



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"**

**"FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD
DE LA ENERGÍA Y SU SOLUCIÓN"**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTAN:

**DANIEL ALBERTO SAUCEDO MARTINEZ
JOSÉ LUIS TEXIS VILLAGRAN**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACION

PRESENTA:

ZOAR CHRISTINA FLORES CARRERA

ASESORES:

**ING. HECTOR LÓPEZ GARCÍA
M.C. OSCAR ARTURO GONZÁLEZ VARGAS**



MÉXICO, D.F.

2008

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL " ADOLFO LOPEZ MATEOS "**

TEMA DE TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
POR LA OPCION DE TITULACION
DEBERA(N) DESARROLLAR**

**INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS MULTIDISCIPLINARIA Y EXAMEN ORAL
C. DANIEL ALBERTO SAUCEDO MARTÍNEZ
C. JOSÉ LUIS TEXIS VILLAGRAN**

"FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA Y SU SOLUCIÓN."

LA REGULACIÓN DE VOLTAJE Y LA ELIMINACIÓN DE ARMONICAS DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE SE DEBEN DE TOMAR EN CUENTA PARA OBTENER UNA BUENA CALIDAD DE LA ENERGÍA..

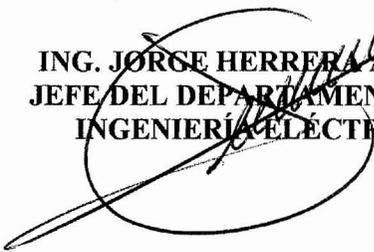
- **OBJETIVO:**
- **INTRODUCCIÓN.**
- **QUE ES LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.**
- **DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.**
- **DISTURBIOS ELÉCTRICOS.**
- **PRINCIPALES DISTURBIOS CAUSADOS POR ARMONICAS.**
- **EL FACTOR DE POTENCIA.**
- **SISTEMAS DE TIERRA.**
- **SOLUCIONES A LA MALA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.**
- **CONCLUSIONES.**

México D.F., a 09 Junio de 2008

ASESORES


ING. HECTOR LOPEZ GARCÍA


M.C. OSCAR ARTURO GONZÁLEZ VARGAS


**ING. JORGE HERRERA AYALA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**


**JEFATURA DE
INGENIERIA ELECTRICA**

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ ADOLFO LOPEZ MATEOS”**

TEMA DE TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
POR LA OPCION DE TITULACION
DEBERA(N) DESARROLLAR**

**INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACION
TESIS MULTIDISCIPLINARIA Y EXAMEN ORAL
C. ZOAR CRISTINA FLORES CABRERA**

“FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA Y SU SOLUCIÓN.”

LA REGULACIÓN DE VOLTAJE Y LA ELIMINACIÓN DE ARMONICAS DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE SE DEBEN DE TOMAR EN CUENTA PARA OBTENER UNA BUENA CALIDAD DE LA ENERGÍA..

- **OBJETIVO:**
- **INTRODUCCIÓN.**
- **QUE ES LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.**
- **DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.**
- **DISTURBIOS ELÉCTRICOS.**
- **PRINCIPALES DISTURBIOS CAUSADOS POR ARMONICAS.**
- **EL FACTOR DE POTENCIA.**
- **SISTEMAS DE TIERRA.**
- **SOLUCIONES A LA MALA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.**
- **CONCLUSIONES.**

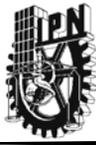
México D.F., a 09 Junio de 2008

ASESORES


ING. HECTOR LÓPEZ GARCÍA


M.C. OSCAR ARTURO GONZÁLEZ VARGAS


ING. JOSE ANGEL MEJIA DOMINGUEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN



AGRADECIMIENTOS

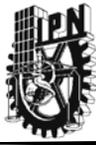
A DIOS porque nos dio la oportunidad de terminar la carrera y así terminar con un objetivo de nuestra vida pidiendo que siempre este con nosotros en las buenas y en las malas para que cada día que pase seamos alguien mejor.

A NUESTROS PADRES porque con su apoyo, cariño, consejos y ejemplo nos han otorgado las habilidades y capacidades que nos permitirán enfrentar la vida con éxito. Por darnos la vida e inculcarnos los valores que ahora poseemos, por todo el amor que a lo largo de todo este tiempo hemos recibido de su parte y además por habernos apoyado en los momentos mas difíciles y porque sin su apoyo nos hubiera sido mas difícil culminar nuestros estudios y les dedicamos esta tesis que esperamos sientan satisfechos con lo que hemos logrado. Gracias

A NUESTROS HERMANOS por que esperamos les sirva de algo bueno este trabajo y que vean que si se puede lograr lo que uno se propone en la vida.

A NUESTROS AMIGOS por que nos apoyaron en la elaboración de nuestra tesis, a todas las personas que estuvieron con nosotros en su momento en cada etapa de nuestra vida y que siempre quisieron lo mejor para nosotros, gracias por su apoyo lo recordaremos siempre. Y también gracias a la empresa COINEL S.A. DE C.V., al ING. Ignacio Suárez Pellycer y al ING. Luis M. Flamenco López ya que sin su valiosa colaboración no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

Por ello y por todos, a dios y a ustedes muchas gracias.



