1.5 MVA/km².
- Grandes centros comerciales o industrias importantes.

Los sistemas eléctricos de alimentación presentan normalmente las siguientes características:

- Alimentación a las redes de distribución desde tres o más subestaciones de potencia localizadas en la misma zona.
- Alimentación de estas subestaciones desde líneas de transmisión o cables de potencia (85 ó 230 kV) interconectados y que permiten soportar una o más contingencias.

Zona tipo B

Estas zonas se caracterizan por tener un número de consumidores entre 15 000 y 50 000, o un consumo de carga industrial entre 25 000 MWh/año y

100 000 MWh/año.

Otras cargas encontradas en estas zonas son:

- **Densidad demográfica entre 1500 a 2000 hab/km².**
- **Area urbana entre 40 a 100 km².**
- **Inicio de crecimiento vertical, es decir, edificios de más de cinco niveles.**
- **Construcción de algunos centros comerciales o industriales.**

Los sistemas eléctricos de alimentación presentan normalmente las siguientes características:

- **Alimentación a la red de distribución por dos o más subestaciones localizadas en la misma zona.**
- **Suministro a estas subestaciones por líneas o cables de potencia interconectados y con posibilidad de admitir una contingencia.**

Zona tipo C

Son zonas que se caracterizan por tener un número de consumidores entre 15 000 y 50 000, o un consumo de carga industrial entre 10 000 a 25 000 MWh/año.

Otras características típicas son:

- **Baja densidad demográfica (de 1 000 a 1 500 hab/km²).**

- **Area urbana entre 10 y 40 km².**

Los sistemas eléctricos presentan las siguientes características:

- **Alimentación desde una subestación de potencia localizada en la misma zona de carga.**
- **Alimentación a las subestaciones sin recursos para soportar contingencias.**

Zona tipo D

Estas se caracterizan por tener entre 1 000 y 5 000 consumidores industriales, o un consumo industrial entre 2 500 a 10 000 MWh/año.

Otras características típicas son:

- **Baja densidad demográfica (entre 1 000 a 1 500 hab./km²).**
- **Area urbana entre 3 a 10 km².**

Los sistemas eléctricos presentan las siguientes características:

- **Alimentación desde subestaciones de potencia no siempre localizadas en la misma zona de carga.**
- **Alimentación a estas subestaciones sin recursos para absorber contingencias.**

Zona tipo E

Son zonas que se caracterizan básicamente por tener un número de consumidores comprendidos entre 200 y 1 000, y además:

- Baja densidad urbana (entre 500 a 1 000 hab./km²).
- Area urbana entre 1 a 3 km².

Las características de alimentación son:

- Suministro a través de subestaciones no localizadas en la misma zona de carga a distancias a veces mayores de 10 km, sin recursos para absorber contingencias.

Zona tipo F

Zonas rurales que se caracterizan por tener menos de 200 consumidores. Baja densidad demográfica (menor a 500 hab./km²) y área urbana desarrollada inferior a 1 km².

La alimentación se efectúa por una sola subestación alejada de la zona de carga de hasta 20 km, sin posibilidad de soportar contingencias. En la tabla 1.3 se muestra un resumen de la clasificación de zonas.

Tipo	Características básicas ¹		Características urbanas ²					Bases eléctricas ³	
	Número de consumidores	Consumo Industrial MW/año	Densidad demográfica	Área urbana	Crecimiento vertical	Densidad MVA/km ²	Otras características	Subestaciones	Transmisión
A	> 50 000	> 100 000	> 2 000	> 100	Acentuado	> 1.5	Existencia de centros comerciales y/o industriales	≥ 3	Acepta contingencias
B	15 000-50 000	25 000-100 000	1 500-2 000	40-100	Servicio	-	Inicio de centros comerciales y/o industriales	≥ 2	Acepta contingencias
C	5 000-15 000	10 000-25 000	1 000-1 500	10-40	-	-	-	≥ 1	No acepta contingencias
D	1 000-5 000	2 500-10 000	1 000-1 500	3-10	-	-	-	No siempre existe en la zona de carga	No acepta contingencias
E	200-1 000	< 2 500	500-1 000	1-3	-	-	-	Normalmente no existe en la zona de carga	No acepta contingencias
F	< 200	< 2 500	< 500	< 1	-	-	-	Normalmente no existe en la zona de carga	No acepta contingencias

Notas:
¹Para poder clasificar una zona, basta cumplir con una condición.
²Características normalmente aceptadas.
³Características propias de los sistemas eléctricos estructurados usualmente.

Tabla 1.3 Clasificación de zonas.

Los grados de continuidad son fijados para cada zona y sirven como referencia en el proceso de planeación y diseño de las redes.

1.7.2 Grado 1

Es un valor que se considera ideal y una vez alcanzado requiere mínimas mejoras o instalación de equipo en la red.

1.7.2 Grado 2

Significa que el sistema, a pesar de tener un buen desempeño, admite mejoras o instalación de equipo que permita mayor flexibilidad en la operación y, por ende, menor número de consumidores afectados y menor tiempo de reparación.

1.7.3 Grado 3

Este se define como el número requerido para suministrar un servicio aceptable; un sistema de distribución con estas características admite mejoras sustanciales y su objetivo será siempre llegar al grado superior.

1.7.4 Grado 4

Este define una condición de suministro indeseable y significa que el sistema requiere mejoras sustanciales en su diseño, operación y mantenimiento. En la tabla 1.4 se resumen estos grados de continuidad y zonas donde aplican.

Tipo de zona	VALORES DE GRADOS ANUALES							
	1		2		3		4	
	TRU hora	FEC	TRU hora	FEC	TRU hora	FEC	TRU hora	FEC
A Centros comerciales, industriales y residenciales concentrados	≤ 1	≤ 2	> 1-6	> 2-10	- 15" > 6-20"	- 20" > 10-25"	> 15" > 20"	> 20" > 25"
A Parte restante	≤ 5	≤ 10	> 1-10	> 20-10	> 10-30	> 20-45	> 30	> 45
B (15 000 a 50 000)	≤ 10	≤ 20	≤ 10-20	> 20-36	> 20-40	> 36-50	> 40	> 50
C (5 000 a 15 000)	≤ 15	≤ 20	> 15-25	> 20-36	> 25-50	> 35-60	> 50	> 60
D (1 000 a 5 000)	≤ 36	≤ 30	> 35-50	> 30-46	> 50-70	> 45-70	> 70	> 70
E (200 a 1 000)	≤ 45	≤ 30	> 45-65	> 30-45	> 65-120	> 45-80	> 120	> 80
F Menos de 200 consumidores rurales	≤ 80	≤ 40	> 80-80	> 40-80	> 80-120	> 60-80	> 120	> 80

*Para zonas en red extendida subterránea.
 *Para zonas en red extendida subterránea.

Tabla 1.4 Grados de continuidad anuales en sistemas de distribución.

<i>Consumidor</i>	<i>Duración anual de interrupción horas</i>	<i>Frecuencia anual de interrupción</i>
Suministro de energía por una red subterránea	30	35
Suministro en tensiones de transmisión o subtransmisión ($V > 69 \text{ kV}$)	30	40
Suministro en tensiones de transmisión o subtransmisión ($V < 69 \text{ kV}$) o tensión primaria de distribución con consumos mayores a los de una zona rural	90	70
Suministro en tensiones secundarias de distribución en zonas de más de 1 000 consumidores con consumos de energía mayores a los de una zona rural	100	80
Localizado en zona rural, atendido por líneas aéreas pertenecientes a un conjunto de consumidores menor a 1 000	150	120
<small>Nota: Se consideran únicamente interrupciones de más de tres minutos.</small>		

Tabla 1.5 Límites máximos de duración y frecuencia para consumidores individuales.

Como ya se mencionó, los grados de continuidad son aplicados a un conjunto de consumidores; sin embargo, es de utilidad establecer parámetros mínimos que deben observarse a nivel del consumidor individual. En la tabla 1.5 se resumen estos índices, que pueden servir de referencia para tal efecto.

1.8 CLASIFICACIÓN DE PRIORIDADES

Todos los procesos de producción o actividades de los consumidores son dependientes en mayor o menor grado de la continuidad del suministro de energía. En consecuencia, los niveles de referencia definidos en función de las

zonas atendidas, como se mencionó anteriormente, no siempre satisfacen los requisitos de continuidad necesarios para consumidores con procesos de producción o actividades especiales, por lo que los índices de confiabilidad no siempre reflejan el comportamiento del sistema a nivel de consumidor individual; por lo tanto, en ocasiones es necesario calcular la duración total y frecuencia de interrupciones a consumidores especiales. Bajo estas observaciones, las empresas eléctricas proyectan sus redes de tal manera que se puedan atender por escala de prioridades en situaciones de emergencia a algunos de estos consumidores. A continuación se resume, a manera de ejemplo, una posible clasificación de prioridades:

1.8.1 Consumidores con prioridad A

Son aquellos para los cuales cualquier interrupción no programada, aunque ésta sea instantánea, le ocasiona:

- Paralización total de sus actividades principales o de su proceso de producción, que ocasiona pérdidas de su producto; por tanto en cualquiera de estos casos representará perjuicios sociales para la comunidad o daños financieros para las empresas.
- Riesgos serios contra la vida humana.
- Dificultad en el retorno a las actividades normales del consumidor una vez que se reestablezca la energía.

Como ejemplo se pueden citar: fábricas de cables, de papel, leche en polvo o café, industrias del vidrio, centros de procesamiento de datos, industrias

textiles, emisoras de radio y televisión, hospitales y sistemas eléctricos de transporte colectivo (Metro).

1.8.2 Consumidores con prioridad B

Son todos aquellos para los cuales las interrupciones no programadas ocasionan:

- Paralización de sus actividades principales, o en su proceso de producción, pérdidas del producto, en cualquiera de estos casos con pérdidas financieras importantes. *Ejemplo:* industrias con altos hornos, bancos, estaciones de bombeo y órganos gubernamentales.

Para este tipo de consumidores las interrupciones programadas deben ser la mínimas posibles.

1.8.3 Consumidores con prioridad C

Son aquellos para los cuales una interrupción instantánea no les afecta; sin embargo, la falta de energía prolongada sí representa daños serios en sus procesos de producción o actividades principales. En estos casos se encuentran: instituciones gubernamentales no encuadradas en el tipo B, centros comerciales importantes, hoteles, cines y teatros, etc.

1.8.4 Consumidores con prioridad D

Son todos los consumidores no considerados en las clasificaciones anteriores; generalmente serán consumidores domésticos o pequeños comercios.

La aplicación de técnicas estadísticas en la evaluación de la operación de los equipos eléctricos juega un papel muy importante para obtener conclusiones sobre su comportamiento, una vez instalados en las redes de distribución; analizando estos factores es posible establecer la vida útil de cada uno de ellos, y por tanto aplicar programas de mantenimiento preventivo que ayuden a mejorar la calidad del servicio ofrecido a los usuarios.

El control de calidad de los equipos reviste importancia fundamental en la garantía de continuidad o confiabilidad de los sistemas. Por tanto, es necesario mantener un control rígido y sistemático en las inspecciones y recepción de los mismos.

La calidad en la ejecución de un buen diseño y correcta especificación de los equipos que se utilizarán dependerá de la observancia estricta de las normas aplicadas, y, en consecuencia, la confiabilidad del sistema será directamente proporcional a la calidad de los equipos y materiales y a su adecuada instalación y mantenimiento. Por esto, el control en su recuperación y la evaluación a su desempeño durante la operación son de suma importancia.

El conocimiento de las características de los equipos es fundamental para

realizar una adecuada:

- Inspección en la recepción.
- Prueba de calidad.
- Instalación y operación normal y en emergencia.
- Seguimiento de su comportamiento en el sistema.

1.9 CARGAS SENSITIVAS

Los usuarios están cada vez más conscientes de los problemas con energía eléctrica. Minicomputadoras, cajas registradoras electrónicas y terminales de datos, por nombrar unos cuantos, frecuentemente sucumben a su propia complejidad; la energía eléctrica puede interrumpir tales sistemas de circuitos y causar pérdida de memoria, mal funcionamiento del sistema y, aún peor, fallar el componente.

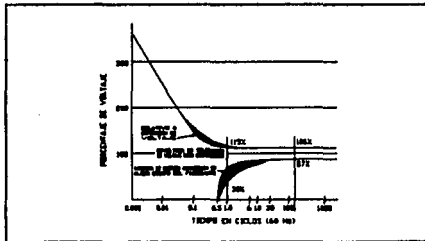


Figura 1.5 Tolerancia de voltaje típica para computadores.

La figura 1.5 ilustra los límites de tolerancia típicos de una computadora para varios disturbios de energía eléctrica.

El voltaje envuelto entre las dos curvas representa los límites en los cuales una computadora típica puede resistir estos disturbios sin funcionar mal o dañarse. El área sombreada muestra los rangos en los cuales varias computadoras llegan a ser susceptibles a problemas de voltaje degradado. En adición al voltaje, tales cargas sensitivas típicamente requieren que la frecuencia este dentro de ± 0.5 Hz, la velocidad de cambio de frecuencia menor que 1 Hz/seg, distorsión de forma de onda de voltaje abajo de 5% y voltaje desbalanceado menor que 3%. Para aplicaciones específicas, los requerimientos de calidad de energía deben ser obtenidos del fabricante del equipo sensitivo.

1.10 CONSIDERACIONES DE VOLTAJE DE ESTADO ESTABLE

Casi todo equipo conectado a un sistema de una compañía eléctrica esta diseñado para ser usado dentro de un cierto rango de voltaje. A causa de la perdida de voltaje que existe en cada parte del sistema de potencia, el cliente eléctricamente más lejano de la subestación recibe el mas bajo voltaje (figura 1.6).

Ya que todos los clientes tienen similares dispositivos de utilización, es necesario proporcionar a todos ellos casi los mismos voltajes de utilización. Un compromiso es necesario, de cualquier modo, entre que rango de voltaje la empresa lo suministrará y dentro de que rango de voltaje el equipo operará satisfactoriamente. Si los límites de voltaje proporcionados por la compañía

eléctrica son también amplios, el costo de utilización de equipo, especialmente computadoras, será alto porque ellos tendrán que ser diseñados para operar satisfactoriamente dentro de los límites establecidos. Por el otro lado, si los límites de voltaje requeridos para operación satisfactoria del equipo de utilización son también limitados, entonces el costo de proporcionar la energía, sin excederse estos límites de voltaje será también alto.

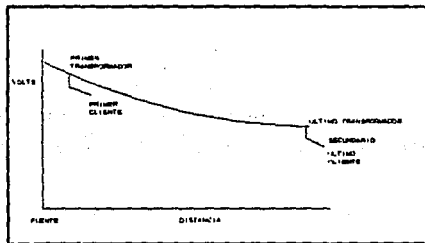


Figura 1.6 Perfil típico de alimentador de voltaje.

Á través de los años, las compañías prestadoras de servicio eléctrico y los fabricantes de equipo han cooperado en establecer estándares para operación satisfactoria sin demandas excesivas sobre el diseño del sistema de energía o la utilización de equipo. El Instituto Nacional Americano de Normas o Estándares (ANSI), a través de esfuerzos conjuntos con prestadores de servicio y fabricantes ha establecido el estándar C84.1 "Clasificación de voltaje para sistemas y equipo de energía eléctrica". Estas recomendaciones son seguidas por ambos.

La figura 1.7 ilustra el estándar de voltajes para servicio (medición) y utilización (carga) de ANSI C84.1. La empresa debe encontrar los requerimientos de servicio; la utilización de voltaje del cliente está basada sobre la reunión de los requerimientos de servicio de la compañía eléctrica y uno permitido por una cierta cantidad de caída de voltaje del cableado del cliente. Los valores del rango A están definidos como la amplitud sobre la cual los sistemas serán diseñados y operados tal que la mayoría de los voltajes de servicio estén dentro de estos límites. Las variaciones de voltaje fuera de estos límites no deben ser frecuentes. Los niveles de voltaje del rango B son permisibles con tal que ellos no ocurran frecuentemente y sean de duración limitada (110-127 v). Cuando ello ocurre, las medidas correctivas tienen que ser puestas en marcha dentro de una razonable cantidad de tiempo para proporcionar voltaje dentro de los límites del rango A.

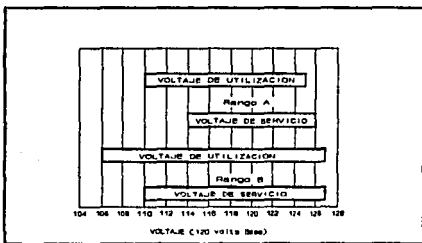


Figura 1.7 Rangos de voltaje según ANSI C84.1

La mayoría de los problemas de voltaje asociados con computadoras y otro equipo sensible, sin embargo, no están relacionados simplemente a alto o

bajo voltaje, sino, a varias momentáneas sobretensiones caídas o interrupciones de voltaje o rápidos cambios en el voltaje (oscilaciones de voltaje). La incompatibilidad de gran parte de equipo nuevo del usuario con las sobretensiones y funciones de recierre presente sobre sistemas de distribución típicos es un serio asunto en el presente.

2

FUENTES QUE DETERIORAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

2.1 INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica, como se sabe, se efectúa mediante un sistema monofásico ó trifásico caracterizado por los siguientes parámetros :

- Frecuencia.
-

- Amplitud.
- Forma de la onda.
- Simetría (En el caso de sistema trifásico).

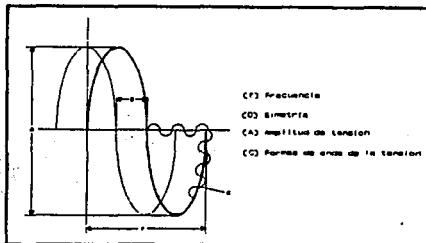


Figura 2.1 Parámetros que caracterizan una onda senoidal.

Cuando esta energía es transportada, transformada, distribuida y consumida, pueden aparecer perturbaciones que afectan la calidad de esta energía eléctrica. Y a causa de esto provocar un mal funcionamiento en los aparatos que reciben esta energía.

Se dice que un sistema de energía eléctrica ha sufrido una perturbación cuando se produce una alteración transitoria o permanente de cualquiera de los parámetros anteriores.

Las fuentes de problemas de calidad de energía caen dentro de dos categorías: cargas actuales, equipo y componentes; y subsistemas de los

sistemas de distribución y transmisión. En la primera categoría uno encuentra al convertidor, cargas moduladas por pulsos, controladores de maquinas, lámparas de descarga fluorescente u otro gas, ciertas cargas rotatorias, ciertos componentes que emplean circuitos magnéticos, fuentes relacionadas geomagnéticamente y los hornos de arco han recibido considerable atención a causa de los efectos que producen. En la segunda categoría se encuentran sistemas de aterrizamiento y problemas de resonancia.

Las instalaciones industriales comprenden diferentes sistemas que pueden ser muy importantes para los fenómenos influenciadores. La experiencia ha mostrado que con la complejidad actual de las instalaciones, solo un procedimiento sistemático permite mantener los gastos a un nivel bajo.

El conjunto de las fuentes influenciadoras determina el entorno electromagnético de la instalación industrial. En este contexto la estructura de los edificios, el tipo de la instalación, así como el lugar y el genero de las fuentes de influenciación que se encuentran en el interior y en el exterior de la instalación juegan un papel importante.

Los valores electromagnéticos del entorno pueden expresarse en forma de dimensiones ligadas con los conductores (corriente, tensión) y/o en forma de valores CEM ligados con los campos (densidad del flujo magnético, intensidad de los campos magnéticos o eléctricos).

2.2 FUENTES DE INFLUENCIACIÓN NATURALES

Los fenómenos atmosféricos, como es el caso de las tempestades y de las descargas electrostáticas se designan por el término de fuentes de influenciación naturales.

Un impacto directo de rayo puede propagarse por estructuras conductoras y manifestarse en forma de corrientes transitorias en los interfases de los aparatos. Estas corrientes se debilitan y se vuelven más planas en función de la distancia desde el punto de impacto.

2.3 FUENTES DE INFLUENCIACIÓN ARTIFICIALES

Por el término de fuentes de influenciación artificiales, se designan los fenómenos que se producen en explotación o de manera imprevista en los equipos de producción, de distribución y de utilización de la energía como es el caso de:

- Procesos de conexión y desconexión.
- Radiación de circuitos y de líneas respectivamente.
- Armónicas de baja frecuencia en la red.
- Asimetría de la red.
- Señales cadenciadas.
- Cambios de potencial.

Los procesos de conmutación (conexión de cargas inductivas y

desconexión de cargas capacitivas) pueden producir tensiones transitorias de 1-4 kV en líneas de baja tensión. Estas tensiones se presentan generalmente en forma de una oscilación amortiguada.

Las instalaciones y las estructuras que conducen corrientes eléctricas pueden, en ciertas circunstancias, producir campos transitorios.

En instalaciones industriales se pueden presentar individualmente perturbaciones electromagnéticas, pero es perfectamente posible que en cierto lugar sean activas varias perturbaciones simultáneamente. Estas perturbaciones se propagan por:

- Conductores como líneas, así como cables telefónicos y de alimentación eléctrica.
- Aberturas y pasamuros de edificios.
- Estructuras conductoras pasivas, como estructuras de construcciones, tuberías de gas de agua e instalaciones de puesta a la tierra.

Según su sensibilidad, se puede perturbar el funcionamiento de algunos sistemas, como es el caso de:

- Instalaciones de informática, como computadoras personales y sus aparatos periféricos.
 - Equipos electrónicos, por ejemplo, aparatos de alimentación de energía, así como sistemas de protección, de regulación y de
-

mando.

En cierta medida, cada utilización de aparatos o de instalaciones eléctricas o electrónicas influye su entorno. Esta influencia puede ser deseada y justifica la utilización de aparatos o de instalaciones. Inevitablemente, también se presentan ciertas influencias involuntarias. Normalmente, ellas se sustraen de nuestra percepción, dado que permanecen repercusiones negativas sobre nuestra instalación o instalaciones externas, o también sobre el hombre, los animales y las plantas.

En este estado que percibimos como normal, la compatibilidad electromagnética (CEM) reina en el entorno considerado. La influencia sólo representa una perturbación cuando, por su naturaleza y su intensidad, se manifieste por efectos negativos en uno o varios objetos considerados.

Las alteraciones de los parámetros de la onda senoidal antes mencionados, permite establecer la siguiente clasificación de los tipos de perturbaciones que pueden producirse:

Parámetro afectado	Tipo de perturbación
- Amplitud de la onda	<ul style="list-style-type: none">• Variación lenta de la tensión.• Depresiones de voltaje.• Fluctuaciones rápidas de la tensión (Flicker).• Tensiones transitorias.

- Frecuencia
 - Forma de onda
 - Simetría
- Sobretensiones.
 - Variación en la frecuencia nominal de la red.
 - Armónicos
 - Interarmónicos.
 - Interrupciones de energía.
 - Ruido eléctrico.
 - Desequilibrios (Asimetría).

Todas estas perturbaciones generadas por el emisor son propagadas a través de la red donde se encuentra conectado, de forma conducida, siendo en cualquier caso de baja frecuencia (< 10 kHz). Una clasificación más general de las perturbaciones debe tener en cuenta las de frecuencia superior a 10 kHz, es decir, considerados de alta frecuencia (banda de radiofrecuencia), las cuales pueden ser de dos tipos en función del modo de propagación:

- Conducidas a través de la red.
- Radiadas al medio ambiente (campos electromagnéticos).

En ellas en lugar de establecer el parámetro afectado directamente se determina la afectación sobre un equipo concreto. A continuación se analizan cada una de estas perturbaciones desde el punto de vista de su origen.

2.4 ORIGEN DE LAS VARIACIONES LENTAS DE TENSIÓN

Las variaciones lentas de tensión son alteraciones de la amplitud de la

onda de tensión suministrada, respecto a su valor nominal durante un tiempo relativamente prolongado (> 10 seg.). Ver figura 2.2.

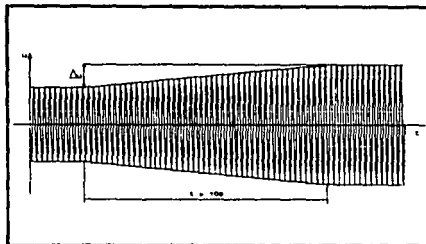


Figura 2.2 Variación lenta de tensión.

Su origen se debe a variaciones en el tiempo de la potencia demandada por los receptores conectados de una red; que alteran los niveles de tensión en los distintos puntos de la misma. Los dispositivos de perturbación típicos que aquí se encuentran son:

- Aparatos de calefacción por resistencia en el momento de su conexión, cuando la potencia demandada es fuerte con relación a la potencia de la red.
- Alumbrado público. Reguladores de iluminación.
- Placas a inducción
- Calefacción industrial por resistencia en su conexión a través de mandos eléctricos.
- Soldadura por arco.

2.5 ORIGEN DE LAS DEPRESIONES DE VOLTAJE

Las fallas que resultan en depresiones de voltaje pueden ocurrir en la planta o en el sistema eléctrico de la compañía suministradora. La condición de depresión de voltaje dura hasta que la falla se libera por algún dispositivo de protección. En la planta ello sucederá por la operación de un fusible o algún interruptor. En el sistema de alimentación, la falla puede liberarse por un fusible o un interruptor de la subestación. Si la empresa eléctrica emplea recierres, la condición de depresión de voltaje puede ocurrir múltiples veces.

Las fallas en el sistema eléctrico pueden ocurrir en el ámbito de la transmisión o en el de la distribución. Las fallas en el primer caso pueden afectar a más usuarios, inclusive aquellos localizados a varios kilometro de distancia, en otras partes de la red. Es posible que usuarios a distancias de cientos de kilómetros del punto de la falla puedan experimentar una depresión de voltaje que resulte en la mala operación de algún equipo. Las depresiones en distribución pueden afectar a usuarios en un alimentador adyacente.