OBJETIVO

LA REGULACION DE VOLTAJE Y LA ELIMINACION DE ARMONICAS SON DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE SE DEBEN DE TOMAR EN CUENTA PARA OBTENER UNA BUENA CALIDAD DE LA ENERGIA

ES CLARO QUE SIN ACCIONES CORRECTIVAS LAS COMPAÑIAS SUMINISTRADORAS Y USUARIOS EXPERIMENTAN UN NUMERO CRECIENTE DE FALLAS EN SUS SISTEMAS Y EQUIPOS, CON LOS PROBLEMAS SUBSECUENTES, COMO PERDIDA DE PRODUCCION Y COMPETITIVIDAD

EN CONSECUENCIA EL CONCEPTO “calidad de la energía” ES CADA VEZ MAS COMÚN Y NECESARIO ADQUIRIENDO MAYOR IMPORTANCIA DEBIDO A LA PROLIFERACION DE EQUIPO ELECTRONICO CADA VEZ MAS SOFISTICADO EN TODOS LOS PROCESOS DE PRODUCCION Y USO DOMESTICO SIENDO ESTE ULTIMO EL QUE TIENDE A IMPACTAR CONSIDERABLEMENTE LAS CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA.

OBJETIVO

CAPITULO I QUE ES LA CALIDAD DE LA ENERGIA

CAPITULO II DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGIA

CAPITULO III DISTURBIOS ELECTRICOS

CAPITULO IV PRINCIPALES DISTURBIOS CAUSADOS POR ARMONICOS

CAPITULO V EL FACTOR DE POTENCIA

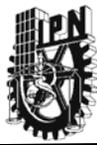
CAPITULO VI SISTEMAS DE TIERRA

CAPITULO VII SOLUCIONES A LA MALA CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA

CONCLUSIONES



		PAG
I	AGRADECIMIENTOS	..... 1
II	OBJETIVO	..... 4
III	INTRODUCCION	..... 5
CAPITULO I	QUE ES LA CALIDAD DE LA ENERGIA	
1.1	QUE ES LA CALIDAD DE LA ENERGIA	..... 9
1.2	IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA	..... 10
1.3	BENEFICIOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA	..... 11
1.4	QUE PARAMETROS SE INCLUYEN EN EL CONCEPTO	..... 12
A	PROBLEMAS QUE INFLUYEN EN UNA BUENA CALIDAD DE LA E.	..... 12
1.5	PERSPECTIVAS A FUTURO Y REQUERIMIENTOS	16
1.6	POR QUE LA IMPORTANCIA DE ESTE TEMA EN LA ACTUALIDAD	..... 17
1.7	ALGUNAS DE LAS IMPLICACIONES DE LAS DEFICIENCIAS EN CALIDAD DE LA ENERGIA	..... 18
1.8	CONSUMIDORES CONTAMINANTES DE LA RED	..... 22
A	POR QUE LAS CARGAS ALINEALES SON CONTAMINANTES	23
B	CONTAMINANTES DE LA RED CON LAS PERTURBACIONES DE LA TENSION	..... 23
C	INDICADORES DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA Y SU CALCULO	..... 24
1.9	NIVEL DE CALIDAD DEL SUMINISTRO ELECTRICO	..... 26
1.10	NORMAS PARA VALORAR LA CALIDAD DEL SUMINISTRO DE E.E.	..... 27
CAPITULO II	DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGIA	
2.1	DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGIA	..... 30
A	INTERRUPCIONES	..... 30



2.2	VOLTAJES TRANSITORIOS	.....	32
2.3	DISTURBIOS	.....	34
2.4	ARMONICAS	.....	36
2.5	RUIDO DE ALTA FRECUENCIA	.....	38
2.6	FACTOR DE POTENCIA	.....	39
2.7	SISTEMA DE TIERRAS	.....	41
CAPITULO III	DISTURBIOS ELECTRICOS		
3.1	DISTURBIOS ELECTRICOS	.....	44
A	CLASIFICACION	.....	44
B	TORMENTAS ELECTRICAS	.....	45
C	VOLTAJES TRANSITORIOS	.....	48
D	SAGS Y BAJO VOLTAJE	.....	49
E	SWELL Y ALTO VOLTAJE	.....	50
F	NOTCH	.....	50
3.2	FUENTES GENERADORAS DE DISRBIOS	.....	51
3.3	EFFECTOS DE LOS DISTURBIOS EN EL SISTEMA DE ENERGIA	.....	53
CAPITULO IV	PRINCIPALES DISTURBIOS CAUSADOS POR ARMONICOS		
4.1	PRINCIPALES DISTURBIOS CAUSADOS POR ARMONICOS	.....	56
4.2	EFFECTOS SOBRE REDES INDUSTRIALES	.....	57
4.3	EFFECTOS SOBRE LAS CARGAS Y DISPOSITIVOS	.....	57
A	MOTORES Y GENERADORES	.....	57
B	TRANSFORMADORES	.....	58
C	CAPACITORES	.....	58



D	EQUIPOS DE MEDICION	.....	58
E	CABLES DE POTENCIA	.....	59
F	EQUIPOS ELECTRONICOS	.....	59
G	MECANISMOS DE CONTROL Y RELES	.....	60
H	INTERFERENCIA TELEFONICA	.....	60
I	CALENTAMIENTO DE CAPACITORES	.....	62
J	CALENTAMIENTO DE CABLES DE EQUIPO	.....	63
4.4	EFFECTO EN LOS FILTROS PASIVOS	.....	66
4.5	EFFECTO EN LOS EQUIPOS ELECTRONICOS SENSIBLES	.....	66
4.6	EFFECTO EN LOS TRANSFORMADORES	.....	67
4.7	EFFECTO EN EL CONDUCTOR NEUTRO	.....	68
4.8	EFFECTO EN LOS CONDENSADORES	.....	69
A	ESQUEMA EQUIVALENTE DE UNA INSTALACION TIPO	.....	69
B	RESONANCIA EN PARALELO	.....	71
D	SINTOMAS DE DISTORSION ARMONICA EN EQUIPO DE DISTRIBUCION	.....	73
C	RESONANCIA EN SERIE	.....	74
4.9	FRECUENCIA DE LOS ARMONICOS	.....	75
A	ARMONICA CERO	.....	75
B	DIFERENTES FORMAS DE ONDA DE LA TENSION Y CORRIENTE	.....	76
C	INDICES DE DISTORSION ARMONICA	.....	76
4.10	EVIDENCIA DE LA PRESENCIA DE ARMONICAS EN LA RED	.....	77
4.11	REDISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN O DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DEL USUARIO.	.....	78



A	MÉTODOS PARA ANALIZAR LOS ARMÓNICOS	.....	78
B	METODOS DE FRECUENCIA	.....	79
C	MÉTODO WAVELET	.....	80
4.12	INFLUENCIA DE LOS ARMONICOS EN EL SISTEMA	.....	81
CAPITULO V	EL FACTOR DE POTENCIA		
5.1	FACTOR DE POTENCIA	.....	84
5.2	CARGA QUE PROVOCAN UN BAJO FACTOR DE POTENCIA	.....	85
5.3	CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA	.....	88
5.4	CONSECUENCIA DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA	.....	92
5.5	ENTAJAS DE LA COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA	.....	94
CAPITULO VI	SISTEMAS DE TIERRA		
6.1	SISTEMAS DE TIERRA	.....	97
A	GENERALIDADES	.....	97
6.2	NECESIDAD DE UN SISTEMA DE TIERRA	.....	98
6.3	NORMATIVIDAD	.....	100
6.4	COMPONENTES DE UNA RED DE TIERRA	.....	104
A	ELECTRODOS	.....	105
B	PICOS	.....	107
C	PICOS EN PARALELO	.....	108
D	CABLE ENTERRADO	.....	109
E	REGISTRO PARA ELECTRODO DE PICA	.....	109
F	PLACAS	.....	111
G	EMPLEO DE LA CANALIZACION DEL AGUA	.....	112



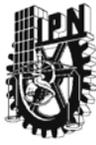
6.5	CONDUCTORES	.....	113
6.6	CONECTORES Y ACCESORIOS	.....	114
6.7	COMPUESTOS QUIMICOS	.....	116
A	TRATAMIENTOS CON SALES	.....	117
B	TRATAMIENTOS CON GELES	.....	117
C	TRATAMIENTO POR ABONO ELECTROLITO	.....	118
D	TRATAMIETO CON BENTONITA	.....	118
6.8	TIPOS DE CONFIGURACIONES	.....	119

CAPITULO VII SOLUCIONES A LA MALA CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA

7.1	SUPRESORES DE PICOS	.....	122
A	NIVELES DE EXPOSICION	.....	125
7.2	UPS	.....	127
A	CLASIFICACION DE LOS UPS	.....	130
7.3	FILTROS DE ARMONICAS	.....	136
A	TIPOS DE FILTRO	.....	139
B	FILTROS SINTONIZADOS	.....	140
C	FILTROS SINTONIZADOS AUTOMATICOS	.....	141
D	FILTROS DESINTONIZADOS O ANTIRRESONANTES	.....	143
E	FILTROS ANTIRRESONANTES	.....	144
F	FILTROS ANTIRRESONANTES AUTOMATICOS	.....	145
G	FILTROS DE RECHAZO	.....	146
7.4	BANCOS DE CAPACITORES	.....	149
A	INSTALACION DE LOS BANCOS DE CAPACITORES	.....	151
B	CONEXIÓN DE LOS CAPACITORES	.....	153



C	TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES	.....	154
D	DISEÑO	.....	156
7.5	REACTORES DE LINEA	.....	159
7.6	TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO	.....	160
7.7	ELECCION DEL EQUIPO MAS ADECUADO	.....	162
III	CONCLUSIONES	.....
IV	REFERENCIA DE FIGURA	.....
V	BIBLIOGRAFIA	.....