Las depresiones de voltaje por alteraciones en transmisión normalmente son más cortas que en distribución. Debido a la gran cantidad de energía involucrada en las fallas de transmisión, éstas se liberan lo más rápido posible. Otra razón por la cual las depresiones en transmisión son de duración corta se debe a que la mayor parte de los sistemas de transmisión tienen cierto grado de interconexión, a diferencia de la mayoría de los sistemas de distribución, que son radiales.

Las fallas monofásicas a tierra en el sistema eléctrico de la empresa suministradora son la causa más común de las depresiones de voltaje en una planta industrial. El voltaje en la fase fallada se va a cero en el punto de falla. El voltaje en la subestación o en alimentadores paralelos depende de su distancia al punto de falla. En general, mientras más cercano el punto de falla a una planta industrial, mayor será la depresión registrada.

Las fallas trifásicas son más severas, pero menos comunes. Las fallas monofásicas a tierra resultan de condiciones ambientales como rayos, viento y hielo. La contaminación de los aisladores, el contacto por animales, ramas que caen o accidentes de transporte también son causas de falla. Aunque la empresa eléctrica intenta prevenir todo tipo de falla en el sistema, éstas no se pueden eliminar en su totalidad. Las descargas atmosféricas pueden causar flameos por rayos directos o flameos inverso. A pesar de las medidas tomadas (apartarrayos, hilos de guarda, baja resistencia a tierra), las fallas por rayos no se pueden eliminar por completo. Siempre podrá existir una descarga atmosférica con la suficiente magnitud o frente de onda rápido que ocasiona flameos.

Los parámetros importantes para la sensibilidad del equipo son los voltajes en la barra del usuario. Estos dependen de las conexiones del transformador entre el sistema fallado y el bus del usuario. Para el caso del sistema de distribución, el peor caso ocurre cuando la falla está cerca de la subestación de la planta o de la subestación que alimenta. Los voltajes en el bus del usuario dependerán de las conexiones del transformador como lo indica la tabla 2.1. Aún con una falla monofásica en el primario del transformador, la depresión de

voltaje en el bus del usuario no será en teoría menor que el 33% del valor nominal.

<i>Conexión del Transformador</i>	<i>Voltaje mínimo Fase a Fase %</i>	<i>Voltaje mínimo Fase a Tierra %</i>
Estrella estarizada - Estrella estarizada	58.0	0.00
Estrella estarizada - Estrella	58.0	0.00
Estrella - Estrella	58.0	33.0
Estrella - Estrella estarizada	58.0	33.0
Delta - Delta	58.0	33.0
Estrella - Delta	33.0	-
Estrella estarizada - Delta	33.0	-
Delta - Estrella estarizada	33.0	58.0
Delta - Estrella	33.0	58.0

Tabla 2.1 Voltajes mínimos en el secundario con falla a tierra en el primario del transformador.¹

2.6 ORIGEN DE LAS FLUCTUACIONES RÁPIDAS DE LA TENSIÓN

Las fluctuaciones rápidas de la tensión son alteraciones del valor eficaz de la tensión de corta duración. Pueden ser esporádicas o repetitivas y de amplitud constante o variable. Un caso particular es la que origina el fenómeno conocido con el nombre de Flicker (parpadeo u oscilación). Esto se muestra en la figura 2.3.

¹ H.G. Sarmiento U. y R. Velázquez S. "Aspectos de la calidad de la energía suministrada a industrias con equipo sensible.

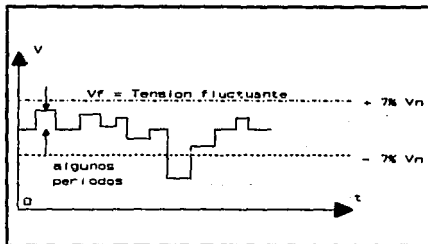


Figura 2.3 Fluctuaciones rápidas de tensión.

Estas fluctuaciones de tensión se caracterizan por dos parámetros: intervalos entre las alteraciones y su amplitud.

El origen de las fluctuaciones rápidas de tensión se debe al funcionamiento de receptores con variación rápida de la carga en su proceso. Los dispositivos perturbadores típicos que se encuentran aquí son:

- Máquinas de soldadura por resistencia.
- Molinos de rodadura.
- Calentamiento por arco voltaico.
- Motores. En el arranque, cuando la potencia demandada es fuerte con relación a la potencia de la red.
- Grandes cargas. En la conexión y desconexión.
- Electrodomésticos (con regulación automática).

2.7 ORIGEN DE LAS TENSIONES TRANSITORIAS (Impulsos)

Las tensiones transitorias son alteraciones del valor instantáneo de la tensión, con duración comprendida entre algunos segundos y pocos milisegundos sin carácter periódico. Se caracterizan por su amplitud y duración.

Pueden ocurrir de dos formas:

- Incremento transitorio de la tensión (picos de tensión, tensiones impulsionales, crestas de tensión).
- Decremento transitorio de la tensión (huecos de tensión "dips", microcortes, valles de tensión).

En las figuras 2.4 y 2.5 se observa esto.

El origen de estas tensiones transitorias se debe a:

- Actuaciones de equipos de protección de las redes.
- Descargas atmosféricas sobre las líneas (sobretensiones).
- Conexión y desconexión de elementos reactivos.

Los dispositivos perturbadores típicos son:

- Interruptores automáticos con equipo de reenganche instalados en la cabecera de líneas de distribución.
- Baterías de condensadores, en los procesos de conexión y desconexión.

- Hornos de arco.
- Hornos de inducción.
- Equipo de rectificación. Tracción eléctrica.

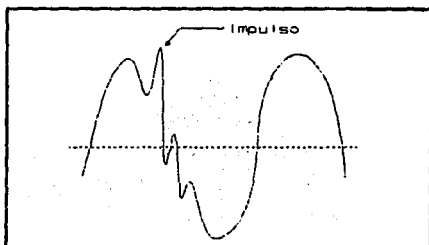


Figura 2.4 Seleccionamos transitorios.

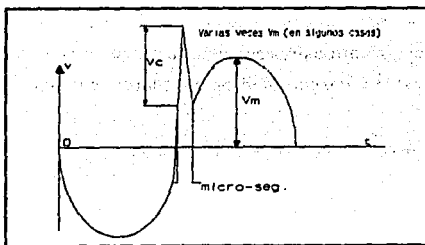


Figura 2.5 Impulso de tensión.

2.8 ORIGEN DE LAS VARIACIONES DE FRECUENCIA

Las variaciones de frecuencia son esencialmente alteraciones del valor nominal de la frecuencia de la red que en el caso de México es de 60 Hz. En otros países este valor cambia, por ejemplo, en toda la región europea la frecuencia nominal de la red es de 50 Hz.

El origen de estas variaciones se debe a grandes averías que se pudieran presentar en los sistemas de producción y transporte de energía eléctrica. En este caso no puede hablarse de dispositivos perturbadores. Es muy raro que este caso llegue a presentarse.

2.9 ORIGEN DE LAS ARMÓNICAS

Las armónicas son deformaciones de la curva de tensión o corriente senoidal (distorsión armónica), por superposición de senoides de frecuencia múltiple de la fundamental. Las armónicas de corriente de diferentes fuentes producen armónicas de tensión a través de la impedancia de la red.

Las armónicas son señales de corrientes o voltajes, o ambas, presentes en un sistema eléctrico con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, causadas por dispositivos no lineales, además estas señales pueden existir indefinidamente. Las armónicas típicas son:

- 3ª - 180 Hz
- 5ª - 300 Hz

- 7° - 420 Hz
- 11° - 660 Hz, etc.

Un análisis de armónicas en estado estable se realiza por medio de series de Fourier, la forma de onda se puede describir tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

Por otra parte la relación de fase de las armónicas con respecto a la fundamental es significativa en la determinación de la forma de onda, ya que la posición de las armónicas y la fase relativa de las mismas armónicas de diferentes fuentes puede alterar el efecto global en forma considerable.

2.9.1 Fuentes de Armónicas

Las armónicas son producidas en general por equipos con una característica tensión/corriente no lineal. Los dispositivos perturbadores típicos son:

- Rectificadores y convertidores estáticos alterna-continua (característica tensión/corriente no lineal).
- Hornos de arco. La resistencia del arco durante el período de fusión depende de la resistencia.
- Hornos de inducción de baja y media frecuencia.
- Motores con control de velocidad mediante tiristores.
- Transformadores. Debido a la no linealidad de su magnetismo (ciclo de histerisis), se produce una deformación de la curva de corriente.

- **Electrodomésticos con equipos de regulación de tensión y potencia.**
- **Alumbrado de descarga (lámparas fluorescentes).**

En la actualidad hay un gran número de dispositivos eléctricos, que bajo ciertas condiciones de funcionamiento generan armónicas y como consecuencia alteran la operación del sistema.

De los dispositivos conocidos, algunos existen desde la formación de los sistemas de potencia, otros surgen como resultado del desarrollo tecnológico y por último los que están contemplados a ser aplicados en un futuro. En base a esto se pueden clasificar a las fuentes de armónicas como:

- **Tradicionales.**
- **Nuevas.**
- **Futuras.**

2.9.2 Fuentes Tradicionales de Armónicas

Este tipo de fuentes son las que han existido desde la formación de los sistemas de potencia, sobresaliendo las máquinas eléctricas y transformadores. La principal fuente de armónicas era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia.

Sin embargo los transformadores y máquinas rotatorias modernos operando en estado estable, no ocasionan distorsión significativa en la red, únicamente durante disturbios transitorios y cuando funcionan fuera de su

estado normal. Dentro de esta clasificación se consideran otras dos cargas que contribuyen en la generación de armónicas; hornos de arco y alumbrado fluorescente. A continuación se describen brevemente algunos de ellos.

2.9.2.1 Transformadores

El transformador de potencia es un elemento en general poco generador de corrientes armónicas. No obstante, en determinadas circunstancias puede llegar a ser un elemento perturbador de cierta consideración.

En saturación el transformador responde con una corriente distorsionada ante una tensión senoidal. Debido a la filosofía de diseño actual, por la cual se pretende aprovechar en alto grado el núcleo magnético, el transformador tiene su zona de funcionamiento ligeramente entrante en el codo de saturación de la relación campo-inducción (H-B) del circuito magnético. Si en estas circunstancias se aumenta la tensión aplicada, el punto de funcionamiento se adentrará claramente en la zona no lineal con el consecuente aumento de armónicos generados, tal como se muestra en la figura 2.6, en la que puede observarse el sensible aumento de la intensidad de magnetización del núcleo con la tensión, y su composición en armónicas.

Una componente de corriente continua por parte de la carga que alimenta el transformador, originará asimismo un desplazamiento del punto de funcionamiento, lo que implicaría un notable aumento tanto de armónicas impares como pares. Este aumento es prácticamente lineal con la magnitud de la componente continua de la carga y, en transformadores trifásicos,

independientemente de la intensidad total.

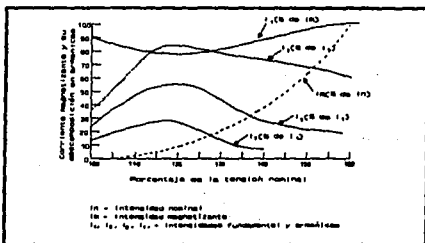


Figura 2.6 Composición armónica.

Para el caso de transformadores con tres devanados se producen corrientes armónicas que fluyen por cada devanado, regresando el flujo de armónicas por el aire (por el aceite del tanque) y debido a la reluctancia de la trayectoria se disminuye el flujo de las armónicas. Además deben de considerarse la 5ª y 7ª armónicas que son de consideración (5-10%) para la producción de distorsión.

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización alcanzan sus niveles máximos cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de tensión es elevado.

Otro aspecto importante de mencionar es que cuando un transformador se desenergiza es posible que retenga flujo magnético en el núcleo,

posteriormente el re-energizarse puede alcanzar niveles pico de hasta 3 veces el flujo de operación normal, con lo que se puede saturar el núcleo y dar lugar a corriente de magnetización de 5 a 10 veces de la corriente nominal.

2.9.2.2 Máquinas rotatorias

Las más importantes, en cuanto a armónicas introducidas se refiere, son las máquinas síncronas. En régimen normal de funcionamiento, éstas inyectan intensidades armónicas en la red debido a la variación de la reluctancia magnética entre los polos del rotor y las ranuras del estator. Las frecuencias de estas armónicas vienen dadas por:

$$f = S \cdot rps \pm f_n = (2N \pm 1) \cdot f_n \quad (2.1)$$

donde:

- S - Número total de ranuras
- rps - Velocidad del rotor en revoluciones por segundo
- N - Número de ranuras por polo
- f_n - Frecuencia fundamental

Por otro lado, los motores de inducción distorsionan menos la tensión de alimentación que las máquinas síncronas. No obstante crean problemas de caídas de tensión muy importantes al arrancar, por la fuerte intensidad que demandan, y son elementos que tienen mucho peso en la red en ciertos países, tales como los Estados Unidos, en donde más del 60% de la potencia generada es consumida por motores.

A pesar del gran número de máquinas rotatorias en las redes eléctricas, las armónicas que introducen son poco significativas en cuanto a su magnitud. A esto hay que añadir que cada vez es más frecuente el uso de grupos rectificador/inversor para la regulación de los motores asíncronos, con lo que a efecto de generación de armónicas, el conjunto de la carga debe considerarse como un rectificador.

2.9.2.3 Hornos

Los hornos, tanto de arco como de inducción son elementos altamente perturbadores, si bien los primeros lo son en mayor grado, aquí son considerados desde el punto de vista de generación de armónicas, aún cuando no es su aspecto perturbador más significativo.

La amplitud de las corrientes armónicas de los hornos de arco son función decreciente del cociente entre la potencia de cortocircuito del punto de conexión y la potencia del horno, según se ha comprobado experimentalmente². La cuantificación es muy problemática debido a la variación más o menos aleatoria de la resistencia del arco en cada ciclo de corriente. A lo largo de un proceso de fundición, los armónicos van variando según el estado del material a fundir.

En cuanto a los hornos de inducción, debido a que muchos de ellos trabajan a frecuencias superiores a la de la red, son alimentados a través de un conjunto rectificador/inversor por lo que el análisis de armónicas se reduce al del rectificador.

²R. Minondo. "Estudio general de hornos de arco para su conexión a red".

2.9.2.4 Alumbrado fluorescente

Los tubos de lámparas fluorescentes son altamente no lineales y como consecuencia generan corrientes armónicas impares de magnitud importante. En una carga trifásica a cuatro hilos (tres fases y el neutro) como ocurre en la mayoría de las industrias y edificios comerciales, las armónicas triples se suman en el neutro, la 3ª armónica es la más dominante. Si se aplican capacitores para la corrección del factor de potencia a este tipo de carga se pueden originar condiciones de resonancia con la 3ª armónica.

Existen prácticamente dos tipos de balastras que son utilizadas para manejar lámparas fluorescentes para alumbrado, de las cuales se habla a continuación.

2.9.2.5 Lámparas fluorescentes con balastras magnéticas

Las balastras magnéticas que en esencia contienen una inductancia con núcleo de hierro, han sido utilizadas en lámparas de descarga. Las balastras entregan el voltaje de operación de la lámpara, limitan la corriente en la lámpara y ayudan a estabilizar las variaciones de voltaje de la fuente³. La balastro es también responsable de algunas armónicas debido a la característica no lineal de magnetización del hierro. Las balastras de mala calidad que tienen grandes densidades de flujo magnético generan una mayor distorsión armónica. Las balastras magnéticas de alta calidad con mayor sección de conductores de

³H. Hewitt and A. Vause, *Lamps and Lighting*, Edward Arnold Publishers LTD, London, U.K. (1985).

cobre y con núcleo del hierro mejorado, presentan menores pérdidas y menor contenido armónico.

2.9.2.6 Lámparas fluorescentes con balastros electrónicos

Aunque las balastros electrónicos son más caras que las balastros magnéticas, las primeras se están utilizando cada vez más para operar lámparas fluorescentes, debido a que éstas presentan entre otros, los siguientes beneficios:

- Una mayor eficiencia en el uso de la energía.
- Mayor vida útil de la lámpara.
- Mejor calidad de iluminación.
- Menores problemas en efectos estroboscópicos y de parpadeo.
- Menor peso.

Si la fuente de alimentación de la balastro está constituida por una forma de onda senoidal, con una frecuencia de 50 ó 60 Hz, dicha forma de onda es rectificadora y filtrada con un capacitor, produciendo así un voltaje de directa, el cual es convertido, por medio de un inversor en una señal de voltaje de alta frecuencia (20 a 50 KHz), y ésta es aplicada a la lámpara. Si no se toman las debidas precauciones, la forma de onda de la corriente que es absorbida en la entrada por el rectificador y el filtro, estará altamente distorsionada y con un gran contenido armónico.

2.9.3 Fuentes Nuevas Generadoras de Armónicas

El incremento de los niveles de armónicas se debe al desarrollo y aplicación de dispositivos semiconductores de potencia para conexión y desconexión. Una fuente principal de armónicas es el convertidor de líneas, dispositivo que se usa tanto como rectificador (CA/CD), como inversor (CD/CA) y en aplicaciones de alta a baja potencia.

2.9.3.1 Inversores

Los inversores son circuitos que producen una tensión o intensidad alterna a partir de una fuente de corriente continua. Debido a ello pueden ser denominados convertidores CD/CA, así como los rectificadores lo son CA/CD. Esta denominación es muy interesante debido al hecho de que un puente de tiristores puede soportar flujo de potencia en ambas direcciones dependiendo del ángulo α de disparo. Si este es menor de 90° , el convertidor actuará como rectificador, mientras que si está comprendido entre 90 y 180 grados, funcionará como inversor. Este tipo de inversor es conocido como no autónomo, debido a que la red de alterna le marcará los instantes en los que los tiristores deben apagarse. Por otro lado está el convertidor CD/CA autónomo o autoconmutado con una etapa de control propia que le determinará cuándo deben conmutar sus semiconductores.

Los inversores del primer grupo son más importantes que los denominados autónomos en cuanto a potencia y número en redes de alterna, aún cuando su presencia total sea poca.

Sobre los inversores autoconmutados, se debe decir que inyectan armónicas diferentes a los de los no autónomos, pero debido a su poca importancia en lo referente a utilización y al generalizado uso de filtros cuando aparecen conectados a una red, estos no son muy tomados en cuenta para su estudio.

2.9.3.2 Grandes convertidores de potencia

Se utilizan en la industria metálica y transmisión de HVDC, su potencia nominal se especifica en [MW] y generalmente tienen más inductancia en el lado CD que en CA. Lo anterior origina que la corriente directa sea casi constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de CD y como una fuente de corriente armónica en lado de CA. El resultado del análisis a un convertidor típico es el siguiente:

- Que en las componentes armónicas de la forma de onda de corriente no existen armónicas de orden par.
- Las armónicas de orden $h = 1, 5, 9$ son de secuencia positiva.
- Las armónicas de $h = 3, 7, 11$ son de secuencia negativa.

2.9.3.3 Convertidor de 6 pulsos

Presentan las siguientes características:

- No existen armónicas triples.
- Las armónicas que existen son de orden $6h (\pm) 1$, cuando es un

valor entero.

- Las armónicas de orden $6h + 1$ son de secuencia positiva.
- Las armónicas de orden $6h - 1$ son de secuencia negativa.
- La magnitud de la armónica h es:

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (1)$$

2.9.3.4 Convertidor de 12 pulsos

Físicamente consisten de dos convertidores de 6 pulsos, son alimentados por dos transformadores trifásicos en paralelo, con igual voltaje fundamental y un defasamiento de 30° , sus características son:

- Armónicas de orden $12h (\pm) 1$
- Las corrientes armónicas de orden par $6h (\pm) 1$ (con h impar), circulan entre los transformadores de los dos convertidores para no penetrar en la red de CA.
- Por la forma de onda de la corriente se reduce el contenido armónico cuando se aplica una impedancia al sistema, lo anterior es visto desde un análisis aplicado a este tipo de convertidor, el efecto más pronunciado es una rectificación sin control.

2.9.3.5 Convertidores de mediano tamaño

La potencia nominal de estos dispositivos se da en decenas de miles de

KW, su aplicación aumenta en la industria, como controlador de velocidad para motores de CD. Sin embargo se tiende al uso de inversores y motores de inducción, transistores de potencia y tiristores GTO, estos dos últimos se aplican en el control de motores CA.

En controladores de motores CD alimentados con un convertidor presenta las siguientes características:

- La 5ª armónica alcanza valores pico de tres veces la onda fundamental. En trenes eléctricos se usa un control individual para cada puente convertidor.
- En el período de aceleración inicial con máxima corriente en el motor CD, el puente origina las peores corriente armónicas y opera con un fp bajo por lo que un puente se transfiere y el otro se le aplica control de fase.

2.9.3.6 Aparatos electrónicos de baja potencia

Para este tipo de carga sobresalen aparatos electrónicos de baja potencia como radios, televisiones, computadoras personales, cargadores de baterías, etc., que debido a su potencia nominal no ameritan un análisis individual, únicamente cuando un gran número de estos funciona en forma simultánea.

Es importante realizar un registro que muestre los valores pico cuando se encuentran operando estos dispositivos en gran número.

Por ejemplo en el caso de los televisores se tiene el siguiente informe:

- **Receptores de años atrás:** Empleaban rectificación de media onda, produciendo niveles considerables de CD y armónicas de orden par.
- **Receptores a color:** Requieren corriente pico de 2 a 3 veces mayor que la de un receptor monocromático.

Los siguientes resultados son de estudios estadísticos realizados en Francia:

- La cresta de la armónica coincide con la cresta de la onda fundamental, con lo que las armónicas de las diferentes fuentes refuerzan el pico.
- la 3ª armónica es la más fuerte que se suma en el circuito neutro, produciendo grandes corrientes indeseables en el circuito donde idealmente no debería haber armónicas.

La tendencia es emplear en los televisores a color regulados a base de transistores e inversores con protección tanto para sobretensiones como sobrecorrientes, así como mejorar la eficiencia de los circuitos.

Para el caso de computadoras personales se tiene lo siguiente:

Aquí en México, en un estudio realizado recientemente entre los meses de septiembre y noviembre de 1994, en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas para determinar los niveles de contaminación

armónica existente, se realizaron mediciones en las cuales se encontró que una gran fuente generadora de armónicas es la computadora personal, pero solo es significativa la distorsión de la onda de corriente, cuando varias de ellas (PC's) trabajan en forma simultánea, en la figura 2.7 se ilustra la forma de onda de la corriente cuando la carga conectada esta compuesta por dos PC's. En esta se observa como la forma de onda se distorsiona de tal manera que deja de ser una senoide pura.

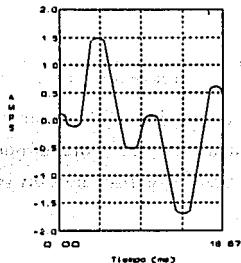


Figura 2.7 Forma de onda de corriente para una carga conectada de 2 PC's.

En la figura 2.8 se observa como cuando la carga conectada es mayor, en este caso 15 PC's, la distorsión en la forma de onda de la corriente es mayor y por consiguiente la calidad de la energía recibida disminuye notablemente .

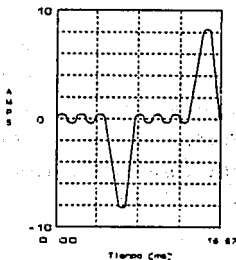


Figura 2.8 Forma de onda de corriente para una carga conectada de 15 PC's.

En este estudio, se observó que la distorsión en la forma de onda del voltaje es prácticamente nula, siendo solo la 5ta. armónica, la componente que aporta un porcentaje mayor de distorsión, con un valor máximo de 3% en relación con la fundamental.

Según lo expuesto, se concluye que a mayor número de computadoras personales conectadas, la forma de onda de la corriente se deteriora notablemente con la consecuente afectación en la calidad de la energía recibida, lo que a su vez provoca que el equipo o aparatos conectados en el mismo punto no trabajen correctamente.

En el caso de los cargadores de baterías las armónicas generadas dependen del voltaje inicial y el total del contenido armónico varía de acuerdo al tiempo e involucra probabilidad aleatoria.

Los cargadores de baterías producen corrientes de secuencia cero de armónicas triples, mismas que sobrecargan al circuito neutro, las lámparas fluorescentes generan armónicas triples con la misma relación de fase ocasionando que al operar varios cargadores se sumen casi algebraicamente, situación que resulta desfavorable.

2.9.4 Fuentes Futuras de Generación Armónica

Se les denomina fuentes futuras de armónicas, a los dispositivos que en la actualidad se emplean poco y tienden a incrementarse, así como aquellos que son de más reciente aplicación, por ejemplo:

- **Autos eléctricos:** Requieren rectificación de grandes cantidades de potencia para cargar sus baterías.
- **Dispositivos de conversión directa:** Como baterías de almacenamiento avanzadas y celdas de combustión.
- **Cicloconvertidores:** Son convertidores de frecuencia, las expresiones para las corrientes de armónicas de estos dispositivos son extremadamente complejas, su variación se debe a que están en función de la relación de frecuencia a la que operan, son utilizados para máquinas de baja velocidad y alto par.
- **Fuentes no convencionales:** Como energía solar, de viento, así como los dispositivos de conversión directa.

2.10 ORIGEN DE LOS INTERARMÓNICOS

Entre los armónicos de tensión corriente se pueden observar frecuencias que no son un múltiplo entero de la fundamental. Pueden aparecer como frecuencias discretas o por toda la banda del espectro. Llegan a aparecer tanto en baja como en alta tensión.