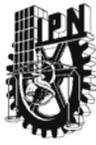


INTRODUCCIÓN.

En los primeros días de utilización de la energía eléctrica, el servicio estándar eléctrico, junto con las limitaciones que lo acompañaban, era por lo general adecuado para que trabajaran la mayoría de los equipos eléctricos. Algunos de los usuarios más sensibles de aquellos días; como los procesos industriales continuos, llegaron en ocasiones al extremo de asignar un puesto de centinela de tempestades para que avisara cuando había rayos en las cercanías y así parara la maquinaria hasta que pasara la tempestad. Los sistemas de protección de varillas para rayos hicieron un trabajo adecuado de protección contra rayos en la mayoría de las circunstancias. Aunque las interrupciones eléctricas prolongadas representaban un inconveniente y llegaban a causar pérdidas económicas, la mayoría de los equipos accionados por electricidad funcionaban sin mayores problemas.

Los dispositivos electrónicos digitales y otros dispositivos controlados por microprocesadores, comenzaron a aparecer hacia mediados y finales de la década de 1970. Al aumentar el uso de aquellos aparatos, se vio claramente que los antiguos estándares para la energía eléctrica ya no eran adecuados para su funcionamiento confiable. Además de los problemas iniciales que experimentaron las operaciones de grandes computadoras con la energía sucia, los usuarios encontraron que no podían mantener sus máquinas ajustadas, porque cualquier interrupción breve del suministro de energía los obligaba a reajustarlas nuevamente. La siguiente ola de problemas vino con el uso más extendido de las computadoras personales, del equipo industrial controlado por microprocesador y de las unidades motrices de velocidad ajustable.

El elevado crecimiento de la economía en los últimos años se ha traducido en una extraordinaria expansión de energía así como el desarrollo tecnológico, esto implica una



alta proliferación de controles y dispositivos electrónicos, electrodomésticos con elementos de estado sólido y cargas no lineales, tales como hornos o soldadores de arco, sistemas de tracción eléctrica, trenes de laminación, máquinas eléctricas con controles de estado sólido, equipos con núcleos saturables, etc., los cuales han producido una gran cantidad de perturbaciones en las ondas de tensión y corriente del sistema eléctrico nacional, creando un nuevo problema denominado perturbaciones eléctricas.

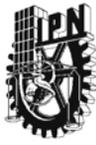
El concepto "Calidad de Energía Eléctrica" es un tema esencial el cual ha evolucionado en la última década a escala mundial, está relacionada con las perturbaciones eléctricas que pueden afectar a las condiciones eléctricas de suministro y ocasionar el mal funcionamiento o daño de equipos y procesos. Por tal razón, se requiere un tratamiento integral del problema desde diversos frentes. Estos comprenden, entre otros, investigación básica y aplicada, diseño, selección, operación y mantenimiento de equipos, normalización, regulación, programas de medición y evaluación, capacitación de personal. etc.

CARGA CRÍTICA.

Aquella que al dejar de funcionar o al funcionar inapropiadamente pone en peligro la seguridad del personal y/o ocasiona grandes perjuicios económicos

Por ejemplo, un paro no programado en un molino de laminación es muy costoso, mientras que la pérdida de un centro de información en un banco o el mal funcionamiento de los sistemas de diagnóstico en un hospital pueden ser catastróficos.

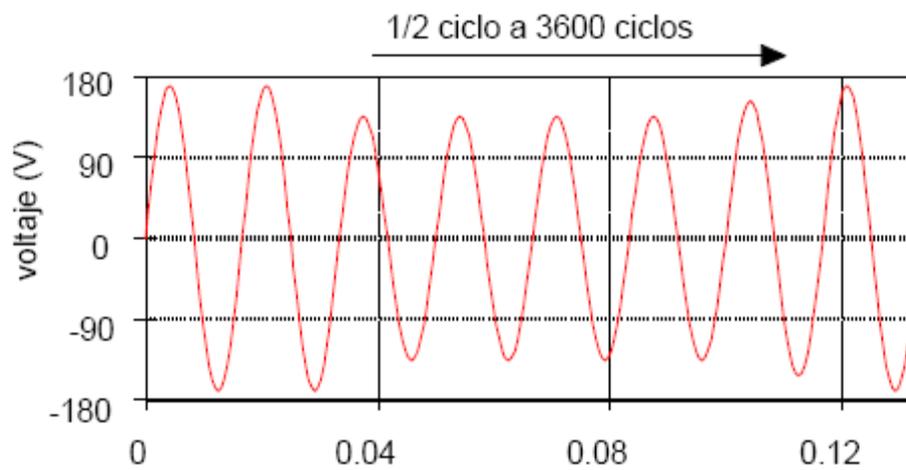
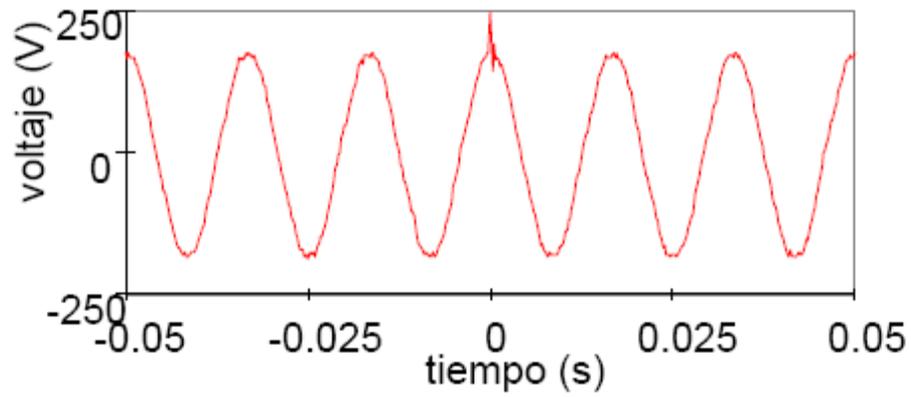
CARGA SENSIBLE.



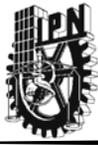
Aquella que requiere de un suministro de alta calidad, esto es, libre de disturbios. El equipo electrónico es mas susceptible a los disturbios que el equipo electromecánico tradicional.

Tabla 2 IEEE 1159. Categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia

Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del Voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5 μ s	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 -0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos - 3 seg	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos - 3 seg	0.1 -0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 seg	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 seg - 1 min	0.1 -0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8 -0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de Forma de Onda			
5.1 Componente de directa		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Contenido armónico	0 -100th H	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muecas en el voltaje		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones en la Frecuencia		<10 seg	



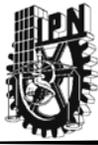
Impulsos y Disminuciones momentáneas de voltaje



CAPITULO

1

**“QUE ES LA CALIDAD DE LA
ENERGÍA.”**



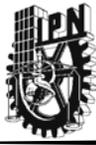
1.1 QUE ES LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

La calidad de la energía eléctrica ha sido siempre una preocupación importante para las empresas de servicio eléctrico, sin embargo, no es fácil definir lo que debe entenderse como buena calidad de la energía eléctrica, porque la que es buena para el refrigerador es posible que no sea lo bastante buena para las actuales computadoras personales y otras cargas sensibles. Por ejemplo, una momentánea paralización no afectaría en forma notable a los motores, lámparas, etc., pero causaría un perjuicio importante a los equipos que funcionan con dispositivos electrónicos sensibles.

La definición de la calidad de la energía es algo indeterminado, pero aún así, se podría definir como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico, es decir, la calidad de la energía se utiliza para describir la variación de la tensión, corriente y frecuencia en el sistema eléctrico.

La calidad de la energía eléctrica es simplemente la interacción de la energía eléctrica con los distintos equipos eléctricos. Si los equipos eléctricos operan correcta y confiablemente, sin ser dañados o sometidos a "fatiga", diremos entonces que la Energía Eléctrica es de Calidad. Por el contrario, si el equipo eléctrico no opera adecuadamente, si su funcionamiento no es confiable o el mismo se daña bajo uso normal, entonces la Calidad de Energía Eléctrica es pobre.

Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua; en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica.



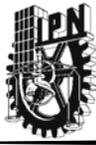
1.2 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

El estudio de la calidad de la energía eléctrica, es el primer y más importante paso para identificar y solucionar problemas del sistema de potencia. Los problemas eléctricos pueden dañar el comportamiento del equipo y reducir su confiabilidad, disminuir la productividad y la rentabilidad e incluso puede poner en peligro la seguridad del personal si permanecen sin corregirse.

Este tipo de estudios para plantas industriales, empresas de energía y empresas privadas, incluyendo auditorías energéticas y revisiones mecánicas, térmicas y eléctricas conducentes a reducir los desperdicios de energía y administrar eficientemente los recursos energéticos.

Además nos permiten descubrir las tres causas mayores de los problemas de la calidad de potencia (SAGS de tensión, interrupciones en el suministro y distorsión de la onda de tensión debido a la presencia de armónicos en la red) lo cual requiere de seis pasos básicos:

- 1 Planeación y preparación de la encuesta
- 2 Inspección en sitio
- 3 Monitoreo de la potencia (registro de las variables eléctricas con equipo especializado)
- 4 Análisis del monitoreo e inspección de los datos recolectados
- 5 Prácticas de la utilización de la energía
- 6 Aplicación de las soluciones correctivas



En este tipo de actividades se ha desarrollado un conocimiento especializado para investigar el qué, dónde, cuándo, cómo y por qué del problema eléctrico que se presenta, logrando un diagnóstico global de la instalación.