Son generados básicamente por los dispositivos siguientes:

- Convertidores estáticos de frecuencia.
- Motores de inducción.
- Máquinas de soldar alimentadas en baja tensión.
- Hornos de arco.

2.11 ORIGEN DE LOS DESEQUILIBRIOS

Un desequilibrio es la no existencia de igualdad entre las amplitudes y desfases (120°) de las tres tensiones de un sistema trifásico. Una modificación de estos dos constituye un desequilibrio o una asimetría del mencionado sistema.

La tensión generada en los bornes de los alternadores se caracteriza por constituir un sistema trifásico equilibrado, representado gráficamente por tres vectores de igual módulo y desfasados 120° entre sí.

Los distintos elementos constitutivos de las redes, líneas y

transformadores, no constituyen en si mismo generadores de asimetrías, pero si lo son las cargas repartidas de manera irregular a lo largo de las mismas, siendo el caso más evidente el de una carga monofásica. Los dispositivos perturbadores típicos son:

- Hornos de inducción (carga monofásica).
- Subestaciones de tracción (conexión monofásica).
- Equipos de soldadura.

2.12 ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES

Las sobretensiones que se presentan en un sistema eléctrico, de acuerdo con las causas que las producen, se pueden clasificar en:

- Sobretensiones de origen interno.
- Sobretensiones de origen externo.

2.12.1 Sobretensiones de origen interno

Las sobretensiones de origen interno se deben a la operación de dispositivos de desconexión o fenómenos de ferromresonancia.

Las sobretensiones por operación de dispositivos de desconexión son de muy corta duración (2 a 3 ciclos) y se deben principalmente a fallas ocurridas en el sistema, pudiendo ser estas: línea a línea, dos líneas a tierra, trifásica y línea a tierra; siendo esta última (falla de línea a tierra) la que representa, desde

el punto de vista de sobretensión, la más severa para un sistema de distribución. En la figura 2.9 se representa esta condición.

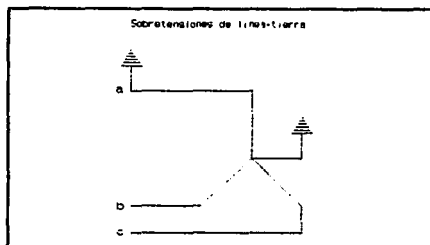


Figura 2.9 Sobretensiones de líneas-tierra.

En las ecuaciones 2.2 y 2.3 se observa que las tensiones que se presentan bajo esta condición de falla en las fases NO dañadas dependen de la relación de reactancias X_0/X_1 . Graficando en la figura 2.10 las tensiones V_c y V_b en función de X_0/X_1 , se concluye que la sobretensión máxima interna que se puede presentar en los sistemas de distribución debido a una falla de línea a tierra, cuyas relaciones de reactancia fluctúan siempre entre valores de 1 a 3, nunca serán mayores de 1.25.

- Condiciones de falla

$$I_b = I_c = 0; V_a = 0$$

De un análisis de componentes simétricas se tiene:

$$V_b = E_a \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2} \right) \quad (2.2)$$

$$V_c = E_a \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2} \right) \quad (2.3)$$

Por lo tanto:

Los voltajes en las fases no dañadas *dependen* la relación de reactancias X_0 y X_1 .

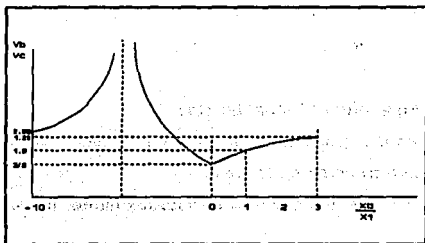


Figura 2.10 Sobretensión máxima interna que se puede presentar en sistemas de distribución debido a falta de línea a tierra.

Por lo anterior, el estudio de la protección contra sobretensiones en este tipo de sistemas se enfoca principalmente a las de origen externo, que son las que con mayor frecuencia pueden dañarnos, dada su magnitud; sin embargo, estas relaciones reflejan el desplazamiento del neutro del sistema con una falla de fase a tierra y por tanto se deberán tomar en cuenta en la selección del apartarrayo, que estará en función de la relación de las reactancias de secuencia cero (X_0) y positiva (X_1), y la de la resistencia de secuencia cero (R_0) y la reactancia de secuencia positiva. Estas relaciones dan lugar a una clasificación de los sistemas de distribución y a la definición de lo que se conoce como "coeficiente de aterrizamiento".

2.12.2 Sobretensiones de origen externo

Las sobretensiones externas son de origen atmosférico y toman usualmente la forma de un impulso unidireccional; la amplitud máxima posible de la onda no tiene ninguna relación con el voltaje de operación del sistema. Estas sobretensiones pueden deberse a las siguientes causas:

- Descargas atmosféricas directas.
- Voltajes inducidos causados por descargas atmosféricas a tierra, que ocurren cerca de la línea.
- Sobrevoltajes inducidos electrostáticamente, causados por nubes cargadas eléctricamente.
- Sobrevoltajes inducidos electrostáticamente, causados por fricciones entre pequeñas partículas de polvo existentes en la atmósfera.

Una descarga atmosférica se presenta cuando una o un conjunto de nubes se encuentran a un potencial elevado con respecto a tierra (o a una nube contigua), de tal manera que el dieléctrico entre estas dos masas, aire en este caso, se destruye. La elevación de potencial se debe a la fricción que existe en momentos de turbulencia atmosférica en las partículas que forman la nube.

El primer proceso de una descarga atmosférica es la elevación del gradiente de potencial en el aire inmediato que rodea la nube; esta primera ruptura del dieléctrico ocasiona un efecto corona que se conoce como flujo o corriente piloto. Este flujo ioniza el aire, repitiéndose el proceso varias veces hasta que se crea un "camino" que ocasiona un arco continuo conocido como arco inicial; tiene una forma zigzagueante y es en este preciso momento cuando se inician los fenómenos visibles de una descarga atmosférica. Consiste esencialmente en tramos o pasos de aproximadamente 50 m de longitud y se encuentra asociada a pequeñas ramas en toda su trayectoria. En la figura 2.11a se representan en forma esquemática estos fenómenos.

La corriente o flujo piloto es en realidad un camino o ruta ionizada, una ruptura completa en el aislamiento. Consecuentemente, cuando ésta alcanza tierra forma un paso o ruta para un flujo inverso; en la figura 2.11b es mostrada la parte inferior de la nube cargada negativamente y, por tanto, la carga inducida en la tierra será positiva. Desde un punto de vista simplemente convencional, el sentido de las corrientes de arco inicial y el de retorno es el mismo. Con la neutralización de la carga negativa de parte de la nube, cualquier descarga posterior tendrá que pasar por los mismos fenómenos y partirá de otra porción o parte de la misma; sin embargo, esta nueva descarga tratará de utilizar el paso

se representan en forma esquemática estos fenómenos.

La corriente o flujo piloto es en realidad un camino o ruta ionizada, una ruptura completa en el aislamiento. Consecuentemente, cuando ésta alcanza tierra forma un paso o ruta para un flujo inverso; en la figura 2.11 b es mostrada la parte inferior de la nube cargada negativamente y, por tanto, la carga inducida en la tierra será positiva. Desde un punto de vista simplemente convencional, el sentido de las corrientes de arco inicial y el de retorno es el mismo. Con la neutralización de la carga negativa de parte de la nube, cualquier descarga posterior tendrá que pasar por los mismos fenómenos y partirá de otra porción o parte de la misma; sin embargo, esta nueva descarga tratará de utilizar el paso que antes se había ionizado y consecuentemente no tendrá brazos o ramas. En todos los casos estas descargas, denominadas principales, estarán asociadas con corrientes de alta intensidad (figura 2.11 c).

Si la descarga cae directamente sobre las líneas, la potencia que debe ser disipada en corto tiempo en que ésta se produce es del orden de 10^{10} kW aproximadamente, y debe tenerse por seguro que daños serios serán causados en el sistema; aún más, es seguro que bajo estas circunstancias ningún equipo pueda proporcionar una protección adecuada. La mayor parte de las descargas no ocurren afortunadamente de manera directa sino en puntos adyacentes a la línea, produciendo voltajes inducidos que se comportan como ondas viajeras. Ondas de sobretensión también pueden ser producidas por un fenómeno de inducción por la presencia de nubes cargadas cercanas a las líneas.

Las ondas producidas por los fenómenos antes mencionados pueden ser

de prueba varía un poco con respecto a países de Europa y América. Sin embargo, el significado es el mismo para todos los casos.)

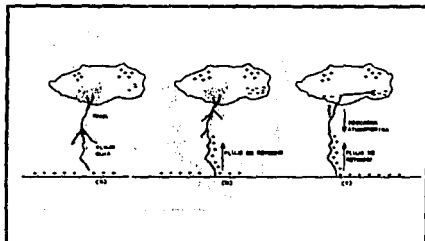


Figura 2.11 Formación de una descarga atmosférica.

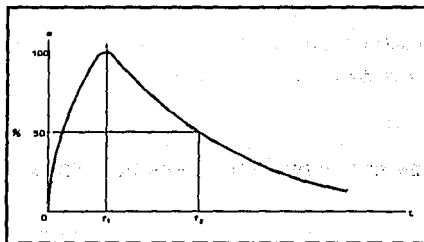


Figura 2.12 Curva típica de una descarga atmosférica.

2.13 ORIGEN DEL RUIDO ELÉCTRICO (interferencia)

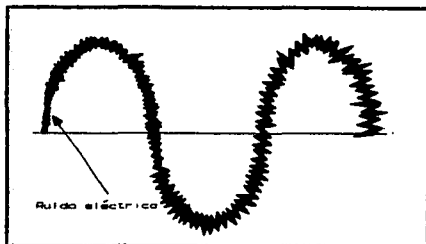


Figura 2.13 Ruido eléctrico.

Una forma común de disturbios en sistemas de computo es el ruido eléctrico generado, por ejemplo, por sistemas de transmisión de señales de radio, operación de lámparas fluorescentes y controladores de atenuación de niveles de iluminación (figura 2.13). Este tipo de ruido puede afectar la operación de computadoras al producir diversos problemas durante la ejecución de programas.

2.14 ORIGEN DE LAS 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 puede tener una duración de hasta varios ciclos (figura 2.14).

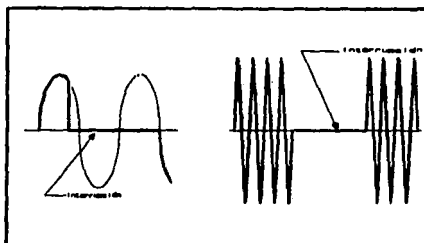


Figura 2.14 Interrupciones instantáneas.

Las interrupciones de energía generalmente ocurren por algún disturbio en el sistema eléctrico (fallas en el sistema de potencia, accidentes que involucran a 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 (figura 2.15).

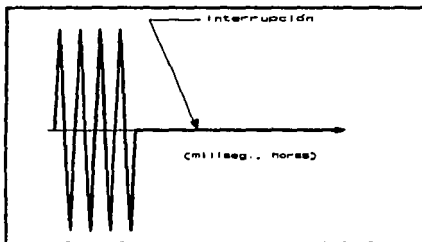


Figura 2.15 Interrupciones temporales.

2.15 ATERRIZAMIENTO

Los sistemas de aterrizamiento juegan un papel importante en la calidad de la energía porque los transitorios iniciados en el sistema de energía o en una instalación pueden viajar a través del sistema de aterrizamiento y alcanzar equipo electrónico sensible. Los transformadores no existen en la trayectoria del neutro. Así los transitorios de alta frecuencia viajan casi sin atenuación a través del neutro, la atenuación es proporcionada por las tierras solo si el neutro es múltiple aterrizado. Un modelo apropiado de las tierras, neutros y el sistema de energía puede proporcionar una buena herramienta para determinar los sobrevoltajes transitorios que alcanzan una pieza específica de equipo. Como ejemplo, considerando una instalación servida por un cable de distribución subterráneo de una milla (0.8 Km) como se muestra en la figura 2.16. El cable subterráneo es alimentado de un circuito de distribución aéreo el cual esta sujeto a descargas atmosféricas. En una entrada de servicio como esta, los transitorios pueden entrar a una instalación por medio del conductor en tierra.

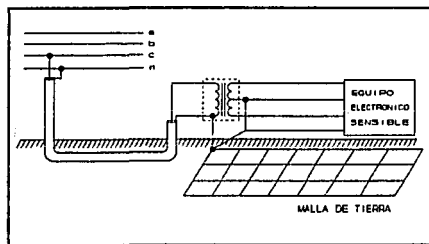


Figura 2.16 Ilustración de una entrada de servicio típica para una instalación comercial e industrial.

Esto es de gran necesidad para desarrollar modelos comprensivos de sistemas de aterrizamiento los cuales son comparables con modelos idealizados de sistemas de energía existente. Los modelos de sistemas de tierra deben estar basados sobre rigurosos análisis electromagnéticos pero aún más, deben ser prácticos desde el punto de vista computacional. Estos modelos permitirán un análisis exacto de los efectos de transitorios usuales e inevitables; tal como switcheo y descargas, a la calidad de la energía. Eventualmente, buenos modelos de análisis permitirán optimizar diseños de sistemas de aterrizamiento con el obvio beneficio de incrementar la calidad de la energía.

3

EFFECTOS CAUSADOS POR DETERIORO EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los efectos por deterioro en la calidad de la energía que se producen en los diferentes equipos conectados a un sistema de potencia son muy variados

al igual que las fuentes perturbadoras que los provocan, pero se pueden clasificar de acuerdo a los mismos.

Un grupo de trabajo del IEEE que se ha dedicado ha estudiar problemas relacionados con calidad de energía, principalmente armónicas en sistemas de energía, enlistó once áreas principales donde existen problemas¹, estas son:

- La falla en bancos de capacitores debido a ruptura dieléctrica ó sobrecarga de energía reactiva.
- Interferencia con control de onda y sistemas de acarreo de la línea de energía, causando una mala operación de sistemas, los cuales acompañados de switcheos remotos, control de carga y medición.
- Excesivas pérdidas resultantes de el calentamiento de máquinas síncronas y de inducción.
- Sobrevoltajes y corrientes excesivas sobre el sistema, desde resonancia hasta voltajes armónicos o corrientes sobre la red.
- Ruptura dieléctrica de cables aislados resultado de sobrevoltajes armónicos.
- Interferencia inductiva en sistemas de comunicaciones.
- Errores en lecturas de medición.
- Señales de interferencia y mal funcionamiento de relevadores, particularmente en estado sólido y sistemas controlados por microprocesadores.
- Interferencia con grandes controladores de motores y sistemas de excitación en plantas de energía.

¹IEEE "Disturbances in Power Delivery" Vol. 5, No. 1, January 1993.

al igual que las fuentes perturbadoras que los provocan, pero se pueden clasificar de acuerdo a los mismos.

Un grupo de trabajo del IEEE que se ha dedicado ha estudiar problemas relacionados con calidad de energía, principalmente armónicas en sistemas de energía, enlista once áreas principales donde existen problemas¹, estas son:

- La falla en bancos de capacitores debido a ruptura dieléctrica ó sobrecarga de energía reactiva.
- Interferencia con control de onda y sistemas de acarreo de la línea de energía, causando una mala operación de sistemas, los cuales acompañados de switcheos remotos, control de carga y medición.
- Excesivas pérdidas resultantes de el calentamiento de máquinas síncronas y de inducción.
- Sobrevoltajes y corrientes excesivas sobre el sistema, desde resonancia hasta voltajes armónicos o corrientes sobre la red.
- Ruptura dieléctrica de cables aislados resultado de sobrevoltajes armónicos.
- Interferencia inductiva en sistemas de comunicaciones.
- Errores en lecturas de medición.
- Señales de interferencia y mal funcionamiento de relevadores, particularmente en estado solido y sistemas controlados por microprocesadores.
- Interferencia con grandes controladores de motores y sistemas de excitación en plantas de energía.

¹IEEE "Transactions on Power Delivery", Vol. 8, No. 1. January 1993.

- **Oscilación mecánica de máquinas síncronas y de inducción.**
- **Operación inestable de circuitos de disparo basados en detección de cruzamiento por cero.**

Otras áreas adicionales identificadas son:

- **Excesivo calentamiento de transformadores debido a la frecuencia dependiente del núcleo.**
- **Cambio en el tamaño de la imagen y brillo en televisores si las armónicas afectan el voltaje máximo.**
- **Efectos sobre computadoras y producción automática computarizada.**

Algunos de estos efectos y algunos otros se describen adelante tratando de cubrir los efectos que producen las perturbaciones descritas anteriormente.

3.2 EFECTOS DE LAS VARIACIONES LENTAS DE TENSIÓN

Principalmente producen el acortamiento de la vida útil de los receptores. Para este tipo de perturbaciones no se definen niveles de compatibilidad electromagnética, dado que las empresas suministradoras tratan de aminorar los efectos mediante equipos de regulación automática de la tensión instalada en los transformadores de alimentación de las redes de distribución, en las cuales pueden estar conectadas varios de estos receptores con una variación totalmente aleatoria en el tiempo de su potencia consumida. Los receptores sensibles a este tipo de perturbación son : Equipos de iluminación, contactores

relés, motores asíncronos y síncronos, rectificadores, onduladores y pc's.

3.3 EFECTOS DE LAS FLUCTUACIONES RÁPIDAS DE LA TENSIÓN

La generación de flicker (parpadeo). Equivale a una fluctuación en la intensidad de iluminación de las lámparas de incandescencia, que provoca una incomodidad fisiológica de los usuarios de las mismas (impresión subjetiva). Las lámparas de incandescencia y los receptores de T.V. son los aparatos que son sensibles a esta perturbación.

3.4 EFECTOS DE LAS TENSIONES TRANSITORIAS

Provocan una incorrecta operación de equipos específicos, como puede ser:

- En las lámparas de descarga en las que se produce la extinción del arco a partir de una determinada duración de un microcorte, o de un valle de tensión.
- Equipos de regulación, en los cuales, se produce el desacebado intempestivo de tiristores.
- Actuación intempestiva de contactores y dispositivos de control en general.
- Errores de medida en instrumentos equipados con dispositivos electrónicos.
- Variación de la velocidad de los motores o parada de los mismos.
- Pérdida de sincronismo en motores síncronos y generadores.

3.5 EFECTOS DE VARIACIONES EN LA FRECUENCIA

Principalmente en caso que esto llegue a presentarse se daría la actuación de protecciones de subfrecuencia y los efectos principales que se darían sería:

- El incorrecto funcionamiento de motores asíncronos y síncronos.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, esta perturbación solo puede presentarse en circunstancias extraordinarias.

3.6 EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS

Hay dos categorías principales de efectos de armónicas en equipo. La primera es el efecto de calentamiento en equipos, tales como motores, capacitores y transformadores que, a menudo, reducen su vida de operación. La segunda, es la disrupción en la operación que incluye, para la mayoría de las partes, equipos controlados electrónicamente. Por otro lado, posiblemente al rápido crecimiento de la electrónica, hace deficiente la documentación de los problemas armónicos asociados con el equipo electrónico de casi todos los tipos. En donde existe, casi siempre es cualitativa o supuesta.

La falta de información sobre los mecanismo de falla en equipo es la causa de que se tengan muchas dudas con respecto al tema de la distorsión armónica.

Los efectos de las armónicas influyen en los dispositivos de protección, medición y equipo de control, en los que provocan errores y alteraciones de

operación , resultado de altas corrientes y voltajes armónicos. Los principales efectos causados son:

- **Problemas en el factor de potencia.**
- **Ruido inducido en cables de comunicación.**
- **Aparición de corriente continua.**
- **Interferencia en equipos de control.**
- **Sobrecalentamiento y fallas en el equipo.**
- **Reducción en la capacidad de potencia (I^2R) de cables.**
- **Calentamiento de los mismos.**

Los problemas resultantes inmediatamente a los efectos de armónicas son:

- **Efecto de Resonancia.**
- **Distorsión de voltaje.**

Otros aspectos que se deben de tener en cuenta son:

- **La capacidad de cortocircuito del sistema: ya que los sistemas con altas capacidades de cortocircuito tienen menos distorsiones de voltaje para una misma fuente de corriente armónica que sistemas con capacidades menores.**

- **Condiciones del sistema: Estas condiciones pueden ser balanceadas contra desbalanceadas; en condiciones balanceadas, los modelos de secuencia positiva pueden emplearse para evaluar las características de respuesta a la**

frecuencia del sistema.

Con condiciones desbalanceadas, debe aplicarse análisis de desbalance en los que se incluyen fuentes armónicas desbalanceadas, como: cargas desbalanceadas, bancos de capacitores monofásicos, etc., en estos sistemas, cada armónica tiene su propia componente de secuencia cero, positiva y negativa.

• **Flujo normal de las corrientes armónicas:** Las corrientes armónicas fluyen de las cargas no lineales (fuentes de armónicas) hacia la menor impedancia, usualmente la fuente de suministro. La impedancia de la fuente comúnmente es mucho menor que los caminos en paralelo proporcionados por las cargas. No obstante, la corriente se divide dependiendo de las impedancias en el circuito del sistema.

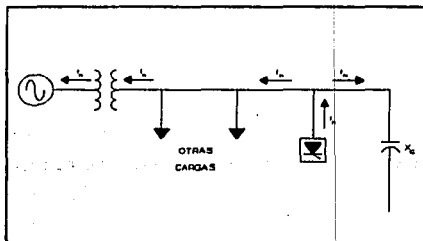


Figura 3.1 Flujo normal de armónicas.

Cabe mencionar que las armónicas superiores deben fluir hacia los capacitores que tienen una baja impedancia para altas frecuencias. En la figura 3.1 se muestra el flujo normal de armónicas.

3.6.1 Efectos en los Capacitores

El uso de capacitores en derivación para mejorar el factor de potencia y la tensión, también tienen una influencia significativa en los niveles de armónicas. Los capacitores no generan armónicas, sino que proporcionan circuitos para posibles condiciones resonantes. Si la adición de capacitores sintoniza el sistema para resonar cerca de una frecuencia armónica presente en la corriente de carga o en la tensión del sistema, se producirán grandes corrientes o tensiones a esa frecuencia. La frecuencia resonante de un sistema de baja tensión con un banco de capacitores se puede encontrar de:

$$n = \sqrt{(Q_s/Q_c)} \quad (3.1)$$

Donde n es el orden de la armónica al cual podría ocurrir la resonancia, Q_s es la capacidad de cortocircuito disponible en kVA y Q_c es la capacidad en kVAR del banco.

En un sistema con fuentes armónicas distribuidas, las armónicas convergirán en el banco de capacitores y como consecuencia provocar problemas en ellos como:

- **Operación de fusibles**
- **Falla del tanque**
- **Aumento en las pérdidas del dieléctrico y por lo tanto calentamiento**
- **Condiciones de resonancia**
- **Sobretensiones**

Una mayor preocupación en la aplicación de capacitores en sistemas de transmisión, es la posibilidad de ocasionar un circuito resonante con la inductancia del sistema. Este efecto impone voltajes que pueden dar lugar a corrientes dañinas en los capacitores, equipo vulnerable al efecto de armónicas. Ante tal situación se incrementa el calentamiento y esfuerzo dieléctrico acortando la vida del capacitor.

La interrupción frecuente de componentes magnéticas no lineales (núcleo de hierro) tal como en los transformadores y reactores, pueden producir corrientes armónicas que se suman a la carga de capacitores. En situaciones extremas se puede llegar a la destrucción de estos dispositivos.

3.6.2 Efectos en Interruptores y Fusibles.

Hay evidencias de que la distorsión armónica en la corriente puede afectar la capacidad interruptiva de los interruptores. La corriente de carga se puede distorsionar y los bajos niveles de falla podrían contener altos porcentajes de corriente de carga distorsionada. Los altos niveles de corriente de falla, no se verán afectados por las corrientes de carga distorsionadas. Cuando está presente una distorsión en la carga, podría resultar una relación de di/dt en el

cruce por cero para una forma de onda senoidal, haciendo que la interrupción sea más difícil.

En artículos técnicos se han descrito fallas en interruptores de 15 kV debido a corrientes armónicas. Las corrientes con un factor de distorsión del 50% limitaron la capacidad de la bobina de soplo del interruptor al forzar el arco dentro de la cámara de arqueo. Más aún, la interrupción prolongada también retrasó la disipación de la corriente de falla y causó una reignición después de un recierre rápido. Los interruptores en vacío son menos sensibles a la distorsión de la corriente armónica que los interruptores magnéticos en aire².

En otro artículo se describe cómo la distorsión armónica afecta la capacidad de detección de corriente de los interruptores termomagnéticos³. El mecanismo instantáneo de algunos interruptores es un selenoide que disipa calor adicional debido a las pérdidas de frecuencias mayores de la fundamental. Este calor después incrementa la temperatura del dispositivo térmico y reduce el punto de disparo. A 300 Hz, el punto de disparo de un interruptor en caja moldeada de 225A, se puede reducir de 10-20%.

Debido a que los fusibles actúan térmicamente, son dispositivos de sobrecorriente rms inherentes. En algunos fusibles de distribución, el eslabón consiste de varios listones que son susceptibles al calentamiento por el efecto pelicular de las corrientes armónicas. Sin embargo, la mayoría de los problemas

²F. Lembo and V. H. D' onofrio., "Distribution Harmonics Cause Breaker Problems," Electrical World, Sept 1981, pp 121-122

³J. P. Brozek, " The Effects of Harmonics on Overcurrent Protection Devices," Proc. 1990 IAS, 1990, pp 1965 - 1967.

de fusibles reportados por armónicas, podrían ser realmente problemas de medición. Dependiendo de la forma de onda y del proceso de medición, un ampérmetro puede indicar una corriente mayor o menor al valor rms. Si se mide una corriente distorsionada con otro dispositivo diferente a un ampérmetro rms, podría parecer que los fusibles se comportan inadecuadamente. Las pruebas internas realizadas por un fabricante de fusibles se comportan inadecuadamente. Las pruebas internas realizadas por un fabricante de fusibles hasta 415 Hz no han mostrado cambios en las características de operación.