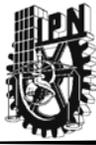
1.3 BENEFICIOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Las actividades a realizar para una buena calidad de la energía nos permiten definir los objetivos del proyecto, especificar los recursos de equipos necesarios para la realización del trabajo y aclarar donde debe monitorearse dependiendo del sitio en el cual se sospecha que el problema aparece. También permite hacer un análisis sistemático de los datos, identificación de eventos que ocurran durante intervalos de mala operación del equipo y aquellos que excedan los parámetros de soporte de los equipos.

Históricamente, la mayoría de los equipos son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias. Sin embargo, en los últimos diez años se han agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos, no tan tolerantes a estas variaciones, incluyendo a los controlados electrónicamente.

Adicionalmente, se cuenta con registradores y analizadores de redes con el fin de realizar las labores de medición asociadas con este tipo de estudios y lograr diagnosticar adecuadamente las variables eléctricas asociadas con la instalación.

Algo del control se hace directamente a través de electrónica de conversión de potencia, como son impulsores de ca, cd, y fuentes de energía conmutadas, además del equipo electrónico que está en los controles periféricos, como computadoras y controladores lógicos programables (PLC's). Con la disponibilidad de estos complejos controles, se desarrolló un control de procesos mucho más preciso, y un sistema de protección mucho



mas sensible; lo que hace a éstos aún más susceptibles a los efectos de los disturbios en el sistema eléctrico.

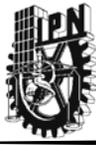
1.4 QUE PARAMETROS SE INCLUYEN EN EL CONCEPTO DE CALIDAD DE LA ENERGIA

- CONFIABILIDAD DEL SERVICIO
- DESVIACIONES DE LA FRECUENCIA
- DESVIACIONES Y FLUCTUACIONES DE TENSION
 - DESVIACIONES DE LA TENSION NOMINAL O DE TRABAJO
 - FLUCTUACIONES RAPIDAS DE LA TENSION (FLICKER)
 - MODULACIONES EN LA ONDA DE TENSION
 - SOBRETENSIONES
- DISTORSION DE LA ONDA DE TENSION Y CORRIENTE
- ASIMETRIA DE LAS TENSIONES TRIFASICAS

A. QUÉ PARÁMETROS SE INCLUYEN EN EL CONCEPTO DE CALIDAD

En lo referido a las perturbaciones de la tensión:

- Depresión, “bajón” de tensión (dip) es una reducción repentina seguida por una recuperación después de un corto período de tiempo (desde unos pocos ciclos hasta unos pocos segundos).



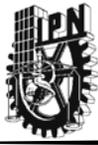
- El bajón de tensión se caracteriza por el valor rms debajo de determinado umbral que generalmente se toma como 90% de la tensión de referencia U_{ref} parametrizándose por la profundidad del bajón de tensión ΔU y por la duración de éste Δt

- Las interrupciones de tensión es el bajón para 1-10% de U_{ref} y se caracterizan sólo por la duración.

- Las perturbaciones de tensión son consideradas:
 - $\Delta t < T/2$ transitorias
 - $T/2 < \Delta t < 3T$ instantáneas
 - $3T < \Delta t < 3 \text{ s}$ momentáneas
 - $3 \text{ s} < \Delta t < 1 \text{ min}$ temporales
 - $\Delta t > 1 \text{ min}$ sostenida

1 PROBLEMAS QUE INFLUYEN EN UNA BUENA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Como regla general, cualquier alteración en el voltaje de una fuente de energía (bien sea DC o AC) puede ser considerada como materia concerniente a la Calidad de Energía Eléctrica. Problemas de Calidad de Energía Eléctrica pueden ser eventos de gran velocidad tales como impulsos de voltaje/transitorios, sonido de alta frecuencia, fallas en la onda eléctrica, incrementos y caídas de voltaje y pérdida total de la energía. Cada tipo de equipo eléctrico será afectado particularmente debido a los distintos problemas de



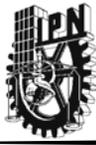
Calidad de la Energía. Analizando el "poder eléctrico" y evaluando los equipos o sus cargas, podemos nosotros determinar si realmente existe un problema en la Calidad de la Energía

Se ha encontrado que la mayoría de los problemas referidos a la Calidad de la Energía Eléctrica están relacionados con problemas internos de las edificaciones y no con el suministro eléctrico como tal, así como que el 90% de los problemas en la Calidad de la Energía Eléctrica ocurren dentro de las edificaciones; problemas de aterrizamiento y de circuitos, violación de normas y generación de disturbios en la energía eléctrica interna son ejemplos típicos. Por lo que se considera que en general, hay dos tipos básicos de problemas en la calidad de la energía:

- 1 Los que crean la interrupción de cargas eléctricas o de circuitos enteros y
- 2 Los que causan la interacción del equipo eléctrico y el sistema de suministro eléctrico.

Estas perturbaciones pueden originarse por actividades dentro de los terrenos de la planta o en el sistema eléctrico de energía, fuera de dichos terrenos.