3.6.3 Efectos en los Conductores

Hay dos mecanismos en los cuales las corrientes armónicas pueden producir calentamiento en los conductores, el cual es mayor que el esperado para un valor de corriente rms. El primer mecanismo es debido a la redistribución de corriente dentro del conductor e incluye los efectos pelicular y de proximidad. El efecto pelicular se debe al blindaje de la parte interna del conductor realizado por la parte externa. Ya que la corriente se concentra en la capa externa, la resistencia efectiva del conductor se aumenta. El efecto pelicular aumenta con la frecuencia y con el diámetro del conductor. El efecto de proximidad se debe al campo magnético de los conductores distorsionando la distribución de corriente en los conductores adyacentes. En cables redondos, el efecto de proximidad es mucho menos pronunciado que el efecto pelicular⁴. Las cubiertas metálicas y los tubos conduit también contribuyen al efecto de proximidad.

⁴A. E. Kennelly, F. A. Laws, and P. H. Pierce, "Experimental Researches on Skin Effects in Conductors," Trans, AIEE, 34, 1915, pp. 1953-2018.

El segundo mecanismo produce corrientes anormalmente altas en el conductor neutro de los sistemas de distribución trifásicos, 4 hilos que alimentan cargas monofásicas. Algunas cargas, tales como fuentes de alimentación modo conmutado producen corrientes significativas con tercera armónica. Corrientes trifásicas balanceadas de frecuencia fundamental no provocan corriente en el neutro. Sin embargo, en circuitos trifásicos, las corrientes de tercera armónica se suman más que cancelarse en el neutro y pueden ser tan altas como 1.7 veces la corriente de fase para cargas de convertidores. Ya que el conductor de neutro normalmente se dimensiona igual que los conductores de fase, este conductor de neutro se puede sobrecargar. Es más probable que este problema ocurra en edificios comerciales en donde los sistemas de distribución trifásicos alimentan cargas grandes monofásicas de equipo electrónico de oficina.

3.6.4 Efectos en Equipo Electrónico

Hay varios mecanismos mediante los cuales la distorsión armónica afecta a los equipos electrónicos. El primero a considerar son las tensiones con múltiples cruces por cero como resultado de la distorsión armónica. Es común para los circuitos electrónicos utilizar los cruces por cero de la tensión a frecuencia fundamental con propósitos de temporización. Sin embargo, la distorsión armónica que produce cruces por ceros más frecuentes que los de la frecuencia fundamental pueden afectar la operación del equipo. Un ejemplo claro es un reloj digital doméstico, el cual avanza rápidamente en la presencia de cruces por cero adicionales debidos a la distorsión armónica.

A menudo los semiconductores se conmutan al cruce por cero de la tensión para reducir la interferencia electromagnética y corrientes de energización. Los cruzamientos múltiples pueden cambiar los tiempos de conmutación del dispositivo y afectar las operación del equipo.

Las fuentes de alimentación electrónicas, utilizan tensiones pico de la forma de onda para mantener los capacitores de los filtros a una carga total. Dependiendo de la frecuencia armónica y de la relación de fase con la fundamental, la distorsión armónica en la tensión puede aumentar o aplanar el pico de la forma de onda. Consecuentemente, la fuente de alimentación opera con una tensión de entrada mayor o menor, aún cuando la tensión de entrada rms sea la nominal. Con una distorsión severa, la operación del equipo se puede perturbar. Una forma de onda moderadamente aplanada podría reducir la tensión efectiva de operación a un punto donde el equipo sea vulnerable a caídas de tensión menores. El factor de cresta de la forma de onda debe indicar que la distorsión de tensión es un problema. El factor de cresta es la relación del pico de la onda a su valor rms y es $\sqrt{2}$ para una onda senoidal perfecta. Es más probable que una baja de tensión debida a una onda aplanada cause disturbios. Un fabricante de computadoras limita las desviaciones del factor cresta a $\sqrt{2} \pm 0.1$.

Las crestas de tensión también pueden afectar la operación del equipo electrónico. Estas crestas se producen por la conmutación de semiconductores de potencia en los convertidores y se cuantifican por la relación del cambio de tensión (dV/dt) y el producto tensión-tiempo. Una cresta de tensión podría estar cerca del cero y afectar el equipo sensible a los cruzamientos por el cero.

Para valores altos de dV/dt , la cresta se ve como un cambio de tensión en escalón por la red de suministro de energía y puede causar que la fuente de poder oscile a su frecuencia natural. La cresta, amplificada por la resonancia de la fuente de poder, puede afectar al equipo. También es posible que la alta relación de cambio de la tensión asociada con la cresta se pueda acoplar a través de la fuente de poder en los circuitos digitales y provocar cambios de estado que afecten la operación. Un dV/dt grande también podría disparar en falso a los tiristores para que conduzcan en los circuitos de poder. Una impedancia, ya sea un transformador o reactor adelante del equipo que está provocando la cresta reducirá la relación dV/dt a otras cargas y disminuirá la excitación resonante del sistema.

Las armónicas fraccionarias y las subarmónicas podrían afectar las pantallas de video o televisores. Las armónicas fraccionarias son frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y las subarmónicas son menores a la fundamental. Se ha encontrado que aún un 0.5% de una armónica fraccionaria (referida a la tensión terminal nominal) produce un alargamiento periódico y una reducción de la imagen en los tubos de rayos catódicos.

Las computadoras personales son especialmente sensibles a las perturbaciones eléctricas y en particular a la presencia de armónicos en la red. Falla en el procesamiento de datos, a veces no recuperables, es el problema más frecuente en estos equipos, debidos en gran parte al ruido que por la alimentación se filtra en todo el conjunto. Se puede afirmar que las PC's y demás equipos electrónicos de control digitales son muy exigentes en cuanto

a la forma de onda de la alimentación. La distorsión debe limitarse al 5 por ciento como máximo.

3.6.5 Alumbrado

Las lámparas incandescentes tendrán una pérdida de vida definitiva cuando operen con tensiones distorsionadas debido a que son sensibles a los niveles de tensión de operación. Si la tensión de operación rms es mayor que la tensión nominal debido a la distorsión armónica, la elevada temperatura del filamento reducirá la vida de la lámpara. Para una operación continua a una tensión del 105% de la nominal rms, la vida de la lámpara disminuirá en 47%.

Aparte del ruido audible no hay un efecto conocido de la distorsión de tensión armónica en el alumbrado de descarga. Las lámparas de descargas tales como las de sodio de baja presión, haluros metálicos de alta presión o lámparas fluorescentes, necesitan balastro inductiva en serie, como un elemento limitador de corriente. A menudo se agregan capacitores para corregir el factor de potencia cerca de la unidad. Las balastros de lámparas fluorescentes dobles utilizan defasadores de corrientes para mejorar el factor de potencia sin capacitores. En lámparas con capacitores, éstos en conjunto con el inductor de las balastros podrían presentar un problema de resonancia. Sin embargo, la frecuencia de resonancia de la mayoría de la lámparas está en la gama de 75 - 80 Hz y no interactuaría con la fuente de alimentación.

3.6.6 Medidores

Los voltímetros y amperímetros modernos que responden a valores rms, son relativamente inmunes a la influencia de la distorsión en la forma de onda. En tales medidores, la tensión o corriente de entrada se procesa usando un multiplicador electrónico. Las técnicas multiplicadoras más usadas son las de transductancia variable, log/antilog, división de tiempo, térmica y muestreo digital. Todas estas técnicas se pueden configurar para responder al valor rms de la tensión o de la corriente, independientemente de la amplitud armónica o de la fase, siempre que las armónicas estén dentro del ancho de banda de operación del instrumento y que el factor cresta de la forma de onda no sea excesivamente grande.

Los medidores que responden a valores promedio absolutos los cuales se calibran en rms, y los que responden a valores pico, también calibrados en rms, no son adecuados en presencia de la distorsión armónica. Por ejemplo, con una señal de onda senoidal cortada con ángulo de encendido de 45°, un medidor promedio, indicará un valor rms alrededor del 13% menor que el rms real. Un amperímetro como éste podría indicar que un conductor sobrecargado opera a su capacidad nominal.

Un medidor de demanda o energía ideal, debería medir proporcionalmente a la potencia activa. Los errores resultan de las características de frecuencia de los canales de tensión y corriente del medidor y de las no linealidades. La linealidad se degrada cuando el factor de potencia es bajo o las formas de onda tienen factores de cresta grandes.

En los wattmetros modernos, la multiplicación electrónica de la tensión y la corriente se realiza usando multiplicación por división de tiempo, muestreo digital y multiplicación, multiplicación térmica de un cuarto de cuadro, o translineal. Todas éstas presentan un funcionamiento excelente.

El wathorímetro de disco de inducción es el medidor de energía más usado. Su lectura está sujeta a errores debido a sus características de frecuencia y no linealidades. Se debe evitar la aplicación de un wathorímetro de inducción en puntos con ondas altamente no senoidales, debido a los errores de lectura y a la posibilidad de una falla o resonancia mecánica en la gama de 400-1000 Hz.

El wathorímetro de muestreo mide la energía a partir de muestras digitales de tensión y corriente. Como en todos los medidores de muestreo, el ancho de banda está limitado por la frecuencia de muestreo. El wathorímetro de muestreo comercial proporciona una respuesta de frecuencia esencialmente plana a frecuencias de entrada mayores a 1200 Hz (20a. armónica). Un muestreador de 12 bits ofrece un bit menos significativo equivalente al 0.024% a escala plena.

3.6.7 Efectos en Relevadores de Protección

La distorsión en la forma de onda afecta el funcionamiento de los relevadores pudiendo provocar que éstos operen inadecuadamente o que no lo hagan cuando se requieran. En la mayoría de los casos, la distorsión de la forma de onda de la corriente de la carga tiene poco efecto sobre la corriente de falla.

Sin embargo, para fallas de baja magnitud, la carga podría consistir de una gran parte de corriente de carga y entonces la distorsión se hace un factor significativo. Mas aún, el relevador debe funcionar adecuadamente aun con corrientes de carga distorsionadas.

Cada relevador funciona en forma diferente ante la presencia de distorsiones de onda. Modelos de distintos fabricantes del mismo tipo y modelo de un fabricante también podrían responder en forma diferente a la misma distorsión. La distorsión podría causar que un relevador no disparara bajo condiciones de falla, o hacer causar disparos imprevistos cuando no existe una falla. Variando el ángulo de fase entre la frecuencia fundamental y los componentes armónicos de una onda de tensión o de corriente, podría alterar significativamente la respuesta de un relevador. Para relevadores de entrada doble, el funcionamiento se podría ver afectado por la relación de fase entre las respectivas entradas armónicas. La mayoría de los estudios han concluido que es muy difícil predecir el comportamiento del relevador sin hacer pruebas. Los estudios publicados han evaluado relevadores electromecánicos y electrónicos, pero no hay información sobre los nuevos relevadores digitales.

3.6.8 Efectos en Máquinas Rotatorias

Las tensiones no senoidales aplicadas a máquinas eléctricas podrían causar sobrecalentamiento, pares pulsantes, o ruido. Además de las aplicaciones en línea, los controladores de velocidad de los motores se alimentan de inversores que pueden producir distorsiones de tensión significativas.

El sobrecalentamiento del rotor ha sido el principal problema asociado con la distorsión de tensión. Las pérdidas en las máquinas eléctricas dependen del espectro de frecuencia de la tensión aplicada. Las pérdidas parásitas y del núcleo pueden hacerse significativas en un motor de inducción con un rotor inclinado alimentado de un inversor que produce altas frecuencias armónicas. Un aumento en la temperatura de operación del motor causará una reducción de su vida de operación. Los motores monofásicos son los más afectados. El incremento de temperatura no es uniforme a lo largo del motor; se presentan puntos calientes cerca de los conductores dentro de las porciones del núcleo de acero. Si las armónicas varían con el tiempo, el motor puede tolerar mayores niveles pico de distorsión sin aumentar la temperatura de los puntos calientes. Esto es posible debido a que la constante de tiempo térmica del motor es mucho más larga que un período de la variación armónica.

Para evaluar la contribución de las diferentes pérdidas del motor a través de todo el espectro armónico, se pueden definir varios factores de pérdidas.

Las pérdidas armónicas también dependen de las características del motor. La impedancia de fuga del motor aumentará linealmente con la frecuencia armónica. Para reducir las corrientes armónicas con un inversor como fuente de tensión, se necesita una inductancia de dispersión grande. Por otro lado, los inversores como fuentes de corrientes inyectan corrientes armónicas al motor, y de esta forma, se prefiere una inductancia de distorsión pequeña para reducir las tensiones armónicas.

Los pares pulsantes se producen por la interacción entre el flujo del

entrehierro (principalmente la componente fundamental) y los flujos producidos por las corrientes armónicas en el rotor. Los motores de inducción de velocidad fija, se han diseñado tradicionalmente para colocar la velocidad de operación aproximadamente de 30-40% arriba de la primera velocidad mecánica crítica. Para controladores de motores de velocidad ajustable, es necesario un análisis de las velocidades de resonancias mecánicas, con objeto de evitar daños debidos a la amplificación de los pares pulsantes.

El ruido audible se produce por la diferencia entre las frecuencias armónicas en el tiempo. Por lo tanto, las altas frecuencias armónicas no audibles también pueden contribuir al ruido audible.

3.6.9 Efecto en las líneas Telefónicas (Interferencia)

La yuxtaposición de las líneas telefónicas con las eléctricas, crea oportunidades de interferencia a frecuencia industrial con las comunicaciones telefónicas. Ya que la sensibilidad del oído humano y la respuesta pico de teléfono está cerca de 1 kHz, las frecuencias armónicas del sistema pueden presentar mayores problemas que la frecuencia fundamental. La interferencia se puede expresar por diferentes medidas. Una de las medidas es el factor de influencia telefónico (TIF) que incorpora frecuencia, magnitud y factor de ponderación para la frecuencia. Una medida común es el producto IT el cual es el producto de la corriente rms y el TIF. Un producto IT de menos de 10,000 no debe causar problemas, mientras que otro mayor a 25,000 probablemente originé problemas de interferencia. Hay cuatro mecanismos de acoplamiento entre las líneas eléctricas y telefónicas. Uno es la inducción del circuito, en el

cual el campo magnético de las líneas eléctricas induce una tensión en el circuito formado por los dos conductores telefónicos. La práctica normal de la transposición de los conductores eléctricos o pares telefónicos trenzados limitan este mecanismo. El segundo mecanismo es similar al primero excepto que el circuito está entre el conductor telefónico y tierra.

La trayectoria a tierra se crea por las conexiones de tierra en los extremos opuestos del circuito. Ya que el área de éste puede ser muy grande, este mecanismo es el tipo más común de interferencia.

El tercer mecanismo es el acoplamiento capacitivo ente el conductor eléctrico y el telefónico. Las capacitancias entre conductores y entre conductores y tierra, forman un divisor de tensión para el potencial del conductor eléctrico. Los conductores monofásicos y la reactancia capacitiva reducida a frecuencias armónicas, aumentan la interferencia. El blindaje de los conductores telefónicos es efectivo para eliminar el acoplamiento capacitivo.

El último mecanismo, es el acoplamiento conductivo donde una elevación de potencial de tierra del neutro local se aplica al conductor telefónico aterrizado. Esto crea un potencial entre el punto de tierra elevado y el punto de tierra distante en el circuito telefónico. Una conexión defectuosa del neutro, podría causar una elevación anormal del potencial de tierra local, resultando en esta forma de interferencia.

3.6.10 Efecto en los Transformadores

El efecto primario de las armónicas del sistema de potencia sobre los transformadores, es el calor adicional generado por las pérdidas que provoca el contenido armónico de la corriente de carga. Otros problemas incluyen la posible resonancia entre la inductancia del transformador y la capacitancia del sistema, los esfuerzos en el aislamiento mecánico (devanados y laminación) debido a los ciclos de temperatura y posiblemente pequeñas vibraciones del núcleo.

El calentamiento adicional requiere de una reducción en la capacidad de carga para quedar dentro del rango de temperatura del transformador, o usar transformadores para corrientes de carga no senoidales. La vida del transformador se reducirá como resultado de la operación a temperaturas mayores a la nominal. Los componentes de las pérdidas primarias son las pérdidas I^2R en el devanado, las pérdidas por corriente eddy en el devanado y las pérdidas parásitas de flujo electromagnético en áreas tales como los devanados, el núcleo, ensambles de mordazas y tanque. Las pérdidas del componente I^2R se deben al calentamiento en el conductor y al efecto pelicular. Las pérdidas por corrientes de eddy en el devanado aumentarán con el cuadrado de la corriente de carga y de la frecuencia. Otras pérdidas parásitas también aumentarán con la frecuencia aun con una potencia ligeramente menor de dos.

Varias normas IEEE establecen lineamientos sobre la carga y cargabilidad de los transformadores. Los criterios de carga se basan en los límites del factor de distorsión de la corriente de carga 0.05 p.u. como lo estipula IEEE/ANSI C57.12.00-1987 y C57.12.01-1989.

La norma IEEE/ANSI C57.110-1986, "Práctica Recomendada por el IEEE para Establecer la Capacidad de Transformadores Cuando Suministran Corrientes de Carga no Senoidales", reconoce que las corrientes de carga en muchos casos, exceden el límite del factor de distorsión de 0.05 p.u. Esta norma delinea dos métodos para determinar la capacidad del transformador sin pérdida de la vida normal esperada. Ambos métodos requieren el conocimiento de las características de la corriente de carga. El primer método requiere datos detallados del diseño del transformador y el segundo confía en los datos disponibles en los reportes de prueba certificados.

Ambos métodos se basan en la premisa de que todas las pérdidas parásitas resultan de las corrientes de eddy en los devanados y que estas pérdidas se incrementan con el cuadrado de la corriente y la frecuencia. Las pérdidas por corrientes de eddy en por unidad en los devanados, se expresan como:

$$P_{ec} = P_{ec-r} \sum I_n^2 n^2 \quad n=1, 2, 3, 4, \dots \quad (3.2)$$

donde:

P_{ec} = pérdidas por corrientes de eddy en los devanados (por unidad de las pérdidas nominales (I^2R)).

P_{ec-r} = pérdidas por corrientes de eddy en los devanados a carga y frecuencia nominales (por unidad de las pérdidas nominales (I^2R)) I^2R .

I_n = corriente rms de la *n*-ésima armónica (por unidad de la corriente de carga nominal rms).

n = orden de la armónica.

Se ha mostrado que la ecuación anterior es válida para armónicas de bajo orden hasta la novena⁵. Sin embargo, para las armónicas de orden 11 hasta 25, las pérdidas varían con n a la potencia de 1.94 a 1.98.

Las normas actuales delimitan niveles de sobretensión de los transformadores sobre una base rms en estado estable rms. La máxima sobretensión es del 5% a carga nominal y de 10% en vacío. Estos límites incluyen cualquier contribución que resulte de la distorsión armónica de la forma de onda.

La carga de los transformadores conectados en delta podría ser errónea debido a la circulación de las corrientes de tercera armónica. Las corrientes de carga de tercera armónica balanceadas (3a, 6a, 9a., etc.) circularán en la conexión delta de un transformador y no aparecerán en los conductores primarios.

Consecuentemente, las mediciones de corriente en el primario no reflejarán la carga real de los transformadores. Las cargas electrónicas monofásicas son ricas en corrientes de tercera armónica y los transformadores trifásicos que alimenten estas cargas son susceptibles a esta condición.

⁵M.S. Hwang, W.M. Grady, and H.W. Sanders, Jr., "Distribution Transformer Winding Losses Due to Nonsinusoidal Currents," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-2, Jan. 1987, pp. 140-146.

3.7.11 Efectos en los Convertidores de Potencia Estáticos

Los dispositivos estáticos de conversión de potencia generan armónicos como resultado de su función.

En algunas situaciones, son afectados por las armónicas generadas por ellos o que provienen de otras fuentes, generalmente, la otra fuente de armónicas es de un convertidor similar o idéntico que tiene que estar en paralelo con la fuente de CA.

Por otra parte existen convertidores que dependen de las características del voltaje de la fuente CA para control. Si la fuente es severamente distorsionada por armónicas, los convertidores fallan; conmutan mal o generan armónicas.

3.7 RESONANCIA

La resonancia es consecuencia del comportamiento conjunto de diferentes elementos reactivos de la red (inductancias y capacitancias). Ello supone un incremento, a veces muy notable, de la impedancia a ciertas frecuencias. La importancia de este fenómeno, desde la óptica de las armónicas, se debe a que corrientes armónicas pequeñas inyectadas por un elemento perturbador pueden dar lugar a tensiones elevadas al llegar a ser la impedancia correspondiente varias veces superior a lo normal.

Los elementos reactivos que originan la resonancia son los

transformadores (inductancias) y los bancos de condensadores (capacitancias). También tienen influencia, en ciertos casos muy importante, las líneas de alta tensión y las propias cargas (inductivas o capacitivas).

Las condiciones de resonancia del sistema son los más importantes factores resultantes de los niveles de armónicas. No se tendrán problemas de resonancia, cuando el sistema tenga la capacidad de absorber significativas cantidades de corrientes armónicas. Los problemas surgen cuando las corrientes armónicas fluyen por una alta impedancia, como en el caso de la resonancia en paralelo, donde se produce distorsión significativa de voltaje y aumento de corriente. Esto es importante para analizar las características de la respuesta a la frecuencia del sistema y para prevenir problemas de resonancia en el sistema.

Algunos conceptos con respecto a la resonancia son:

Cuando un banco de capacitores grande es la principal fuente de compensación de potencia reactiva y se encuentra conectado en paralelo con el sistema, puede provocar diferentes frecuencias de resonancia, además si son interrumpidos, las características de resonancia del sistema llegan a ser más difíciles de determinar.

Por otra parte se debe tener presente que el amortiguamiento suministrado por las cargas en sistemas de distribución, es el factor que previene condiciones de resonancia y evita problemas significativos.

La carga del sistema tiene dos efectos para las características de la

respuesta a la frecuencia del sistema:

- La componente resistiva: es un factor importante en la resonancia del sistema, ya que ofrece una menor impedancia que la de una resonancia en paralelo, cuando están juntos.

- Cargas del motor y otras cargas dinámicas: contribuyen en la capacidad de cortocircuito del sistema, pero no proporcionan amortiguamiento significativo en resonancias.

La reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia:

$$X_L = 2\pi fL$$

así la corriente decrece con el aumento de la frecuencia de voltaje constante, resulta también que la caída de voltaje en la fuente principal debido a la inductancia será tan alta como el rango de la armónica presente.

Mientras que la reactancia capacitiva disminuye cuando la frecuencia aumenta:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

3.7.1 Resonancia en Paralelo

La resonancia en paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva del sistema conectada en paralelo con la reactancia capacitiva son iguales en alguna

frecuencia armónica. La corriente armónica excita el circuito tanque (conocido como circuito LC), causando una corriente amplificada que oscila entre la energía acumulada en la inductancia y la energía en la capacitancia, ver figuras 3.2 y 3.3.

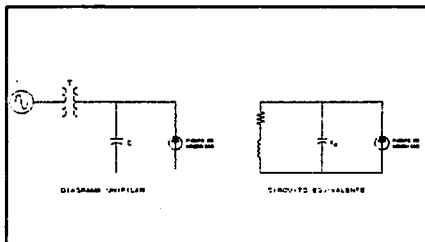


Figura 3.2 Resonancia en paralelo de capacitores con la impedancia de la fuente de suministro.

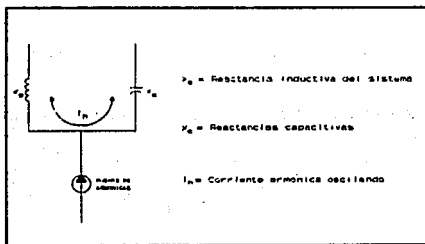


Figura 3.3 Resonancia en paralelo entre reactancias capacitivas y la reactancia inductiva del sistema.

Esta alta corriente de oscilación causa distorsión en el voltaje e interferencia en teléfono.

3.7.2 Resonancia en Serie

La resonancia en serie es un resultado de la combinación de un banco de capacitores y las inductancias de la línea o transformadores, ambos conectados en serie.

La resonancia serie se produce al circular corrientes armónicas cuya frecuencia origina que $X_L = X_C$, donde la corriente esta limitada solo por la resistencia del cableado de la fuente y como éste es usualmente bajo, el valor de la corriente será alto creando un sobrevoltaje muy elevado que fluye a través del capacitor y del circuito, ver figura 3.4.

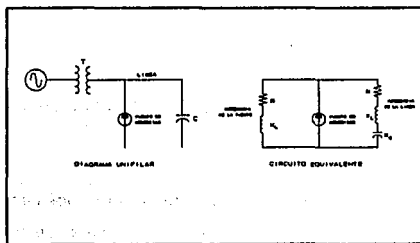


Figura 3.4 Resonancia en serie debido al capacitor y la impedancia de la línea.

Por otra parte cuando la línea esta cargada, es posible disminuir la sobretensión, ya que la impedancia de la carga es menor en comparación con X_C , como lo indica la figura 3.5.