Otros problemas internos incluyen la conexión de distintos equipos al mismo punto de suministro de poder eléctrico. Veamos un ejemplo de una *impresora laser* y una *computadora personal* (PC). Muchos de nosotros no pensaríamos dos veces en conectar la impresora laser al mismo punto eléctrico donde la computadora está conectada. Nos preocupamos más por los programas y por la comunicación entre la impresora y el PC que por la capacidad de energía en el punto eléctrico; de hecho, tal vez nunca ésta es considerada. Aunque, algunas impresoras laser pueden generar incrementos de voltaje



neutro-tierra y caídas de corriente cada minuto, a largo plazo el efecto sobre el PC puede ser una falla en el suministro de energía eléctrica. Debemos pues ser cuidadosos en cómo nuestros sistemas y equipos son instalados y conectados.

Las materias referentes a Calidad de Energía Eléctrica pueden ser divididas en: corta y larga duración. La industria de la computación ha desarrollado un modelo de clasificación standard para categorizar los eventos relacionados a la Energía Eléctrica de Calidad.

El modelo standard más común es el presentado por la "Computer Business Equipment Manufacturing Association" (CBEMA) - Asociación de Fabricantes de Equipos de Computación. Otros standares incluyen a la American National Standards Institute (ANSI) - Instituto Nacional Americano de Normas y a la (ITIC).

La figura I.1 es un ejemplo de la curva ofrecida por el standard de la CBEMA para edificaciones. La Figura II.2 es una tabla de datos de Calidad de Energía Eléctrica Vs. tiempo. Los distintos eventos referentes a la Calidad de Energía Eléctrica han sido graficados en la curva basándose éstos en los parámetros tiempo y magnitud. Cualquier evento fuera de la curva será considerado como posible causal de problemas en el suministro eléctrico.

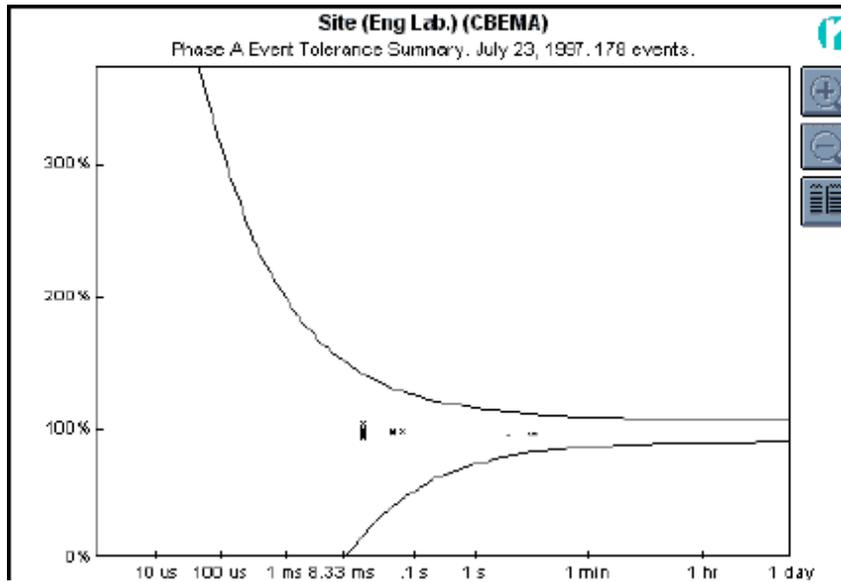


FIG 2 CURVA ESTÁNDAR DE LA CBEMA.

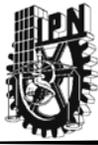
Site (Eng Lab.) (CBEMA)
 Phase A Event Tolerance Summary. July 23, 1997. 178 events.

	Type I	Type II	Type III
Start Duration	1 us	8.333 ms	2 sec
End Duration	8.333 ms	2 sec	1 day
Total Events	0	175	3
Total Faults	0	0	0

	Event No.	Amplitude	Duration
Longest Type I Event	N/A		
Largest Type I Event	N/A		
Longest Type II Event	6400	2.353kV	68.867 ms
Largest Type II Event	12150	2.187kV	16.867 ms
Longest Type III Event	0	2.307kV	8.683 sec
Largest Type III Event	200	2.275kV	3.25 sec

FIGURA 3 DATOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LA FASE A.

Clasificando eventos, podemos determinar que tipo de equipos de protección son requeridos para proteger los sistemas y/o equipos.



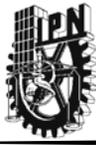
1.5 PERSPECTIVAS A FUTURO Y REQUERIMIENTOS.

Los problemas en la Calidad de la Energía Eléctrica pueden ser detectados instalando equipos de medición de alta velocidad para monitorear el "poder eléctrico". Este tipo de equipos de prueba proveerá información que será usada en una evaluación para determinar si el suministro de energía eléctrica es de suficiente "calidad" para operar los equipos confiadamente. Este proceso es similar al usado por un médico cuando utiliza un monitor de ritmo cardíaco para registrar los impulsos eléctricos del corazón del paciente. El monitoreo provee información valiosa, pero de cualquier forma esta información requiere ser analizada e interpretada para poder ser aplicada al tipo de equipo que está conectado.