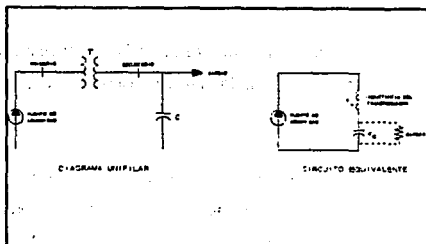


Figura 3.5 Resonancia en serie, considerando cargas.

Por último se debe tener contemplado que cuando un capacitor permanece conectado a la red con muy poca carga puede provocar una resonancia severa.

3.8 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN SISTEMAS AÉREOS

Cuando las descargas inciden directamente en los circuitos aéreos, bien sean conductores de fase, hilos de guarda o postes, se producen tensiones transitorias excesivas en el sistema. Aunado a esto, las descargas que inciden cerca de un poste también pueden inducir tensiones excesivas en la línea, que finalmente causan flameos. Las tensiones transitorias viajan a lo largo de las

líneas y pueden causar fallas de aislamiento en el equipo conectado a ellas si no se han protegido adecuadamente.

Cuando la punta de una descarga atmosférica hace contacto con una línea aérea, el flujo de carga negativa fluye de la descarga a la línea. Esta carga fluye primero de las porciones más bajas y después de las más altas de la columna de descarga. El efecto es el mismo que si la carga positiva fluyera hacia la descarga y neutralizara su carga negativa. La región en que se efectúa la neutralización se desplaza de manera ascendente a una velocidad aproximada equivalente a un tercio de la velocidad de la luz. A esta descarga se le conoce como "descarga de retorno" y alcanza valores cresta de 1 000 a 200 000 amperes en tiempos que fluctúan de menos de un microsegundo a más de 10 microsegundos. La probabilidad de ocurrencia y el tiempo necesario para alcanzar el valor máximo de estas descargas se muestran en las figuras 3.6 y 3.7.

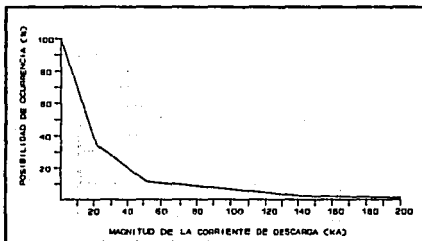


Figura 3.6 Distribución de la magnitud de la corriente de descarga.

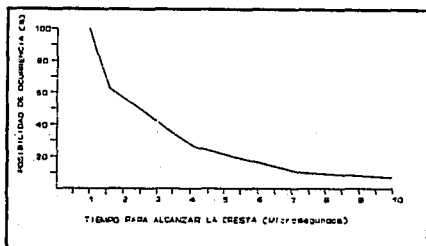


Figura 3.7 Distribución del tiempo necesario para alcanzar el valor cresta.

La magnitud de las corrientes de las descargas atmosféricas depende de la energía concentrada en las nubes y la diferencia de potencial que existe entre éstas y tierra. Cientos de mediciones efectuadas de magnitudes de estas corrientes en líneas de transmisión afectadas por descargas atmosféricas han permitido resumir los valores que se presentan en la tabla 3.1.

Porcentaje	Amperes
0.1	200 000
0.7	100 000
5.0	60 000
50.0	15 000

Tabla 3.1 Distribución de las magnitudes de corriente de descargas atmosféricas.

La incidencia de una descarga, por ejemplo de 12 000 amperes en un circuito de distribución como el que se muestra en la figura 3.8, causa

sobretensiones extremadamente altas entre conductores de fase y de fase a tierra. Si se considera que no hay flameo en el punto de descarga, la corriente se dividirá en dos, dirigiéndose 6 000 amperes hacia la derecha y 6 000 a la izquierda. Cuando esta corriente fluye a través de una impedancia característica de 400 ohms producirá una onda viajera de tensión de 2400 kV a tierra. Debido al acoplamiento que existe, los conductores adyacentes tendrán ondas de tensión entre un tercio y un cuarto de ese valor a tierra.

La diferencia de potencial entre conductores excede la resistencia de aislamiento entre conductores por un amplio margen. Sin embargo, la existencia de flameos entre conductores a mitad del claro es rara, y esta es la razón por la que se explica con ayuda del fenómeno conocido como "corriente de predescarga".

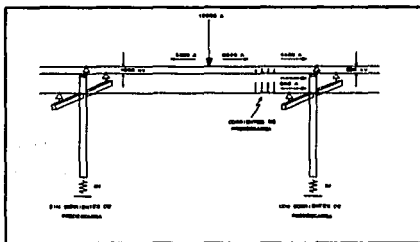


Figura 3.8 Tensión entre líneas de fase con y sin corrientes de predescarga.

En esencia, el fenómeno es la transferencia de corriente del conductor en que se inició la descarga y los conductores adyacentes, en cantidades tales que la diferencia de potencial entre ellos se reduce a valores que requieren tiempos mayores para producir el flameo. Estos tiempos son lo suficientemente grandes para permitir que las reflexiones regresen de los puntos de reflexión y disminuya el esfuerzo eléctrico. La transferencia de corriente ocurre principalmente en una zona de 30 a 70 m del punto de incidencia de la descarga atmosférica. Debido a la predescarga la corriente no fluye sólo en el conductor alcanzado por el rayo sino también en los otros conductores. Cuando estas ondas viajeras de tensión y de corriente llegan a un poste que tiene una conexión a tierra, por ejemplo un hilo de guarda o un apartarrayos, y considerando que la descarga atmosférica incidió en un hilo de guarda o en un conductor de fase con apartarrayos, finalmente la tensión en el conductor alcanzado por el rayo será menor que en los conductores que no tienen conexión a tierra. Se puede afirmar que el efecto de predescarga en la línea ha sido el de suprimir la sobretensión en el punto de incidencia del rayo y concentrarla en el poste conectado a tierra más cercano.

Por supuesto, los postes son el punto más adecuado para instalar apartarrayos en los conductores de fase del circuito, de tal manera que las sobretensiones se limiten a los valores de descarga de los apartarrayos y que éstos se coordinen adecuadamente con las características al impulso del sistema de aislamiento de la línea. De hecho, esta es la mejor forma de proteger circuitos aéreos.

3.9 EQUIPO INDUSTRIAL AFECTADO POR DEPRESIONES DE VOLTAJE

Los voltajes que se experimentan durante una condición de depresión dependerán de la conexión del equipo.

<i>Conexión del transformador</i>	<i>Voltaje mínimo</i>	<i>Voltaje mínimo</i>
	<i>fase a fase %</i>	<i>fase a neutro %</i>
Estrella Aterrizada - Estrella Aterrizada	58.0	0.00
Estrella Aterrizada - Estrella	58.0	0.00
Estrella - Estrella	58.0	33.0
Estrella - Estrella Aterrizada	58.0	33.0
Delta - Delta	58.0	33.0
Estrella - Delta	33.0	-
Estrella Aterrizada - Delta	33.0	-
Delta - Estrella Aterrizada	33.0	58.0
Delta - Estrella	33.0	58.0

Tabla 3.2 Voltajes mínimos en el secundario con falla a tierra en el primario del transformador.

La tabla 3.2 muestra que los voltajes de fase a neutro individuales y los fase a fase durante condiciones de falla monofásica pueden ser muy diferentes entre sí. Algunas cargas monofásicas no se afectarán mientras que otras saldrán de servicio, aún cuando su sensibilidad a depresiones de voltaje sea idéntica.

Las diferentes categorías de equipo e incluso las diferentes marcas de equipo dentro de una misma categoría (por ejemplo dos modelos diferentes

controladores de velocidad) tienen diferencias significativas en cuanto a su sensibilidad a depresiones de voltaje. Esto hace difícil desarrollar un estándar único que defina la sensibilidad del equipo en procesos industriales.

Las curvas reportadas en la literatura especializada, limitadas todavía a equipo procesador de datos, muestran que la sensibilidad al voltaje es muy dependiente de la duración de la depresión del mismo. Las depresiones permitidas van desde 0% de voltaje durante 1/2 ciclo hasta el 87% de voltaje durante 30 ciclos.

En realidad, las características operacionales del equipo industrial varían durante estas depresiones de voltaje. Algunos ejemplos son:

- Contactores de motores y relevadores electromecánicos. Los datos proporcionados por un fabricante indican que su línea de contactores para motores se dispara al 50% el voltaje si la condición permanece por más de un ciclo. Estos datos variarán entre fabricantes y algunos contactores se disparan al 70% del voltaje nominal.
- Lámparas de alta intensidad. Las lámparas mercurio se extinguen aproximadamente al 80% de su voltaje nominal y requieren de algún tiempo para volver a prenderse. Una depresión de voltaje que extingue una lámpara de alta intensidad es interpretada en ocasiones como una interrupción de larga duración.

- **Controladores de velocidad.** Algunos controladores están diseñados para soportar las depresiones de voltaje. Esta capacidad de soporte puede ser de 0.05 segundos (3 ciclos) a 0.5 segundos (30 ciclos), dependiendo del fabricante y del modelo. Otros modelos se disparan con una depresión del voltaje al 90%, detectada por 50 mseg (3 ciclos).
- **Controladores lógicos programables.** Se trata de una categoría importante de equipo para procesos industriales, porque el proceso completo está bajo el control de estos dispositivos. Aunque la sensibilidad a depresiones de voltaje varía entre las diferentes partes de los controladores, se ha encontrado, por ejemplo, que las unidades remotas de entrada/salida se disparan con voltajes tan altos como el 90% del valor nominal durante unos cuantos ciclos.

La amplia gama de sensibilidades subraya la importancia de trabajar con el fabricante para asegurarse que el equipo puede trabajar en un medio ambiente adecuado.

3.10 EFECTOS DE LOS DESEQUILIBRIOS

- Calentamiento indebido en máquinas rotatorias (aparición de un campo inverso debido a la corriente inversa generada por la asimetría).
- Aumento de pérdidas en las líneas de distribución.

Los receptores sensibles a estos efectos son:

- **Motores asíncronos (disminución del rendimiento).**
- **Alternadores.**
- **Rectificadores.**
- **Equipos de control de regulación de tensión.**



SOLUCIONES

4.1 INTRODUCCIÓN

Los problemas de calidad de energía se encuentran dentro de un amplio rango de características y por lo mismo se dificulta resumir y dar prioridad a áreas de investigación específicas sobre este tema. Dentro de estas áreas de investigación para dar solución a los problemas de calidad de energía se encuentran:

- Nuevas eficientes formas de regulación de voltaje - especialmente con rápida respuesta de tiempo.
- Diseño óptimo de filtros pasivos.
- Teoría y diseño práctico de filtros activos.
- Soluciones con electrónica de potencia a problemas de calidad de energía.
- Eficiente acondicionamiento de energía.

En este capítulo se presentan algunos de ellos, además de presentar algunas soluciones desde el punto de vista de instituciones como IEEE y EPRI.

4.2 CONTROL DE VOLTAJE DE LA COMPAÑÍA

El control de voltaje sobre un sistema de distribución es realizado a través del uso de reguladores, carga con cambiadores de TAP (LTC's) y capacitores en paralelo (para corrección del factor de potencia). La carga con cambiador de tap es funcionalmente equivalente a un regulador de voltaje; sin embargo proporciona control de voltaje para varios circuitos.

El control de voltaje de la compañía a la carga del usuario no es instantánea y no asegura un voltaje constante, pero simplemente mantiene el voltaje entre algunos límites deseados. Aunque el utilizar regulación de voltaje normal puede ser efectivo para cambios de voltaje graduales, ello tiene pequeños efectos sobre voltajes transitorios u oscilaciones.

Los reguladores de voltaje operan típicamente con un tiempo de retardo

de 30 o 45 segundos, ello permite una condición de alto o bajo voltaje que persiste mientras no se tome una acción correctiva.

El control para un regulador de voltaje básicamente sostiene un nivel de voltaje particular dentro de un ancho de banda (típicamente $\pm 0.625\%$ ó ± 0.75 V sobre una base de 120 V). Para corregir un voltaje anormal, el control regulador debe detectar un voltaje fuera de los límites de un ancho de banda para una duración mayor que el tiempo de retardo puesto.

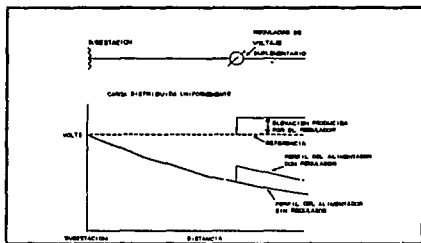


Figura 4.1 Perfil del voltaje con regulador de voltaje.

Para pequeños alimentadores de distribución es totalmente probable, que voltajes estandar de estado estable puedan ser encontrados por usar solo el equipo de control de voltaje en la subestación de la compañía, esto es, LTC's ó reguladores. Sin embargo, para alimentadores grandes o alimentadores con cargas extremadamente fuertes o grandes, podría ser necesario aumentar el equipo de la subestación con reguladores de voltaje localizados afuera sobre el alimentador (ver figura 4.1).

Además de los reguladores de voltaje y LTC's, la mayoría de las compañías eléctricas emplean bancos de capacitores en paralelo para ayudar al control del perfil del voltaje del alimentador. Como los capacitores suministran energía reactiva (VARS) al circuito, esto efectivamente reduce y contrarresta los VARS requeridos de cargas inductivas, tal como motores.

Los capacitores en paralelo colocados estratégicamente sobre el alimentador no solo mejoran el perfil del voltaje, sino también reduce las pérdidas resistivas asociadas con el alimentador primario y laterales aunque mejorando el factor de potencia.

La figura 4.2 ilustra el mejoramiento en el voltaje obtenido por la conexión de un banco de capacitores a un alimentador primario. Con el capacitor conectado, el perfil de voltaje será ajustado como se muestra.

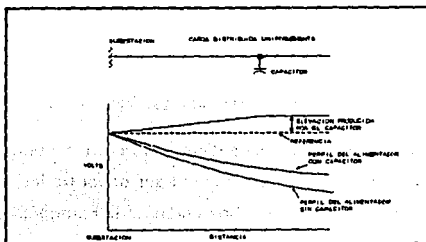


Figura 4.2 Perfil del voltaje con capacitores en paralelo.

A fin de adaptarse satisfactoriamente a las condiciones de variación de la carga, la mayoría de los bancos de capacitores son activados a dentro y fuera de servicio automáticamente. Este cambio puede crear problemas transitorios para cargas sensitivas.

Además de estos métodos tradicionales de control de voltaje uno de los mas recientes es el compensador de var estático. Este consiste de una combinación de capacitor y reactor que es conmutado por tiristores para controlar la salida reactiva. Estos son usados típicamente para bloques grandes de energía reactiva y han sido aplicados en conjunto con hornos de arco cargados. De este se hablará mas adelante en este capítulo.

4.3 COMPENSADOR DE VAR ADAPTIVO (Adaptive Var Compensation (AVC))

Desde el punto de vista de energía reactiva, la compensación de var adaptivo es representativo de un área fértil para investigaciones de calidad de energía. Un compensador de var adaptivo es un banco de capacitores activado electrónicamente, el cual, es usado para disparos muy rápidos de energía reactiva (menos que un ciclo). En 1987 fueron diseñados y construidos dos prototipos (con capacidades de 480 V, 50 kVAR y de 480 V, 300 kVAR) e instalados en el Devers and Tehachapi Windparks en Estados Unidos. Ambas unidades registraron más de 1000 horas de operación satisfactoria.

El AVC compensa cada fase independientemente y su diseño de operación elimina condiciones resonantes. Durante el periodo de 1987 a 1991 tres

unidades más fueron diseñadas y construidas. La unidad original de 300 kVAR fué reacondicionada y ha estado en operación continua por casi un año en el hospital de la Universidad de Washington en Estados Unidos. Un grupo de motores de inducción en una torre de cuatro elevadores fue creando problemas con la calidad de la energía para algunas de las cargas críticas en el hospital, y las multas por factor de potencia en las cuentas fueron excesivas. Con el desarrollo de un avanzado controlador y software, el dispositivo puede funcionar igual o mas que un controlador de factor de potencia adaptivo. Este es capaz, además, de operar en modo de control de voltaje, manualmente ó sobre un regulador. Por lo tanto el dispositivo fué renombrado como Compensador de Var Adaptivo (AVC) para reflejar su versatilidad.

La figura 4.3 muestra una respuesta típica de un AVC: Esta respuesta es para la subestación Nelson Goodyear en Estados Unidos. El AVC es energizado en alrededor de un tiempo igual a 7 horas. Notar que las líneas del AVC a causa de los requerimientos de energía reactiva de la carga, la energía reactiva del sistema da virtualmente cero.

La importancia de aplicar métodos con electrónica a problemas de calidad de energía se observa con el AVC. Para un proyecto del Hospital de la Universidad de Washington, el AVC estabilizó el voltaje y corrigió completamente el factor de potencia para ese alimentador. Además equipo de gran capacidad fué cambiado de esta instalación para eliminar la necesidad de mejorar un panel de subestación y su bus de trabajo asociado. Además, las cargas del alimentador pueden ahora ser servidas con uno y solo uno de dos transformadores en la subestación.

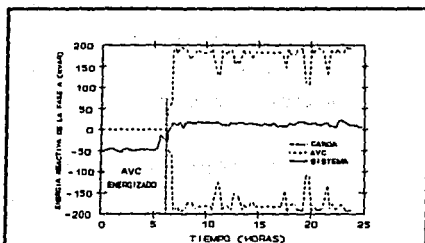


Figura 4.3 Características de energía reactiva de la subestación Goodyear Nelson (carga de un aserradero).

4.4 SOLUCIONES CON ELECTRÓNICA DE POTENCIA

La aplicación general de dispositivos de electrónica de potencia para aumentar la calidad de energía también es un área fértil de investigación. Estas aplicaciones incluyen filtros activos, regulación electrónica de voltaje, supresión electrónica de impulsos, eliminadores de frecuencia para aplicaciones de protección de sistemas de potencia, y un controlador de dispositivos, los cuales permiten control de flujo de potencia. A causa de que el equipo basado en electrónica de potencia está compuesto de elementos que actúan con el control y reestructuración de energía eléctrica usando dispositivos semiconductores de energía, estos dispositivos pueden causar problemas con calidad de energía y ayudar a resolverlos si son aplicados correctamente. La electrónica de potencia puede causar problemas a causa de la inherente no linealidad asociada con los elementos semiconductores y por las operaciones de conexión y desconexión

involucradas en su uso. La electrónica de potencia puede también proporcionar soluciones para problemas con calidad de la energía porque los elementos pueden ser configurados y controlados muy precisa y rápidamente para mitigar alteraciones de la forma de onda de corriente y voltaje.

Una gran variedad de soluciones para resolver problemas con calidad de la energía han sido propuestas, pero en general estas soluciones pueden ser clasificadas por las siguientes técnicas de mitigación de armónicas: multiplicación de fase, filtros pasivos y activos, inyección armónica, técnica de modulación amplia de pulsos. La esencia de la metodología de multiplicación de fase es el traslado de armónicas a muy altas frecuencias y la consecuente reducción de la amplitud de estas armónicas. Los filtros activos y pasivos ofrecen un arreglo de corrección del factor de potencia y beneficios del lado del control, pero un método óptimo y coordinado de diseño de estos dispositivos no existe y resulta un área importante de explotar para sistemas de investigación. La técnica de inyección de armónicas es usada en particular porque la impedancia del sistema no toma parte en el criterio de diseño y este método puede ser usado para compensar armónicas no características. Sin embargo, el esquema de inyección de armónicas necesita un generador de corriente armónica y la nulificación de más de un orden de armónica en cualquier punto de operación se dificulta. El método de modulación amplia de pulsos se presenta como una gran promesa y es capaz de obtener supresión de armónicas a menos de 1% de la fundamental. También el método puede ser programable para eliminar armónicas específicas, esta es un área que está en su primera etapa de desarrollo e investigación fundamentalmente.

4.5 SOLUCIONES EN EL LADO DEL USUARIO SEGÚN EPRI

Como se ha visto una variedad de opciones técnicas están disponibles para corregir problemas de calidad. La elección de cual usar, y si emplearlo al lado del usuario o al lado de la compañía eléctrica, depende en gran parte de las circunstancias específicas, pero investigaciones hechas hasta la fecha han proporcionado algunas importantes líneas de guía.

La mayoría de los disturbios de energía menores en edificios comerciales pueden ser remediados haciendo mejoras en la instalación eléctrica y en el sistema de aterrizamiento. Las cargas sensitivas y las cargas eléctricamente "sucias o malas", por ejemplo, pueden ser aisladas en ramas de circuitos dedicados a minimizar interferencia.

Debe tenerse cuidado de prevenir anomalías de energía a causa de pasar entre este tipo de circuitos cables del neutro o conexiones a tierra. La National Electric Code estipula que la malla de tierra de un edificio comercial se conectará a tierra en la entrada del servicio de la compañía eléctrica. Sin embargo, pueden surgir problemas si las conexiones son hechas dentro de una instalación entre los cables neutro y la malla de tierra, creando conexiones accidentales entre las cargas y permitiendo corrientes dispersas que causan perturbaciones.

En muchas plantas industriales, los controladores de velocidad ajustable requieren consideración especial puesto que ellos son una fuente principal de algunos problemas de calidad de la energía especialmente armónicas y son particularmente susceptibles a otros, tal como sobretensiones y caídas de

voltaje.

Los controladores de velocidad [Adjust-Speed Drives (ASD's)] trabajan primero rectificando a frecuencia constante y voltaje constante la energía de CA a CD y después invirtiendo esta energía CD para crear una salida de frecuencia variable y voltaje variable CA. Este proceso provoca distorsiones de voltaje armónicas que retornan dentro de la línea, donde ellas pueden interferir con cargas electrónicas sensitivas. En cambio la sección de corriente directa de un controlador es particularmente susceptible a sobrevoltajes momentáneos que llegan de fuera.

En general las armónicas causadas por ASD's no son un problema a menos que estos dispositivos sean una parte principal de la carga alimentada por un transformador del usuario. Pero si en el lugar tambien existen capacitores para corrección del factor de potencia, el circuito resonante que resulta puede agrandar el efecto de una frecuencia particular de armónicas. La investigación de EPRI ha verificado que una solución costo-efectiva a este problema es la instalación de filtros de línea para grandes ASD's y motores para reducir la magnitud de distorsión armónica. Por el contrario, para prevenir disparos imprevistos de pequeños ASD's en respuesta a voltajes transitorios del exterior, los cuales tambien pueden ser aun mas complicados a causa de colocar capacitores para corrección del factor de potencia, un pequeño inductor (regulador) puede ser colocado en serie sobre una línea para reducir sobrecorrientes.

Algunas veces, sin embargo, una tecnología mas sofisticada es necesaria

para resolver problemas con calidad de la energía en base a los requerimientos del usuario, y los estudios de EPRI han indicado una particular necesidad de dispositivos acondicionadores de energía capaz de proporcionar protección integrada en contra de múltiples generos de energía eléctrica. En respuesta a esta necesidad EPRI ha trabajado con Public Service Electric & Gas Company (PSE & G) y Westinghouse Electric Corporation para desarrollar un acondicionador de energía activa (APLC), el primer dispositivo para combinar filtro de armónicas activo, regulación de voltaje de línea y protección contra sobretensión de voltajes transitorios en una sencilla unidad compacta. Una versión monofásica de 5 KVA del APLC fué comercializada a finales de 1992, y versiones de 50 KVA y 150 KVA trifásicas estan ahora también disponibles. Otros productos de la familia de los APLC será ofrecida en un futuro cercano.

En lugar de usar circuitos de filtros pasivos convencionales, los cuales eliminan solo armónicas específicas de una línea, los circuitos de electrónica de potencia del APLC automáticamente adaptan cambios en el espectro de armónicas e inyectan activamente señales dentro de una línea para cancelar los disturbios. Este método elimina la necesidad de calcular que corrientes armónicas serán probablemente las que esten presentes o que filtros utilizar cuando cambien las condiciones de la carga. Además el APLC regula la entrada de voltaje para así compensar caídas de voltaje y sobretensiones sobre la línea de la compañía. Como el dispositivo de 5 KVA en tamaño es aproximado al de una computadora personal y no es muy pesado (alrededor de 60 Kg), puede ser fácilmente instalado para proteger cargas sensibles.

Una de las primeras demostraciones de un APLC tuvo lugar en una planta

farmacéutica en la zona de servicio de PSE&G, donde la distorsión de armónicas producida por ASD's interfirió con la operación controlada por computadora de el Laboratorio de Control de Calidad de la Planta. Los problemas de este género que habían interrumpido las operaciones de la planta varias veces en un mes, fueron completamente eliminadas através de la instalación de un prototipo del APLC. Durante la prueba a lo largo de todo el año, el dispositivo también mantenía la calidad de la energía para el laboratorio durante una tormenta severa particularmente.

El Gerente Investigador Ben Banerjee de la División de Sistemas al Cliente de EPRI dice: "El APLC proporciona una solución de bajo costo para varios generos de problemas de calidad de energía; se estima que la tecnología del APLC podría ahorrar a los clientes de la compañía mucho dinero en los próximos 5 años. Además se están realizando esfuerzos sobre como incorporar capacidad de almacenamiento de energía dentro del APLC para posibilitar el soporte de interrupciones de energía cortos sin afectar la operación de cargas sensibles".

También se está trabajando sobre una variedad de otros dispositivos de calidad de energía para aplicaciones de uso final. Un ejemplo es un filtro híbrido que añade una serie de elementos activos en un filtro pasivo existente y controla las armónicas ajustando activamente impedancias en serie. La compañía de Servicio Eléctrico de Nueva Inglaterra está demostrando un prototipo de filtro híbrido en una aplicación de un ASD de 800 Hp en una planta de tratamiento de aguas negras. Otro ejemplo es un avanzado centro de carga de estado sólido para instalaciones comerciales e industriales, el cual integrará una variedad de funciones de control relacionadas a calidad de energía,

Incluyendo monitoreo de carga, switcheo de carga rápido, y protección contra corrientes de falla y sobrevoltajes. También están bajo investigación avanzados conceptos de UPS que represente nuevos medios de almacenamiento de energía, tal como ruedas flotantes y super-capacitores. Y una nueva generación de ASD's está siendo desarrollada, la cuál reducirá armónicas y será más capaz de liberarse durante disturbios de energía. Wade Malcolm, Gerente de la División de Sistemas al Cliente en el programa de Control y Electrónica de Potencia dice: " Este aumento en el conjunto de tecnologías de calidad de energía dará a las compañías y a sus clientes más flexibilidad en ubicar disturbios de energía, además nosotros estamos trabajando con fabricantes de equipo para incorporar capacidad de acondicionamiento de energía dentro de sus productos".

4.6 SOLUCIONES EN EL LADO DE LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA SEGUN EPRI

Mientras tanto EPRI está también desarrollando avanzada tecnología para ser usada por compañías eléctricas para mejorar en general la fiabilidad de los sistemas de distribución y mantener los problemas de calidad de energía que se originan sobre sistemas de distribución sin llegar a los usuarios. Esta tecnología, la base para un concepto EPRI llamado "Energía al Cliente", involucra una combinación de controladores con electrónica de potencia, distribución de equipo de automatización y un protocolo de comunicaciones integrado, los cuales posibiliten a las compañías cubrir las necesidades de usuarios comerciales e industriales con cargas sensitivas. El servicio de "Energía al Cliente" probablemente será ofrecido inicialmente a usuarios individuales grandes o a grupos de pequeños usuarios en parques industriales. Vasu Tahillani, Gerente

del Programa de Distribución de Energía al Cliente dice: "Los problemas de calidad de energía pueden ser generalmente categorizados dentro de dos grupos. Un grupo incluye distorsiones de forma de onda que usualmente se originan sobre las necesidades del usuario y pueden ser resueltas ahí mismo. El otro grupo incluye interrupciones de energía y caídas de voltaje que se originan sobre el sistema de distribución. " Energía al Cliente " dará a las compañías eléctricas nuevas opciones para superar este segundo grupo de problemas y proveer a los usuarios alta calidad de energía. Creo que esto puede ser algunas veces el método más bajo en costo, aunque problemas específicos tienen que ser tratados caso por caso".

La configuración de "Energía al Cliente" utilizará controladores con electrónica de potencia en una subestación con dos alimentadores de distribución independientes para proporcionar energía ininterrumpible esencialmente, mejorando la energía de los usuarios. En el caso de una interrupción de flujo de energía sobre un alimentador, un interruptor de estado sólido [Solid-State Breaker (SSB)] cambiará sobre el otro alimentador reduciendo el tiempo de corte para una falla en un ciclo o menos. Mientras tanto, un condensador estático (STATCON) tomará un voltaje constante y suministrará energía momentánea hasta que la carga del usuario se estabilice, esencialmente sin ser afectada por el alimentador que conmutó.

Los dos controladores de energía al usuario básicos descritos, están siendo desarrollados para EPRI por Westinghouse Science and Technology Center. Los prototipos SSB y STATCON están siendo diseñados para ser usados actualmente, disponibles con tiristores con compuerta para sistemas de

distribución de 15 KV. Las versiones a escala para Laboratorios de ambos dispositivos estan siendo construídos y puestos a probar para verificar el concepto de factibilidad. La prueba en campo, en compañías, de los prototipos de tamaño normal se espera comienze a finales de 1994 o principios de 1995. Las versiones comerciales de los controladores se espera esten listos para el mercado en 1995 o 1996. Los SSB tienen varias ventajas sobre los interruptores de circuito mecánico que ahora son comúnmente usados en sistemas de distribución. No solo puede un SSB reaccionar mucho mas rápido que su contraparte mecánica, sino que puede tambien ser usado repetidamente sin degradar su ejecución, mientras que un interruptor de circuito convencional tiene que ser restaurado despues de un uso repetido. Cada SSB tiene tiristores que conducen corriente de carga normal e interrumpen con corrientes de falla excesivas. Un descargador de sobretensión en paralelo con el tiristor se activa, proporcionando protección contra sobrevoltajes transitorios que se desarrollan durante fallas. Además como su objetivo es proporcionar energía con una calidad óptima, los SSB's permitirían a las compañías operar sus sistemas de distribución al incrementar la capacidad de cortocircuito y ejecutar sus principales cargas automatizadas en forma más eficiente.

Un STATCON es conectado en paralelo entre una línea de distribución y tierra, soporta voltajes en la línea intercambiando energía con la línea durante diferentes partes de un ciclo. Un tiristor inversor en el STATCON rectifica una porción de la energía de corriente alterna de la línea a energía de corriente directa para cargar un capacitor grande y entonces invierte esta energía de corriente directa a corriente alterna para reinyectarla a la línea cuando sea necesario. El capacitor en ambos casos actúa como una fuente de voltaje

constante y proporciona suficiente energía para suministrar energía real a la línea por unos cuantos ciclos durante interrupciones o caídas de voltaje.

El trabajo se ha desarrollado también sobre una variedad de otros controladores electrónicos visualizados como parte del servicio de "Energía al Cliente". Un restaurador de voltaje será conectado en serie con una línea de distribución para anular caídas o aumentos de voltaje momentáneos insertando un voltaje de compensación dentro de la línea. Los capacitores conmutados con tiristores traerá a los capacitores del sistema de distribución en línea pequeños incrementos a fin de conseguir cambios de carga más cortos y reducir los transitorios ahora asociados con la operación de conmutación de capacitores grandes. Harshad Mehta, Gerente Investigador de EPRI dice: "Nuestro objetivo en desarrollar tecnología de energía al cliente es tomar un método costo-competitivo para mejoramiento de calidad de la energía. Los controladores electrónicos avanzados proporcionarán, ahora, flexibilidad a las compañías en la forma en como ellos implementen planes de automatización de distribución y trabajen con los usuarios a fin de mejorar las formas convenientes y económicas para proporcionar calidad de energía ininterrumpible.

4.7 SOLUCIONES DEL LADO DEL USUARIO SEGÚN IEEE

Antes de considerar equipo de acondicionamiento de energía es importante que la instalación sea chequeada completamente para determinar si hay otros problemas, los cuales podrían ser una fuente de problemas de operación de equipo sensible. Al realizar esto se puede identificar si hay algún problema, como pudiera ser conexiones sueltas o un pobre contacto en el cableado o

switcheos.

Si es posible, el equipo sensitivo debe ser alimentado con una línea "dedicada" especialmente, la cual se conecta lo más cerca posible a la fuente de la compañía eléctrica para minimizar efectos de otras cargas sobre el sistema, la cual podría de lo contrario causar disturbios. Esto puede requerir el uso extra de transformadores y/o alimentadores y conductos.

Los problemas de ruido se presentan en equipo sensitivo a causa de no tener instalaciones con aterrizamientos adecuados mas que por otra deficiencia de la instalación eléctrica. La mayoría de los problemas de aterrizamiento pueden ser evitados y proteger intalaciones utilizando unidades de distribución de energía (frecuentemente llamadas PDU's), diseñadas para instalarse en un piso con cuarto de computadoras, cerca de las cargas a las que sirve. Estas unidades contienen transformadores de aislamiento a la entrada con protección electrostática para minimizar los efectos de ruido modo común (línea a tierra). Son alimentados por interruptores de circuito principal para proporcionar aislamiento y desactivación de energía de emergencia (EPO) por botones de pulso. Los transformadores alimentan paneles de control equipados con multiples circuitos interruptores (y algunas veces fusibles). Cada circuito interruptor es conectado a la instalación eléctrica apropiadamente y con un aterrizamiento flexible apropiado con cables bajo el piso y con contactos receptores para el equipo sensitivo que ellos sirven (ver la figura 4.4 donde se ilustra un circuito PDU típico, varios de los cuales podrían ser usados en una instalación grande). Las unidades de distribución de energía pueden también ser equipadas con funciones de alarma y monitoreo, como con alguna de las formas

simples de acondicionamiento de energía que mas adelante se describirán. Además tienen ventajas economicas y operacionales y estan disponibles fácilmente.

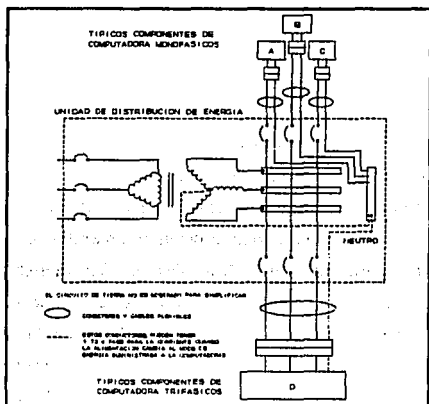


Figura 4.4 Unidad de distribución de energía.

4.7.1 Acondicionadores de energía eficientes

Los acondicionadores de energía son dispositivos que tienen la intención de aislar una carga de bus de las vicisitudes de un bus que suministra energía. Un transformador sencillo puede proporcionar suficiente aislamiento de carga y utilizarlo para muchas aplicaciones. Sin embargo, la tensión suministrada a los buses con forma de onda distorsionada y aplicaciones que involucran cargas

mas grandes pueden demandar mas carga de la imaginada. El hacer investigaciones fundamentales en tipos y estrategias de acondicionamiento de energía, es necesario. Por ejemplo los "transformadores de voltaje constante" (CVT's) han involucrado algo sin la atención especial en el diseño de la curva B-H del núcleo, o circuitos en el terciario de el CVT. Algunos diseños dependen de la saturación del núcleo y de las pérdidas; estos diseños pueden no ser capaces de ser extrapolados a mas altos niveles de energía ($P > 250$ kW) a causa del excesivo calentamiento asociado con las pérdidas.

Los equipos acondicionadores de línea se encuentran disponibles en una amplia variedad de tipos, configuraciones y diseños; dependiendo de la aplicación. Los hay, desde aquellos que son muy baratos y que proporcionan muy poca ayuda, hasta aquellos que protegen contra casi todas las eventualidades en un precio mucho mas alto. Dicha variedad comprende desde supresores de transitorios sencillos, pasando por reguladores de tensión constante, motores-generadores, hasta unidades combinadas; UPS híbridas, estáticas y rotatorias. Aquí se denomina como "equipo acondicionador" a cualquier dispositivo que contribuya a resolver alguno de los problemas de calidad de la energía que se han mencionado anteriormente.

A continuación se describen algunos de los mas comunes con algunas de sus características.

4.7.2 Supresores de transitorios

Los supresores de transitorios son dispositivos de muy bajo costo

disponibles para microcomputadores en la forma de salidas desnudas similares a extensiones con múltiples contactos receptores (contactos hembra). Ellos usualmente contienen varistores de óxido de metal o MOVs. Estos son típicamente dispositivos en forma de disco conectados entre las líneas de energía y, algunas veces, de línea a tierra. Ellos absorben energía de los transitorios que exceden el valor máximo (típicamente 100% sobre el voltaje normal pico). A causa de su pequeño tamaño y bajo costo comparado con el equipo que ellos sirven y el costo de determinar si tales transitorios existen en una instalación dada, mucha gente utiliza esta protección como seguridad.

La mayoría de los PDU's (unidades de distribución de energía) pueden ser provistos con estas características por un costo nominal y la mayoría de los acondicionadores de energía más caros, tal como reguladores de voltaje de línea, interruptores estáticos y sistemas UPS tienen estos dispositivos en construcción. Ellos pueden ser añadidos a un tablero de distribución si no está incluido en otra parte.

Otra forma de supresor de transitorios, un descargador de sobretensiones, es destinado para el más bajo nivel de energía transitoria en el cual puede ser tratado por acondicionadores de energía líquido, tal como MOVs o filtros. Ellos típicamente utilizan tubos de descarga de gas, los cuales son más lentos actuando que los MOVs, pero pueden absorber más energía. Para ser efectivos de cualquier modo, ellos también deben ser coordinados con descargadores de sobretensión principales que tienen mayor capacidad de absorción de energía. Usualmente esto es hecho en cada punto de transformación de voltaje en lugar de en la línea de entrada y es mejor coordinada con la compañía eléctrica. En la

figura 4.5 se muestra un arreglo típico de descargadores de sobretensión del lado de la compañía eléctrica. Si la coordinación no es apropiada, el exceso de energía puede destruir los descargadores de sobretensión secundarios y entonces dañar el equipo sensible conectado.

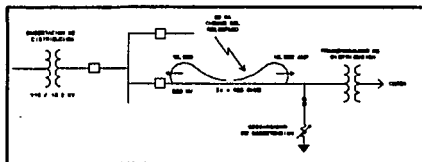


Figura 4.5 Sobretensión inducida por relámpago.

El conjunto de sistemas supresores de transitorios en combinación con los dispositivos descritos están disponibles, los cuales cuando son instalados apropiadamente limitarán las sobretensiones esperadas adecuándose a las normas.

Contrario a la creencia popular, sin embargo, los relámpagos rara vez causan transitorios por sobretensión o impulsos, pero más comúnmente causan caída y/o cortes momentáneos observados como oscilaciones de luz, resultado de el disparo interruptivo de la protección y/o el recierre automático. Esto es debido a fallas directas línea a tierra o debido a ramas de árboles y otros objetos aterrizados o cortocircuito de líneas de transmisión o distribución. La falla es aislada por switcheo de protección causando una baja o caída de voltaje hasta que esta es aislada o el sistema es momentáneamente desconectado el tiempo

suficiente para que un arco de falla se extinga y entonces automáticamente se reconecta en intervalos de 1/2 segundo por unos cuantos segundos. Esto da por resultado pérdidas totales de voltaje si la falla esta sobre un alimentador común o una serie de caídas si está sobre un alimentador cercano (Ver figura 4.6).

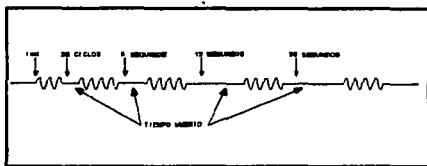


Figura 4.6 Seguimiento de la corriente de falla mostrando tiempos muertos.

4.7.3 Filtros

Los filtros de línea son usados para reducir la interferencia electromagnética, EMI (Electromagnetic Interference), y/o interferencia de radiofrecuencia, RFI (radio frequency interference) a niveles aceptables. Generalmente pequeños y bajos en costo, ellos también son usualmente construidos dentro de equipo sensible y frecuentemente dentro de PDU's y el equipo acondicionador de energía más caro. El más sencillo de los filtros, un filtro pasa-bajos, es diseñado para pasar voltaje con 60 Hz pero para bloquear las muy altas frecuencias o transitorios con frente de onda empinado. Ellos no son efectivos para frecuencias cercanas a 60 Hz, tal como armónicas de orden bajo pero llegan a ser efectivas en el rango de los KHz.

Los filtros pueden ser conectados línea a línea ó línea a neutro para rechazo de ruido común. Algunos de los mejores supresores de transitorios con salida desnuda también contienen estos filtros.

4.7.4 Transformadores de aislamiento

Los transformadores de aislamiento son los acondicionadores de energía más caros. Ellos proporcionan dos funciones. Uno es la capacidad para cambiar a un nuevo nivel de voltaje y/o compensar para lugares con alto o bajo voltaje. Por ejemplo, usando una entrada arriba de 480 volts en el punto de uso y entonces transformando a 120 V ó 208Y/120 V, el ajuste de interruptor y cable puede ser reducido en tamaño y el efecto de caída de potencial de línea reducido. Si el voltaje en el punto de uso es también bajo debido a la caída de potencial de la línea, puede ser manualmente elevado en pasos conectando diferentes derivaciones (taps) sobre el arrollamiento del transformador. Típicamente taps al 2.5% arriba del voltaje normal. La segunda función del transformador de aislamiento, proporcionada para la referencia de tierra justo en el punto de uso elimina el problema de ruido de modo común inducido a través de "retorno de tierra" o múltiples trayectorias de corriente en la tierra del circuito secundario del punto tierra de referencia establecido.

Los transformadores de aislamiento están frecuentemente equipados con un escudo electrostático o faraday entre los arrollamientos primario y secundario. Esto es una capa (o lámina) conductora de material no magnético conectado a tierra para reducir el efecto de acoplamiento capacitivo dentro del embobinado entre los arrollamientos primario y secundario, los cuales forman

una trayectoria para ruido modo común y es convertida a ruido modo normal en el arrollamiento secundario del transformador. Esta característica aumenta un poco el costo, tamaño o peso.

Los transformadores en combinación con capacitores en el equipo sensible que ellos suministran energía, forma filtros para rechazo de ruido modo normal. Esto ha sido una tendencia a través del paso de los años para instalar transformadores llamados de "ultra aislamiento" para esta aplicación. Estos transformadores están equipados con capas adicionales a través de cada arrollamiento para reducir más el acoplamiento capacitivo. Esto es innecesario si el secundario del transformador es aterrizado de acuerdo con el código de requerimientos y se hace a expensas de introducir reactancia adicional al transformador como resultado de regulación de voltaje degradado con cambio de carga y un costo mucho más alto que el de transformadores de aislamiento convencionales con una capa electrostática sencilla.

4.7.5 Reguladores de voltaje

Todos los problemas de voltaje excepto cortes pueden ser tratados añadiendo reguladores de voltaje equipados con supresores de transitorios. Varias técnicas de estado sólido han sido desarrolladas en años recientes para reemplazar los más viejos, tipo electromecánico de acción lenta. Los reguladores de respuesta normal se refieren a esos con un regreso cercano al voltaje normal en 10 a 12 ciclos después de un cambio de valor de voltaje de entrada o de carga. Esto es muy rápido comparado con los tipo electromecánico (los cuales no son considerados convenientes para este servicio), sin embargo, ellos no son

suficientemente rápidos, ni tampoco ellos contienen suficiente energía almacenada para soportar varias caídas tan grandes como ocurren en el reestablecimiento del sistema o fallas de distribución interna. Este tipo de regulador frecuentemente utiliza material de saturación magnética para ajustar automáticamente el marco o nivel de tensión de un transformador en serie con la entrada o fuente de voltaje. Un circuito de retroalimentación automático mantiene constante el voltaje de salida (ver figura 4.7).

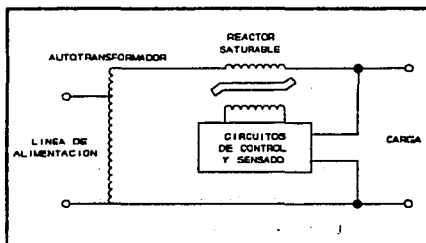


Figura 4.7 Respuesta normal de un regulador de voltaje.

La siguiente clase de reguladores, reguladores ferrosresonantes, consiste de un inductor lineal y no lineal y un capacitor en un circuito resonante paralelo con el inductor no lineal (ver figura 4.8). Este es generalmente incorporado dentro de una configuración de transformador de aislamiento junto con filtración adicional para eliminar armónicas inducidas dentro de si mismo. Esta filtración puede tomar un nivel razonable de distorsión armónica en la salida inducida por una carga no lineal como computadora, pero un exceso de armónicas puede producir sobrecalentamiento de el regulador. El circuito es puesto a punto para

alcanzar el voltaje y frecuencia de salida.

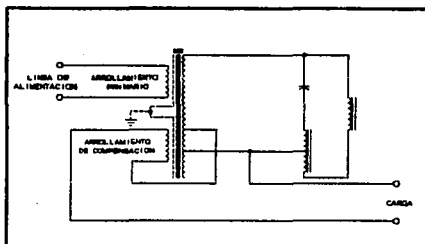


Figura 4.8 Regulador ferorrresonante.

El regulador ferorrresonante mantiene un voltaje de salida constante para un amplio rango de voltaje de entrada, particularmente en cargas ligeras. La limitación característica de corriente inherente del regulador, cuyos límites máximos de corriente a máximo voltaje, puede ser una limitante cuando se arrancan motores ó procesadores centrales de computadoras. A causa de estas características, ellos son generalmente operados en condiciones inapropiadas también. El circuito tiene una pequeña cantidad de energía almacenada y soportará cortes de alrededor de un ciclo, siempre que el corte no sea una falla de cierre en la entrada, la cual debe absorber la energía almacenada. No soportará un corte típico de 1/2 segundo de el recierre automático sobre un alimentador de la instalación; sin embargo, si soportará muchas de hasta 50% de la caída de voltaje por 1/2 segundo el cual probablemente será suficiente para tomar el reestablecimiento de falla en un alimentador cercano. Los reguladores ferorrresonantes son grandes y pesados debido a los magnéticos

involucrados, pero son sencillos y fiables cuando son diseñados apropiadamente.

Los reguladores de respuesta rápida se dividen dentro de dos clases genéricas. La primera, el regulador cambiador de tap, es diseñado para ajustar variaciones del voltaje de entrada por transferencia automática de taps en un transformador de energía (tipo aislamiento o tipo auto-transformador) en el punto de corriente cero de la onda de salida (ver figura 4.9).

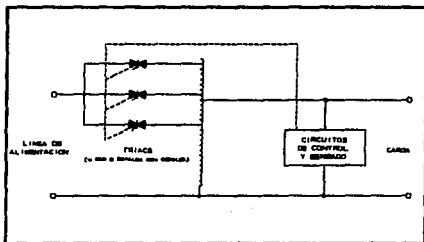


Figura 4.9 Regulador de respuesta rápida con cambiador de tap.

El número de taps determina la magnitud de los cambios y el rango de regulación posible. Una buena calidad de regulador estará en por lo menos 4 taps abajo de lo normal y 2 taps arriba de lo normal para un total de 7 taps. El tiempo de respuesta es usualmente un ciclo y es limitado a esa velocidad a causa de el criterio de switcheo corriente cero. Una principal ventaja de el cambiador de tap es que su única impedancia es el transformador o auto-

transformador y el switch semiconductor. Esto no introduce distorsión armónica y minimizará la distorsión inducida por la carga pero no filtrará a la salida cualquier distorsión de la entrada. Esto también tiene alta capacidad de sobrecarga en tiempo corto. Por otro lado, este tipo de regulador tiene un cambio discreto significativo cuando se corrige para variación de voltaje de entrada.

La segunda clase de reguladores de respuesta rápida es el tipo modulación de fase. Este usualmente utiliza tiristor (SCR) para control de marco o nivel de tensión de transformadores en combinación con filtros para proporcionar senoidales estables a la salida aún con cargas no-lineales típicas de sistemas de computadoras. Esto es hecho en un modo contínuo constante, pero a gran velocidad, eliminando los cambios inherentes en el cambiador de tap. Las cargas pesadas pueden ser liberadas a través de la puesta en marcha inrush típica de procesadores centrales de computadoras o disco controlador de motores mientras se mantiene a pleno voltaje, un problema típico, con reguladores ferromesónicos cargados completamente. La energía de la instalación es conducida a través de un transformador de aislamiento de entrada, ocasionando reducción de voltaje de utilización. Este regulador cubre la mayoría de los problemas de energía excepto cortes de cualquier duración. La energía es alimentada al regulador, ya sea por el marco o nivel de tensión de entrada, tal que a la salida se mantiene constante a pesar de la variación del voltaje de entrada o carga. Esto es hecho comparando el voltajes de salida con el nivel deseado (fijado previamente) y por el uso de retroalimentadores para modificar el nivel del marco o nivel de tensión, tal que el nivel deseado sea mantenido como se muestra en la figura 4.10. El filtro proporciona una trayectoria para un

nivel razonable de corrientes no lineales generadas por la carga y por el regulador mismo y produce una onda senoidal de salida con baja distorsión armónica total con supresión de transitorios como parte integral. Esto efectivamente elimina sobrevoltajes transitorios de las magnitudes típicas en sistemas de energía.

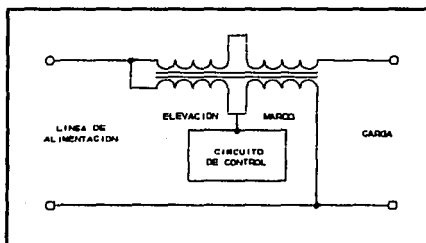


Figura 4.10 Regulador por modulación de fase.

Algunos reguladores de respuesta rápida tienen la capacidad de acomodar uno de los más severos y también los más comunes tipos de disturbios de energía, una caída de voltaje de hasta 50% hacia arriba a 1/2 segundo, resultado de que una línea de energía cercana se reestablezca por un interruptor de circuito automático. Esto es posible porque ellos pueden corregir el voltaje de salida dentro de 1/2 segundo, nivel de tolerancia de transitorio (típico de equipo sensible), suficientemente rápido para permanecer sin su cobertura hasta que el voltaje de la línea regrese a cerca del normal como se muestra en la figura 4.11. Se debe notar que los reguladores de respuesta normal con el mismo rango de regulación no permanecen sin la cobertura. En esta usual configuración

con transformadores de aislamiento y con amplia capacidad de bajo voltaje, además de supresores de sobretensiones transitorios, los reguladores de voltaje modernos pueden encargarse de la mayoría de los problemas de voltaje, excepto cortes.

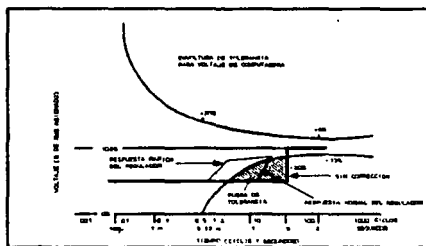


Figura 4.11 Respuesta de un regulador a caídas de voltaje.

4.7.6 Motores generadores

El motor-generador consiste de un motor eléctrico de corriente alterna que opera un generador de corriente alterna de tal forma que la carga es eléctricamente aislada de la línea de alimentación. Los motores generadores son usados ampliamente como una fuente de 400 Hz de energía para grandes centrales de procesadores de computadoras que requieren esta frecuencia. Como la tolerancia de frecuencia de las computadoras es amplia, un simple motor de inducción puede ser usado para controlar un generador síncrono (alternador). La cambios rápidos de carga y las variaciones de voltaje de entrada

toma la frecuencia de salida (la cual es proporcional a la velocidad) tambien dentro de tolerancia y el voltaje se mantiene constante por reguladores de voltaje automáticos controlando la excitación de campo del generador.

Para el caso de 60 Hz sin embargo, la tolerancia de frecuencia para computadoras es generalmente ± 0.5 Hz, usualmente en el uso de los más caros y complejos controladores de motor de inducción o síncronos.

Los motores generadores pueden cubrir la carga de impulsos y de caídas de voltaje y sobretensiones. Para cambios de voltaje en la línea de energía de $\pm 20\%$ o más, el voltaje para la carga se mantiene en el nominal. Una útil característica del motor-generador es su capacidad para puentear severas caídas o cortes en periodos cortos. El momento de los elementos rotatorios permite al motor generador soportar cortes de hasta alrededor de 0.3 segundos. Esto es limitado principalmente por la caída en frecuencia (velocidad), así, la energía es removida.

Este periodo puede ser extendido añadiendo inercia por medio de una rueda flotante como se muestra en la figura 4.12. Esto es práctico al extender el tiempo lo suficiente para proteger el caso típico de reestablecimiento y recierre debido a fallas del alimentador por el uso de velocidad variable a frecuencia constante o técnicas de arranque rápido de la máquina generadora en adición a la inercia de la rueda flotante. El costo es considerablemente mas alto que motores generadores convencionales.

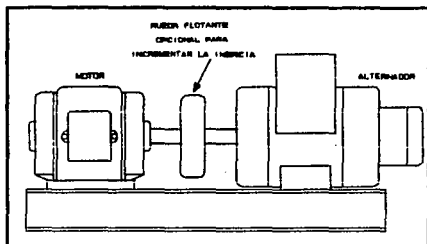


Figura 4.12 Motor generador con rueda flotante.

El problema con motores generadores son en su mayor parte en la salida o lado de carga. Una alta impedancia a la salida del generador puede ocasionar sustanciales depresiones de voltaje en respuesta a cambios de carga imprevistos tal como resulta de corrientes de arranque de motores grandes, y la respuesta a cambios de carga puede ser lento. También el motor controlador puede sobrecalentarse bajo periodos largos de apagones o condiciones de bajo voltaje de línea a menos que este sea demasiado grande. La eficiencia del motor es típicamente, relativamente baja, de tal forma que los costos de energía eléctrica a través de su tiempo de vida puede ser sustanciales. La disipación de calor, peso y tamaño, y el potencial de ruido audible son factores que deben ser considerados en la instalación de motor generador. Esencialmente las máquinas silenciosas están disponibles pero con un costo extra. El mantenimiento debe ser inspeccionado y periódicamente reemplazado y/o lubricado en muchos casos, particularmente cuando las ruedas flotantes son usadas. La fiabilidad potencial, sin embargo es muy alta.

4.7.7 Alimentadores dobles con transferencia estática

Si una instalación es equipada con dos alimentadores de energía o si dos pueden ser provistos en costos razonables (tal como un sistema secundario selectivo), un adecuado acondicionamiento de energía puede ser provisto para un muy alto porcentaje de problemas de energía con un switch de traslado estático de línea automático. Esto puede automáticamente transferir computadoras y otras cargas sensibles cuando la energía es de repente perdida en cualquiera de las dos líneas de la alimentación de entrada, sin disturbio. El tiempo total de detección transferencia es dentro de $\frac{1}{4}$ de ciclo y no afectará la operación de equipo sensible. La figura 4.13 ilustra la transferencia automática de un switch típico.

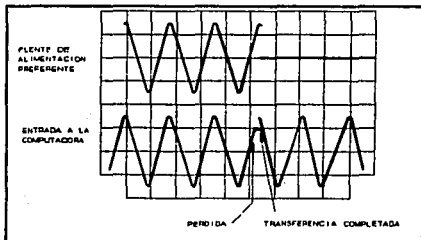


Figura 4.13 Alimentador doble con ejecución de switch estático.

Un circuito de energía con switch estático típico consiste de dos pares de SCR's (Rectificadores de Silicio Controlados) por fase conectados como se

muestra en la figura 4.14.

Cuando la fuente principal es de voltaje propio, el control lógico cambia sobre sus SCR's. La energía puede entonces fluir de la fuente principal a la carga. El control lógico es equipado con tres "sensores de voltaje de la fuente principal" el cual monitorea sobrevoltaje, bajo voltaje y pérdida de voltaje como se muestra en la figura 4.14.

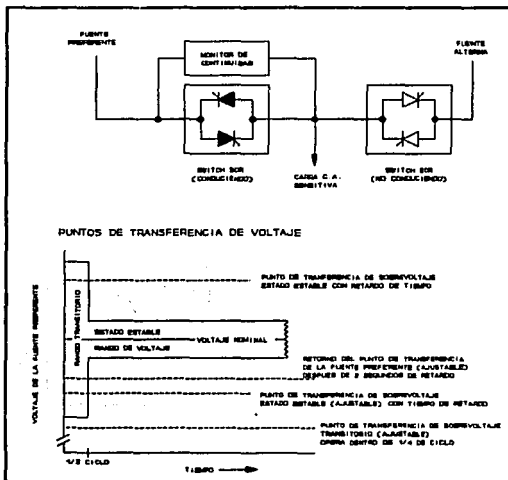


Figura 4.14 Switch de transferencia estática.

Las desviaciones que se presenten fuera de estos límites presentados causará al switch estático transferir a la fuente alterna. La transferencia es evitada, sin embargo, si la fuente de voltaje alterna no esta presente. Sobre la restauración de voltaje preferente por arriba de el nivel "regreso a preferente" y abajo del nivel de sobrevoltaje para un periodo de tiempo, el control lógico checa para sincronismo de la fase y balance de voltaje entre las fuentes, principal y alterna, y este inicia la retransferencia a la principal.

Si durante la operación normal, un mal funcionamiento del switch estático se presenta, el cual de cualquier modo causará un disturbio a la carga, entonces automáticamente transfiere y cierra a la fuente alterna para mantener la continuidad de energía de la carga.

Los switches estáticos colocados correctamente, son seguros e inherentemente libres de mantenimiento sin periodicos requerimientos de ejecución, para mantener alta velocidad de operación y sin contacto para reestablecerse.

Los switches estáticos, por supuesto no son efectivos en el caso de un corte de la compañía y no proporciona acondicionamiento de energía si en ambos alimentadores se cae el voltaje simultáneamente, como pudiera ser el caso para una falla cercana al punto donde los dos alimentadores se juntan.

4.7.8 Unidades de suministro de energía ininterrumpible [UPS]

Para operación continua de computadoras u otros sistemas sensitivos cuando las interrupciones de voltaje de línea duran aproximadamente 0.5 segundos o más (un evento común para reestablecimiento de falla de la instalación), entonces la única solución es una UPS (Uninterrumpible Power Supplies). Una UPS diseñada apropiadamente puede proporcionar calidad de energía a las computadoras bajo esencialmente todas las condiciones normales y anormales de energía de la instalación, incluyendo cortes de hasta 15 minutos. Esta soporta la mayoría de los cortes y permite sistemáticamente el cierre para cortes mas largos.

Los sistemas UPS son típicamente de estado solido, aunque algunos son actualmente hechos utilizando mecanismo rotatorio en combinación con conversión de estado solido. Los sistemas UPS tienen 3 configuraciones generales como se ilustra en forma simplificada en la figura 4.15.

Todos los sistemas contienen una batería de almacenamiento (acumulador). El sistema "Línea Preferente" incluye un rectificador cargador, un inversor estático y un switch de transferencia estático automático. El flujo normal de energía es directamente desde la línea a la carga por medio del switch de transferencia, de tal forma que el acondicionador de línea continuo no se proporciona. En algunas versiones, sin embargo, un regulador es incluido abajo de el switch estático para ese propósito. En el caso de pérdida de energía de entrada, el switch estático transfiere la carga de computadora al inversor estático sincronizado con la fase, el cual opera desde el acumulador flotante. El

tiempo total de detección y transferencia es posible dentro de $\frac{1}{4}$ de ciclo, de tal forma que la transferencia no afecte la operación de equipo sensible. La función del rectificador cargador está diseñado para restaurar la carga de la batería después de que la energía regresó y para energizar el inversor bajo condiciones de espera. A causa de su falta de aislamiento completo y protección de energía y porque debe cambiar su modo de operación sobre falla de energía este método es usado para pequeños sistemas de computadoras de bajo costo donde la operación no es altamente crítica.

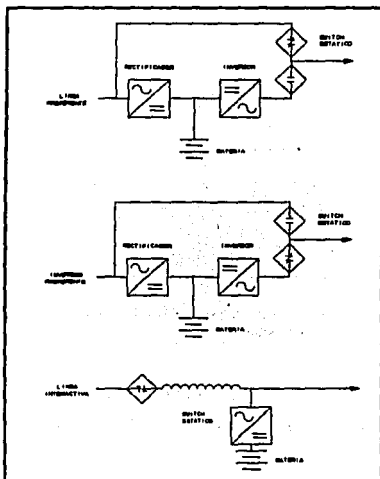


Figura 4.15 Configuraciones de UPS.

El sistema "Inversor Preferente" es esencialmente la configuración estándar para aplicaciones de equipo sensible crítico puesto que proporciona aislamiento total y acondicionamiento de energía, y el modo de operación no se cambia durante una falla de energía.

Durante una falla de la línea de corriente alterna, la energía al equipo sensible es suministrada por medio del inversor. Ahí no existe interrupción de energía durante la transferencia a la batería (ver figura 4.16).

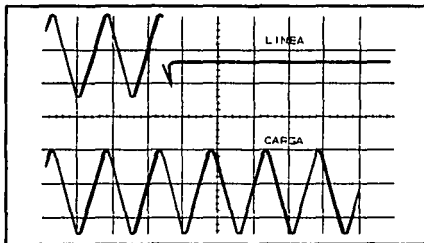


Figura 4.16 Falla de la línea de energía - Sistema Inversor Preferente.

Después de la restauración de la línea de corriente alterna, el cargador alimenta al inversor y recarga la batería automáticamente, limitando el exceso de demanda máxima. Varios niveles de carga pueden ser ajustados dependiendo de la aplicación que tenga.

Durante cualquier falla en el equipo UPS mismo, el switch estático

transfiere automáticamente la carga C.A. directamente a la línea C.A. en menos de un $\frac{1}{4}$ de ciclo sin suspender la fase. Además, esto mantiene la energía igual a la mayoría de las cargas críticas, y en el mismo tiempo actúa la alarma de falla. Esta técnica de transferencia es necesaria para alta fiabilidad porque cuando una UPS falla, esto lo hace rápidamente y sin cuidado (ver figura 4.17).

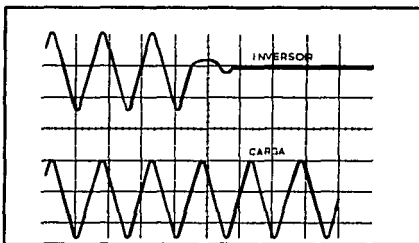


Figura 4.17 Falla del inversor - Sistema Inversor Preferente.

Un switch de paso manual tomará el sistema UPS fuera de la línea para servicio de mantenimiento y prueba sin causar disturbios a la carga de corriente alterna.

Un circuito limitador de corriente automático en el inversor opera en conjunto con el switch estático para encargarse del arranque inrush, ramas falladas y otras sobrecargas pesadas sin afectar la carga de corriente alterna crítica. En la figura 4.18 está ilustrado el efecto de reestablecimiento de una rama fallada. Los circuitos de ramas están coordinados y con fusibles para

prevenir que una falla sobre una rama afecte la operación de otras. La secuencia automática utiliza energía de la derivación de la fuente para proporcionar la necesaria capacidad de sobrecarga temporal. El oscilograma muestra el voltaje de la carga durante la transferencia a la derivación de la línea (trazo inferior) y además el inversor de voltaje suprimido por su protección misma, acciona el limitador de corriente (gráfica superior).

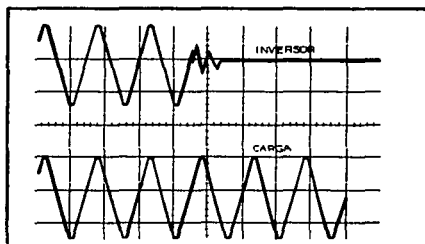


Figura 4.18 Operación del sistema durante el restablecimiento de falla.

Los sistemas "Línea Interactiva", así como los sistemas "Línea Preferente", tienen su aplicación en sistemas pequeños de equipo sensitivo menos crítico. Ellos también cambian el modo de operación sobre la falla de energía. Ellos también proporcionan algo más de acondicionamiento de energía que el sistema "Línea Preferente", pero son inherentemente los menos fiables de los tres sistemas. Normalmente la energía fluye a través del simple disparo del switch estático y el inductor a la carga de equipo sensitivo y al convertidor, el cual, en este modo, actúa como un cargador de batería. Por varias técnicas,

el voltaje al equipo sensitivo puede ser acondicionado de forma similar a la rápida respuesta o reguladores ferromesonantes. Sobre la falla de la línea, el switch estático es abierto y la función del convertidor es cambiada para que de un inversor se entregue energía al equipo sensitivo en menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo del disturbio. Esto es susceptible a pérdidas de salida si hay una falla del convertidor en cualquier tiempo. Además, tomando el convertidor dentro y fuera de servicio, no puede ser terminado sin incurrir en una interrupción de voltaje momentánea a la carga. Una versión más reciente se proporciona para aislamiento de un convertidor fallado o servido usando un switch estático adicional. Estos problemas no existen con el sistema inversor preferente.

4.7.9 UPS Y Máquinas generadoras

En la mayoría de los lugares con equipo sensitivo, la operación del sistema sin enfriamiento puede extenderse alrededor de 15 minutos. Más que el tiempo, igual que equipo de energía sensitivo disponible, el sistema debe ser cerrado. Se provee para cortes indefinidos, por lo tanto, una combinación de UPS con una máquina generadora es añadida.

La figura 4.19 ilustra tal sistema. La UPS opera normalmente acondicionando la energía al equipo sensitivo con la maquina generadora en "espera". Sobre las pérdidas de energía, la batería continúa suministrando al equipo sensitivo, mientras el enfriamiento y las cargas de alumbrado estan fuera. Despues de un periodo preestablecido (típicamente 15-30 segundos para prevenir interferencia inicial), la máquina generadora automáticamente inicia y restaura la energía a los sistemas de enfriamiento y alumbrado y a la UPS. La

operación normal de la UPS se reanuda y la batería ya no se descarga. Esto permite el uso de una pequeña batería (quizá 5 minutos). Mientras esta operando en este modo, la máquina generadora puede sostener cambios de cargas repentinos, tal como el arranque de un motor compresor en el sistema de aire acondicionado. Esto puede causar una momentánea variación de frecuencia debido al cambio de velocidad de la máquina, hasta que se corrija por el regulador. La frecuencia (y/o su razón de cambio) probablemente excede la tolerancia del equipo sensitivo ocasionando mal funcionamiento. De cualquier modo, con la interposición de la UPS, la frecuencia puede ser mantenida dentro de la tolerancia, eliminando el problema.

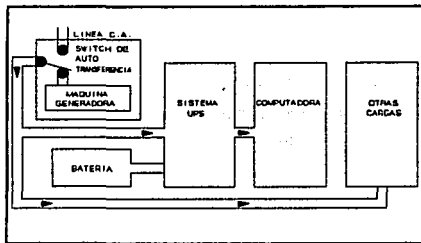


Figura 4.19 Combinación de UPS y Máquina Generadora.

Las máquinas generadoras incrementan el costo y mantenimiento de una instalación y debe ser añadida solo si cortes largos son anticipados y si estas pérdidas crean un problema significativo.

4.7.10 Armónicas en el punto de acoplamiento común

La mayoría del equipo sensitivo tienen un requerimiento para distorsión de voltaje que no exceda 5% THD, como se mencionó anteriormente, y la norma IEEE standard 519 permite a la instalación producir hasta 5% THD en los niveles de distribución de voltaje.

Esto no permite margen para armónicas inducidas en la carga del usuario. Actualmente en la práctica, la distorsión de la instalación es usualmente mucho menor que este valor, pero la carga del usuario induce armónicas que frecuentemente causa que el THD exceda el límite de 5% de cualquier forma. Además, la distorsión de corriente en sistemas de tres fases y cuatro cables alimentando múltiples cargas monofásicas no lineales, tal como suministro de energía a una computadora, frecuentemente crea corriente de neutro excesiva, la cual puede ser un riesgo de fuego en el cableado y típicamente se provee delta-estrella en el suministro del transformador (ver figura 4.4).

Las siguientes soluciones son para distorsión de forma de onda inducida por la carga:

- Proporcionar una fuente de energía más grande. Un transformador fuente más grande (o generador) del mismo tipo tendrá una impedancia de fuente más baja y reducirá proporcionalmente la distorsión de voltaje. Esto puede ser necesario para adaptar el sobrecalentamiento causado por las terceras armónicas (y múltiplos de la tercera circulando en el arrollamiento primario delta). Esto es

típicamente una solución costosa.

- **Proporcionar un transformador de regulación ferromagnético separado (CVT) para cada elemento de la carga. Este método proporciona corrección para distorsión por aislamiento armónico de cada carga de los otros elementos de la carga y de la fuente de energía común. Esto es el resultado de las características del filtro del transformador de voltaje constante. A causa del circuito puesto en el CVT, ocurre una operación inestable de ciertas cargas sensitivas algunas veces.**

- **Para el caso especial de terceras armónicas y sus múltiplos, un transformador conectado en delta dimensionado apropiadamente proporcionará una trayectoria de circulación para estas armónicas, esencialmente eliminando su efecto más allá del transformador (próximo a la fuente de energía y otras cargas comunes a esta). El suministro de energía a la computadora es rico en terceras armónicas de corriente, pero también contiene significantes armónicas de orden más alto.**

- **Proporcionar un corrector de factor de potencia y distorsión de línea, el cual es esencialmente un filtro incluyendo serie de trampas resonantes, proporcionando trayectorias de cortocircuito para las armónicas generadas por todos los elementos del equipo crítico al cual está conectado. Colocandolo cercano a la carga, el problema de corriente excesiva en el neutro, puede ser corregido también.**

- En sistemas trifásicos, el circuito neutro en parte debe ser incrementada la corriente en rangos de por lo menos 1.73 veces el rango de la fase.

4.8 SOLUCIONES DEL LADO DE LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA SEGÚN IEEE

A causa de computadoras y otras cargas sensitivas que son tan vulnerables a voltajes transitorios, es útil considerar el alcance de medidas de la compañía eléctrica la cual podría mejorar la situación.

En donde una reducción en la frecuencia de interrupciones es deseada, existen varias medidas de diseño y operación a considerar. Estos son agrupados en la tabla 4.1.

<i>Diseño</i>	<i>Operación</i>
• Construcción y disposición de circuito general.	• Inspección y mantenimiento de equipo.
• Exposición del circuito, longitud y tipo.	• Inspección y mantenimiento de líneas.
• Coordinación de protecciones.	• Inspección y mantenimiento de derivaciones.
• Seccionalización de falla	• Rápida identificación de problemas crónicos.
• Aplicación de descargadores de sobretensión.	• Análisis de interrupción de datos.
• Estándares de equipo y material.	

Tabla 4.1 Medidas de diseño y operación para minimizar frecuencia de cortes.

El reconocimiento preferido de las técnicas de diseño llevan un largo camino para reunir objetivos de fiabilidad y el uso de la zona del método de

análisis (aproximado), en cualquier componente los índices de corte son usados para determinar la fiabilidad, resultado de diseños alternos, esto ayuda a minimizar problemas para todo pero la mayoría en cargas sensitivas. Además de esto, una lista de medidas dirigidas a reducir la duración de cortes es dado en la tabla 4.2.

<i>Diseño</i>	<i>Operación</i>
• Equipo de interrupción.	• Planes de restauración.
• Equipo de conmutación.	• Análisis de usuarios afectados.
• Instalaciones alternas.	• Consideraciones de comunicación.
• Dispositivos de líneas alternas.	• Dispositivos de indicación y localización de falla.
• Aplicación de descargadores de sobretensión.	• Aplicación de SCADA.
• Estándares de equipo y material.	• Localización de equipo de seccionalización.
	• Repuesto, equipo mobiliario, y herramientas.
	• Análisis de los datos de interrupción.

Tabla 4.2 . Medidas de diseño y operación para minimizar duración de cortes.

Cualquiera de estas listas son puntos útiles de inicio que deben ser tomados en cuenta cuando el mejoramiento de la fiabilidad esté siendo solicitado para un usuario o para un circuito en particular. Por ejemplo, el usar puntos de seccionalización adicional en recierres podría ayudar a disminuir el número de usuarios afectados por una falla temporal o permanente. También, el aumento en el uso de descargadores sobre la línea para prevenir chispazos en la misma podría actualmente eliminar alguna de las interrupciones momentáneas.

Como se ha mencionado, el sistema básico sirviendo a un usuario en

particular es usualmente determinado por aspectos económicos. Debido a que la carga crece ó como la importancia de desear mayor fiabilidad llega a ser evidente, deben ser considerados cambios en el tipo de suministro. Mucho de esto es adquirido a costa de periodos cortos de fiabilidad (partiendo de un sistema radial a uno mancha de red, mejora periodos largos de fiabilidad, pero incrementa la exposición del alimentador para disturbios momentáneos).

5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha visto hasta ahora en los capítulos anteriores, el problema de la calidad de la energía no tiene antecedentes muy remotos, es hasta apenas hace unos años que se empieza a tener conciencia de la misma y por lo tanto las compañías eléctricas y los usuarios de las mismas se han preocupado en

comenzar ha investigar que tipo de problemas son los que afectan a sus instalaciones y a sus equipos y de esta manera aplicar la solución más apropiada para cada uno de ellos. En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se han llegado con respecto a problemas con la calidad de la energía además de sugerir algunas medidas preventivas para tratar de minimizar estos problemas. También se presenta que es lo que se ha hecho o se esta haciendo en México en relación con la calidad de la energía, específicamente la Comisión Federal de Electricidad que es la compañía suministradora en este país.

5.2 CONCLUSIONES

Las perturbaciones y problemas inesperados que ocurren en un sistema de energía y que afectan la calidad de la energía, provocan que la continuidad de las actividades productivas se vea afectada, en particular la de las industrias que emplean equipos electrónicos cada vez más avanzados pero a la vez más sensibles. Para contrarrestar este problema las empresas eléctricas están considerando no sólo el mejoramiento de sus instalaciones y procesos, sino la participación del propio usuario, que debe diseñar sus instalaciones eléctricas de manera que sus procesos de producción resulten lo menos afectados por las alteraciones en la calidad de la energía eléctrica.

La participación conjunta de las empresas eléctricas, los usuarios y la investigación aplicada permitirá combinar menores variaciones del suministro eléctrico con la selección y diseño adecuados de las instalaciones eléctricas industriales utilizadas en aquellos procesos productivos que se basan y dependen en gran medida de la energía eléctrica.

Estas son dos conclusiones principales referentes a la calidad de la energía:

- La calidad de la energía ha tenido un incremento en lo concerniente a la industria eléctrica en años recientes y la llegada de semiconductores implica que la calidad de la energía tenga una mayor importancia en el futuro.
- Es necesario investigar en áreas fundamentales de calidad de energía. Estas incluyen: conceptos básicos y definiciones; modelación y análisis; medición e instrumentación; fuentes; efectos; y mitigación de problemas de calidad de energía.

También, como muchos problemas de calidad de energía se ocasionan por la operación de dispositivos en un modo de switcheo, una no linealidad y/o una región dependiente de frecuencia o señales estáticas involucradas, la modelación, el análisis y las soluciones son frecuentemente un tanto problemáticos de obtener. Por lo tanto, la educación en este fenómeno del "mundo real" es también importante.

Los problemas de calidad de energía existen hoy en día a causa de la incompatibilidad del equipo sensitivo con la calidad de la energía típica suministrada por los sistemas de la compañía eléctrica. Algunas de las cargas sensitivas mas recientes son particularmente vulnerables a interrupciones momentáneas o períodos cortos. A causa del incremento en el uso de computadoras y otro equipo sensitivo principalmente, tales problemas

continuarán a menos que se lleguen a tomar medidas correctivas.

Hay algunas medidas correctivas dentro del control de la compañía. La mayoría de estos, sin embargo, no se aplica al mejoramiento de la fiabilidad en períodos largos. Es muy poco lo que la compañía puede hacer para minimizar, por ejemplo, interrupciones momentáneas o temporales debido a fenómenos meteorológicos.

El monitorear el lugar donde existen problemas de calidad de energía con los mas recientes tipos de disturbios registrados ayuda a identificar la naturaleza del problema y la frecuencia de ocurrencia. Tal información puede entonces ser correlacionada con eventos en cualquier lado del sistema para ayudar a sugerir la mejor solución costo-efectivo.

La variedad existente de equipo acondicionante de energía que ahora está disponible para proteger a las cargas sensitivas de varios disturbios obliga a delimitar la tolerancia de calidad de energía que algún equipo en particular debe tener y de esta forma ser analizado para determinar la solución apropiada.

Los fabricantes de computadoras y de otros equipos sensitivos necesitan tener guías con líneas generales típicas de calidad de energía de la compañía y los requerimientos en lugares con utilización de equipo sensitivo.

El mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en las instalaciones de baja tensión involucra una serie de acciones que deben realizarse en forma coordinada tanto por las compañías eléctricas como por los usuarios. Esto

responde al hecho de que algunas de las fuentes de deterioro de la señal de voltaje suministrado se encuentran en las propias instalaciones de los consumidores.

Los gerentes de ingeniería deberían actualizar sus conocimientos sobre los equipos de alta eficiencia energética disponibles en el mercado. Recientemente ha ocurrido un salto tecnológico en el diseño y manufactura de motores de alta eficiencia energética, sistemas de arranque suave y de velocidad variable en motores de inducción ya instalados, mejores luminarias y sistemas de iluminación. Estas mejoras pueden ser incorporadas progresivamente para un uso más económico de la electricidad, con un gasto capital mínimo y que a su vez reditúe en una mejor calidad de la energía.

La existencia de problemas armónicos dentro de sistemas de distribución de energía de bajo voltaje ha llegado a ser común al igual que el uso creciente de cargas no lineales tal como el uso de PC's y controladores de velocidad ajustables. Las corrientes y voltajes armónicos de baja frecuencia producidos por estas cargas pueden causar daños (además de mal funcionamiento y una mala operación) a equipo del sistema de energía. El tema de las armónicas se le ha dado una especial atención en los años recientes debido a la evolución de los equipos y de su nueva estructura interna basada en electrónica de potencia y características no lineales principalmente. Sin embargo, las armónicas pueden ser estudiadas y analizadas con equipo y sistemas que ahora ya existen y con sistemas que están en desarrollo. El sistema eléctrico puede ser modelado en una computadora y utilizar información que puede ser obtenida para diseñar sistemas y reducir los problemas que resultan de la contaminación armónica. En

el presente existen herramientas, así como, programas de análisis armónico comerciales además de normas que están disponibles para simplificar el análisis de sistemas y proporcionar guías que indiquen donde pueden encontrarse problemas y como resolverlos.

Actualmente existe equipo en el mercado disponible para hacer mediciones de armónicas, y de otros problemas relacionados con la calidad de la energía, con el fin de determinar los niveles de contaminación y de esta forma determinar que solución es la más apropiada. Además los ajustes pueden ser hechos por la compañía eléctrica para tener la mejor operación posible con la menor cantidad de contaminación armónica.

Hay dos categorías principales de efectos de armónicas en el equipo. La primera es el efecto de calentamiento en equipos, tales como motores, capacitores y transformadores que, a menudo, reducen su vida de operación. La segunda, es la disrupción en la operación que incluye, para la mayoría de las partes, equipos controlados electrónicamente. Tal vez porque el equipo eléctrico representa una tecnología más madura, tenga mejor documentación y cuantificación de los problemas. Por otro lado, posiblemente al rápido crecimiento de la electrónica, se hace deficiente o no muy completa la documentación de los problemas armónicos asociados con el equipo electrónico de casi todos los tipos. En donde existe, casi siempre es cualitativa o supuesta. Por ejemplo, el gran crecimiento en aplicación de controladores de motores de velocidad variable ha generado numerosos artículos sobre las corrientes armónicas que crean éstos.

El misterio que hasta ahora ha rodeado al tema de la distorsión armónica es debido parcialmente a la falta de información sobre los mecanismos de falla del equipo y la forma como los afecta. Las normas sobre armónicas se desarrollan solamente con un entendimiento parcial de las consecuencias que trae sobre la operación del equipo. Es importante que se aceleren los trabajos para entender los efectos de las armónicas sobre el equipo.

Y no solo los efectos de las armónicas sino también de todos los demás disturbios que se presentan en el sistema eléctrico. Todos tienen importancia pero las armónicas han llegado a tener más importancia debido a los efectos mas notorios y también debido a que el equipo que las produce se ha incrementado entre los usuarios sin tener conocimiento del problema que ocasiona a la red y a su propio equipo.

5.3 RECOMENDACIONES

La Comisión Federal de Electricidad en México mantiene acciones en el sentido de observar e identificar los problemas asociados con la calidad de la energía en el suministro eléctrico mediante registros estadísticos y brindando la información y asesoría necesarias para los usuarios. Por su parte el Instituto de Investigaciones Eléctricas está trabajando en la caracterización de los principales parámetros que definen la calidad de la energía, así como en el establecimiento de métodos para evaluar las mejores opciones de equipos y de diseño de sistemas de protección en las plantas industriales.

Recientemente se ha puesto en marcha un proyecto a nivel institucional

en el que participan todos los departamentos, en donde se pretende que cada uno de ellos investigue dentro de su área para de esta manera identificar, medir, modelar y tratar de dar soluciones a problemas de la calidad de la energía.

5.3.1 Evaluación de soluciones

Para el caso de una planta existente, es útil obtener datos históricos que puedan correlacionar la operación de equipo sensible con los disturbios del sistema de potencia.

La actividad más útil para cualquier planta existente es llevar a cabo un estudio de disturbios por un período de uno o dos meses, incluyendo si es posible la temporada de lluvias. Se sugiere realizar el monitoreo en el mismo punto que alimenta al equipo sensible y debe usarse equipo capaz de registrar los transitorios que puedan dañar a las cargas sensibles.

Existe en la actualidad equipo diseñado para llevar a cabo estas funciones de monitoreo que, a diferencia de los registros de voltaje tradicionales en gráficas circulares, son capaces de registrar variaciones de voltaje en períodos cortos de tiempo y operar continuamente durante semanas.

De ser posible, el equipo sensible se debe alimentar mediante una línea "dedicada" lo más próximo posible a la alimentación de la empresa eléctrica para minimizar los efectos de otras cargas en el sistema que pudieran en todo caso ocasionar disturbios de voltaje.

La evaluación adecuada de alternativas para mejorar el equipo de la planta y la red de distribución requiere de una comparación costo-beneficio. Por ejemplo, una vez determinados los costos de instalar algún método para mejorar la depresión de voltaje en algún equipo de proceso sensible, se deben determinar los beneficios de recuperar la producción perdida, material, calidad en el producto y respuesta del consumidor. Si existen los datos necesarios, el costo de implantar una determinada solución se puede evaluar contra el flujo de efectivo esperado de la recuperación de las pérdidas en producción.

5.3.2 Tendencias actuales para mejorar la calidad de la energía eléctrica en el lado del usuario

El reconocimiento, por parte de las compañías eléctricas, de los problemas de una mala calidad de la energía eléctrica a usuarios con cargas que involucran equipos sensibles, como ya vimos, es relativamente nuevo. Las acciones típicas que se toman en relación a esta problemática pueden resumirse como sigue:

- *Reacción a las quejas de los consumidores.*- La Asociación Eléctrica de Canadá (1986) ha sugerido que las compañías eléctricas registren el número de quejas y demandas de responsabilidad de los clientes por sectores o áreas y definan, con esta información, los límites inferiores de la demanda de energía de calidad superior. De esta manera, los recursos de las compañías se concentran en la realización de medidas tendientes a mejorar la calidad de la energía en aquellas zonas donde realmente existe la demanda de un mejor nivel de calidad de la energía.

• *Programas de educación y entrenamiento.*- Para la implementación de cualquier política de atención a este problema, las compañías eléctricas han desarrollado programas de entrenamiento del personal que atiende las quejas y preguntas de los consumidores. Más aún, se ha considerado importante realizar campañas de educación al consumidor sobre los problemas asociados con el mejoramiento de la calidad de la energía dentro de su instalación. Se ha puesto particular énfasis en concientizar al usuario sobre el hecho de que muchas de las fuentes del problema son generadas en el lado mismo del consumidor y de que es ahí donde debe iniciarse la búsqueda de soluciones.

• *Intervención de firmas de consultoría para asesorar a los clientes.* Este es un punto que se ha manejado con mucho cuidado, para evitar cualquier contradicción o diferencia entre las recomendaciones de las consultorías y las políticas de protección de las compañías eléctricas. Es una alternativa utilizada por compañías que no están en condiciones de resolver directamente las demandas del cliente, para proporcionar así una solución inmediata a sus necesidades.

• *Adopción de medidas para resolver directamente el problema.*- Algunas compañías eléctricas han adoptado la política de implementar algunas medidas tendientes a resolver la parte del problema que puede ser imputable a ellas. Por ejemplo, en áreas de gran demanda de energía de alta calidad, muchas compañías eléctricas norteamericanas utilizan alimentadores duales de servicio, cables subterráneos e interrupción seccionalizada. En algunos casos el costo asociado a estas acciones se ha cargado al cliente por medio de tarifas especiales. Sin embargo, en la mayoría de los casos el costo resultante se ha

distribuido para que sea cubierto entre todos los abonados que resultan beneficiados con tales medidas. Una acción que debe evaluarse, dentro de las medidas de las compañías eléctricas, es la conveniencia de suministrar protección contra sobretensiones al secundario de los transformadores de distribución.

Con objeto de dar una solución completa al problema, algunas compañías han creado la oferta de productos y servicios para realizar los acondicionamientos necesarios en las instalaciones de los consumidores de baja tensión, que permitan obtener la calidad de energía deseada en el punto de suministro. Esta ha sido la alternativa considerada por muchos como la más efectiva, tanto técnica como económicamente. Muy benéficas han sido también las campañas de educación al usuario, a través de trípticos y literatura con material informativo o a través de seminarios de divulgación.

La asociación de las compañías eléctricas con consultorías de ingeniería y fabricantes de equipo de acondicionamiento de energía eléctrica ha sido un medio efectivo para la evaluación de las recomendaciones y de su aplicación.

5.3.3 Concientizar

Un cambio de mentalidad es una obligación en todos los niveles de personal de ingeniería de una planta, así como de la gerencia corporativa. Los altos ejecutivos deben estar conscientes de la necesidad de conservar la energía y proporcionar apoyo al personal a su cargo para seguir adelante, ya que sin el visto bueno de la cabeza es difícil alcanzar algo en los niveles inferiores.

La conservación de la energía asume un potencial tremendo cuando se considera como una nueva fuente de energía que estaría disponible sin costo, o a uno muy bajo. Las siguientes medidas sugeridas, permitirán a los usuarios de la electricidad no sólo obtener un apreciable ahorro en costo, sino también mantener la productividad con menos energía y vencer los efectos nocivos de los cortes de energía y las interrupciones.

5.3.4 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento se lleva a cabo para preservar las mejores cualidades y la vida útil del equipo eléctrico (o cualquier equipo), de manera que sirva mejor a la necesidad para la que está destinado.

El mantenimiento eléctrico preventivo es realizado de acuerdo a un plan, en los días en que para la planta. Tomando como fuente las inspecciones periódicas y los signos de problema, un mantenimiento de oportunidad puede también acomodarse, digamos, si se reemplaza un interruptor, un contacto, o aún un motor eléctrico con falla, entre turnos o recesos durante el tiempo de producción. Debe de programarse anticipadamente para evitar los paros y también para ahorrar energía .

En los siguientes tres incisos se presentan algunos métodos que podrían seguirse en las compañías eléctricas para dar mantenimiento preventivo, a equipos eléctricos, enfocados a lograr un uso económico de la electricidad y además no afectar la calidad de la energía.

a) **Transformadores:** Enfriamiento, condiciones/nivel de aceite, respiradero conservador, relevador Burschholtz, boquillas, aletas, conexiones, registros de tierra, aterrizamiento del neutro, limpieza general y de los alrededores. Todas las partes del equipo mencionadas se deben inspeccionar regularmente, el aceite se probará y se planeará el filtrado. Debe asegurarse que siempre exista un adecuado enfriamiento natural.

b) **Interruptores eléctricos:** Inspeccionar calentamiento inusual, contactos, aceite aislante, seguros mecánicos, enclavamientos eléctricos. Abrir interruptores T.P. e inspeccionar cuchillas. En cuanto a los contactos, ha habido desarrollo en el diseño y material para lograr un servicio más largo, con mínimo desgaste y mantenimiento.

c) **Sistema de distribución. Cableado, barras de distribución, etc.:** Una vez seleccionado e instalado para la carga actual y la futura, el sistema de distribución normalmente no debe dar problemas de sobrecalentamiento, conexiones flojas y pérdidas de energía. Una inspección regular, detectando señales indeseables como las expuestas, y la inmediata rectificación de obstáculos, automáticamente reducirá pérdidas y ahorrará energía.

5.3.5 Corrección de Factor de Potencia

El factor de potencia es el valor clave en la conservación de la energía eléctrica. No sólo se estarían pagando multas a las compañías por bajo factor de potencia, además se tendría que enfrentar con cableado y equipo sobredimensionado, acarreado un mayor incremento en el costo capital. Se han

visto también las características inherentes al bajo factor de potencia de motores de inducción cuando hay poca o nada de carga. Todos estos factores tienen que ser recopilados y debe hacerse un estudio detallado, tomando lecturas de voltaje de entrada, corriente de carga, factor de potencia (si se tiene un medidor de F.P.), frecuencia y máxima demanda, y graficándolos. Con la ayuda de monografías preparadas de antemano, averiguar los niveles de KVARs de capacitores para adaptar las condiciones. El propósito es establecer y mantener un F.P. alrededor de 0.95 a 0.98. Los capacitores para corrección de F.P. pueden acoplarse a través de motores grandes para conectarse y desconectarse junto con éstos. El factor de potencia en establecimientos grandes puede mejorarse empleando un motor síncrono con campo sobreexcitado (condensador síncrono) que actuará como capacitor.

La principal ventaja de un buen F.P. es el control de la demanda máxima, cuando ésta es contratada en base de KVA. Se pueden obtener más KW a partir de una fuente, como un transformador. La corriente total, como es leída en el amperímetro, cae: el calentamiento indebido en cables y equipos es reducido, dando como resultado una mejoría en el voltaje de suministro. Aunque no es medible en términos de ahorro en dinero (a menos que se esté penalizado por bajo F.P.), la corrección y mejoras de F.P. incrementa la eficiencia del equipo eléctrico. Para industrias medianas que empleen energía eléctrica, es ventajoso utilizar controladores de demanda de F.P. automáticos (que conectarán y desconectarán capacitores de acuerdo a lo que se requiera para mantener un F.P. predeterminado estable). Este sistema trabaja bien en cargas fluctuantes en talleres generales de ingeniería y unidades de producción en serie.

El objetivo de corregir un bajo factor de potencia es evitar las siguientes desventajas que en un momento dado pudieran ser relacionadas con otro problema de calidad de la energía:

- **Reducción en la capacidad y funcionamiento del sistema, por sobrecarga en equipos eléctricos, líneas de transmisión y distribución.**
- **Incrementos de pérdidas en el cobre, por efecto Joule, las cuales son una función del cuadrado de la corriente.**
- **Disminución del voltaje, afectando la eficiencia del motor en operación, ya que resulta un insuficiente suministro de potencia a las cargas, éstas cargas sufren una reducción en su potencia de salida.**
- **Reducción de iluminación en lámparas.**
- **Alto consumo de corrientes reactivas.**

El estudio de el factor de potencia y la forma en como mejorarlo necesita de un análisis completo y mas específico que cada usuario debe de realizar para ayudar a que esto no pueda llegar a ser un problema de calidad de energía.

5.3.6 Medidas Tomadas en México por CFE

Como ya se mencionó el suministro de energía eléctrica es el principal producto o bien que proporciona la CFE a usuarios. Las características de calidad de dicho producto son continuidad, variación de voltaje, variación de frecuencia, contenido de armónicas y capacidad para atender el crecimiento de la demanda. Como el área de Distribución es el cliente interno de los sistemas de transmisión y generación, se negocia con estas entidades de la CFE que en los puntos de entrega se reciba la energía con calidad en sus aspectos de continuidad, voltaje y frecuencia.

Los principales servicios que proporciona distribución a los usuarios, con su respectiva característica de calidad, abarcan:

- **Atención de interrupciones del suministro y restablecimiento en tiempos cortos.**
 - **Atención de variaciones de voltaje y corrección dentro de rangos especificados en el menor tiempo posible**
 - **Atención de nuevos clientes importantes y tiempo mínimo en proyectos y presupuestos**
 - **Atención de nuevos fraccionamientos industriales, comerciales y residenciales, optimizando también la elaboración de proyectos y presupuestos.**
-

En general todas las actividades realizadas en la Subgerencia de Distribución están relacionadas con los procesos que dan por resultado que el bien que se suministra, esto es, la energía eléctrica, y los servicios antes mencionados, se proporcionen dentro de las especificaciones que se tienen establecidas y con una tendencia comprometida hacia la mejora continua.

La relación que mantiene la subgerencia con los usuarios respecto a la calidad de la energía es la siguiente: En primer término se atienden todas las quejas, solicitudes de servicio o requerimientos de información de parte de los usuarios, por medio de las oficinas de operación y departamentos técnicos. Muchos de los índices de la subgerencia, la mayoría de los cuales son índices nacionales, tienden a medir estadísticamente, con periodicidad mensual, la calidad de producto y servicio que se proporciona a los usuarios, en las diferentes áreas de las zonas de distribución:

- El tiempo de interrupción promedio por usuario (TIU).
- El índice de quejas por cada mil usuarios (IMU).
- El tiempo promedio requerido para atender un reporte de falla.
- El intervalo promedio para atender una solicitud de presupuesto para servicios importantes.
- El período requerido para atender solicitudes de proyectos de redes de distribución.

- **El tiempo necesario para ejecutar obras para atender nuevos servicios importantes.**

Los índices de gestión antes mencionados han permitido establecer metas de mejoramiento que tanto en esta división como a escala nacional se han estado cumpliendo. Anualmente cada zona de distribución se compromete a mejorar sus índices.

La planeación estratégica de la Subdirección de Distribución de CFE comprende en primer término proporcionar un servicio de calidad a los usuarios, con oportunidad y al menor costo posible. También contempla la seguridad y productividad de los trabajadores; reducción de pérdidas; optimizar la operación y mantenimiento de los sistemas; modernizar los sistemas informáticos; y optimizar la electrificación de la población rural y semiurbana. Como puede apreciarse, todos los elementos de esta planeación estratégica tienen una repercusión positiva sobre la calidad de productos y servicios a los usuarios.

Nacionalmente se ha dado especial importancia a dotar de control supervisorio a las subestaciones y ejecutar proyectos piloto de automatización de redes de distribución, como son los casos de Monterrey y Guadalajara.

Se está efectuando el mapeo digital de las redes y líneas de distribución y se ha implantado un sistema computarizado de análisis que permitirá el aprovechamiento y desarrollo óptimo de las mismas.

Están ya en funcionamiento los centros de continuidad y conexiones en

las principales ciudades del país y próximamente, en Monterrey, se implantará la modalidad de Servicio al Cliente, los cuales, mediante equipos y sistemas modernos de cómputo y personal adecuadamente capacitado, permiten dar atención inmediata a todo tipo de quejas o solicitudes que se reciban de parte de los usuarios. En el aspecto comercial, se tienen ya en funcionamiento los sistemas de cómputo que permiten manejar en tiempo real toda la información relativa a los usuarios, lo que permite atenderlos de inmediato.

El papel de los usuarios en lo que se refiere a la calidad de la energía en primera instancia es que deben de conocer las especificaciones del suministro de energía en sus aspectos de calidad del producto y de servicio, para estar en posibilidad de que el comportamiento del suministro sea acorde con sus expectativas y requerimientos. Esto obliga a CFE a proporcionar la información estadística disponible en el área de aplicación y a fijar cuál es el mejoramiento esperado en un futuro próximo.

Es importante que los usuarios den prioridad al buen diseño y selección de equipos de sus instalaciones interiores, ya que, en ocasiones, de ello depende el buen comportamiento de sus aparatos y dispositivos y que se obtenga eficiencia en las conversiones electromecánicas.

Las aplicaciones modernas de electrónica de potencia generan armónicas que afectan negativamente a los transformadores y bancos de capacitores y esto tiene repercusión tanto en las instalaciones interiores como en las exteriores. Algunos de esos dispositivos son sensibles a las depresiones de voltaje que son originadas por fallas en otros puntos del sistema y pueden

derivar en efectos desfavorables para los procesos continuos de producción; aquí también es necesario que los clientes sepan el comportamiento esperado de los sistemas eléctricos, para que se haga una selección adecuada de sus equipos.

Los usuarios deben dar relevancia al uso racional de la energía, un aspecto fundamental de calidad es evitar el derroche de ésta, ya que nuestro país está obligado a lograr la competitividad a nivel mundial en sus índices de cantidad de bienes producidos por unidad de energía empleada para ello. Se requiere legislar respecto a la obligatoriedad de aislar térmicamente las construcciones en las áreas de climas cálidos, para evitar consumos irracionales de energía para aire acondicionado.

Como antes lo mencionamos, es un deber de la CFE atender oportunamente las quejas que presenten los usuarios respecto de la calidad del suministro. También se están efectuando planes y programas para que de manera preventiva se detecten los problemas antes de que se reflejen como falta de calidad en el producto o servicio que recibe el usuario.

Los cambios que últimamente se han efectuado en las formas de administración de los recursos humanos y materiales de la CFE están muy orientados hacia el incremento en la productividad y la competitividad, y tienen un alto enfoque hacia la calidad de servicio al usuario. Se está dando también máxima prioridad hacia la capacitación de los trabajadores y la modernización de los procesos.

En este sentido se debe dar seguimiento estricto a los planes y programas que se tienen en distribución, para asegurar su cumplimiento, para que a corto plazo podamos estar bajo estándares de calidad en el suministro muy similares a los de países avanzados del mundo.

Las aplicaciones modernas de las instalaciones plantean cambios continuos en las especificaciones de los materiales y equipos que se utilizan. Nuevos diseños de equipos desplazan a los anteriores y las características de los materiales utilizados para fabricar herrajes y accesorios tienden a mejorar. Las investigaciones deben orientarse hacia una retroalimentación eficaz a las áreas normativas de la CFE, para hacer más oportuna y expedita la aplicación de las innovaciones y estar en posibilidad de abaratar las instalaciones o mejorar su comportamiento, como una manera de influir positivamente en la calidad del servicio al cliente.

Como hemos visto el problema de la calidad de la energía requiere ser tratado tanto por la compañía eléctrica como por el usuario, además de que los fabricantes de equipo deben trabajar en conjunto con las compañías eléctricas para identificar los problemas que pueden producir sus equipos y de esta forma minimizarlos.

Cada problema de calidad de la energía es importante, y aunque algunos no son tomados muy en cuenta por usuarios particulares debe dárseles más importancia.

Los usuarios industriales son los que más interesados deben estar en

recibir un suministro de energía con calidad óptima para que sus procesos no se detengan o no tengan problemas en los mismos.

Ya existe en el mercado equipo para medición de problemas con calidad de la energía y también equipo que permita mitigar estos problemas, además se está desarrollando nuevo equipo que estará listo en un futuro cercano como lo es el STATCON y el SSB, el conocer cual equipo es más apropiado será parte de estudios específicos en cada industria o en cada lugar donde se requiera.

Los estudios que ya se han realizado, además de los estudios que ahora se realizan y los que se realizarán darán más información respecto a la calidad de la energía y se tendrán mas herramientas para tratar este tema. La calidad de la energía así como su estudio tiene mucho futuro en todos los ámbitos y esto será de gran beneficio para todos.



BIBLIOGRAFÍA

- 1) Douglas, John., "Power Quality Solutions", IIE Power Engineering Review, March 1994
 - 2) Domijan, A., G.T. Heydt, A.P.S. Meliopoulos, S.S. Venkata and S. West, "Directions of Research on Electric Power Quality", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.8, No.1, January 1993.
 - 3) Gómez, S.R.T., G.M.Vargas Caballero, J.R.Villa Navarro, "Distorsión
-

- Armónica, su generación y efectos sobre equipos", Anales de Mecánica y Electricidad .
- 4) **Sarmiento,** Uruchurtu H.G., R. Velázquez Sánchez, "Aspectos de la calidad de la energía suministrada a industrias con equipo sensible", **Proyectos Especiales, Boletín IIE,** noviembre/diciembre, 1993, págs. 259-268.
- 5) **Prat,** Xavier D., D. Oscar Senao, D. Juliá Ferrer, "Perturbaciones en Redes de Distribución, su origen y efectos", Grupo Perturbaciones (ASINEL-UNESA).
- 6) **De la Rosa,** C. F., R. Velázquez Sánchez, "Aspectos relacionados con la calidad de la energía eléctrica suministrada", **Tendencias Tecnológicas, Boletín IIE,** noviembre, diciembre, 1992, págs. 277-280.
- 7) **Knapp,** P., D. Niyazi Ari, "Compatibilidad electromagnética: exigencia y planeación de instalaciones industriales", **Medidas CEM, Revista ABB 2/1994.**
- 8) **Burke,** J.J., Griffith David C., Ward Daniel J., "Power Quality - Two Different Perspectives", **IEEE Transaction on Power Delivery,** Vol. 5, No. 3, July 1990.
- 9) **IEEE,** "The Electric Utility - Industrial User Partnership in solving
-

Power Quality Problems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No.3 august 1990.

- 10) Wendell, W. Carter, "Control of Power Quality in Modern Industry", IEEE Annual Textil Industry Technical Conference Charlotte, N.C., mayo 1989.
- 11) EPRI, "Problems With Power Quality", EPRI Journal , a reprint july/august 1991.
- 12) EPRI, "Solving Problems of Power Quality", EPRI Journal, december 1993.
- 13) Lara, Roberto Espinosa y, "Sistemas de Distribución", Editorial Limusa, Capítulos 7 y 9, México 1990.
- 14) Jiménez, J. Francisco López, "Aplicación CAD/CAE en Ingeniería Eléctrica", Tesis Profesional, capitulo 5, E.N.E.P. Aragón, México 1994.