En la aplicación de las soluciones correctivas se han propuesto soluciones innovadoras y con mínimas inversiones que logran resolver adecuadamente los problemas que se presentan en las plantas eléctricas, entre ellas se tienen nuevo cableado, filtros especiales y filtros de armónicos o traslado de la fuente de interferencia a un circuito diferente.

Es por esto que, en lo que respecta a bombillos Standard, el problema de la Calidad de la Energía Eléctrica que afecta su funcionamiento y eficiencia es el *alto voltaje*. También podemos decir que una baja de voltaje así como una interrupción en el suministro de la energía eléctrica, originarán una variación en la capacidad de iluminación (lúmenes) para la cual dicho bombillo fue diseñado.

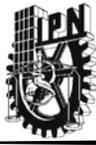
Será pues tarea de un consultor el determinar si la energía eléctrica, el aterrizamiento y la infraestructura de una edificación son adecuadas para operar los sistemas y/o equipos. Una vez hecha esta evaluación, otros pasos pueden ser tomados para remediar cualquier anomalía. Retomando el ejemplo del médico, utilizado anteriormente, el diagnóstico debe ser realizado antes de la prescripción de los medicamentos. Muchos clientes



compran "medicina" (equipos) para poder tener Energía Eléctrica de Calidad sin un diagnóstico previo adecuado; esto es costoso e inefectivo.

1.6 ¿POR QUÉ LA IMPORTANCIA DE ESTE TEMA EN LA ACTUALIDAD?

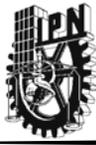
- La sociedad y la industria actual poseen una penetración de altísimo grado en cuanto a equipamiento electrónico de diversas generaciones, vinculados al control de procesos, accionamiento, procesamiento de datos, comunicaciones y transmisión de información, dispositivos domésticos, comerciales y de entretenimiento entre otros
- Los fabricantes de este equipamiento, en un mercado competitivo, diseñan el burden de sus equipos en el nivel de los normados por el sistema, de manera que las desviaciones dentro de esos límites no afectan el funcionamiento.
- El uso extendido y progresivo de fuentes alternativas de energía no convencional, como la eólica y la solar, usualmente utilizan generadores con inversores, esquemas híbridos en muchos casos conectados a las redes de distribución. El proceso de conversión de cd a ca conlleva la generación de armónicos.
- En el mundo la electricidad se trata como una mercancía en un mercado con características peculiares, desde los centralizados hasta los desregulados, por ello, la definición de parámetros de calidad permiten determinar las características de competitividad del producto de determinado suministrador.
- Una insuficiente calidad en el suministro de la energía eléctrica afecta, en mayor o menor grado, a otras tecnologías y procesos industriales, donde las pérdidas económicas que se generan por este concepto pueden llegar a ser importantes.
- La deficiente calidad en el suministro provoca una operación ineficiente e impropia, entre otros, en las redes eléctricas, conducente a averías o incremento



en los costos de operación, los que, al final, redundan en pérdidas para las compañías del servicio eléctrico.

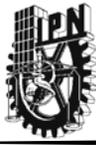
1.7 ALGUNAS DE LAS IMPLICACIONES DE LAS DEFICIENCIAS EN LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO

- Con parámetros de tensión diferentes a los nominales o de trabajo ocurre la aceleración del envejecimiento del aislamiento de los equipos eléctricos, como consecuencia de un calentamiento más intenso y, en una serie de casos como resultado del reforzamiento de procesos de ionización. De aquí se deriva una intensificación de las tasas de averías.
- Las desviaciones de tensión conllevan a un aumento del calentamiento de motores eléctricos con momentos constantes de carga (carga tipo transportador, elevador etc.), acelerando el envejecimiento del aislamiento.
- La elevación de la tensión por encima de la nominal conlleva a la disminución del tiempo de vida útil de lámparas
- La asimetría en la tensión también conlleva al calentamiento adicional del equipamiento de fuerza y disminuye su vida útil. Este defecto también influye negativamente en el funcionamiento de algunos esquemas de protecciones por relés, provocando operaciones erráticas y sacando de funcionamiento equipos.
- La aparición de variaciones rápidas en la asimetría de las tensiones trifásicas, características en circuitos donde están conectados hornos de acero por arco eléctrico, conllevan a la variación de los momentos de torque en los motores eléctricos, lo que es causa de aparición de esfuerzos adicionales en las cabezas de las bobinas de las máquinas, su vibración y tensiones de fatiga en elementos



mecánicos constructivos del propio motor y el accionamiento, lo que trae como resultado una disminución de su tiempo de vida.

- Las variaciones de la tensión actúan de diferente manera en los distintos tipos de equipamiento eléctrico. Por ejemplo, en las baterías de condensadores utilizados para la compensación de potencia reactiva provoca procesos transitorios que conducen a la sobrecarga de los condensadores por corriente y en casos por tensión, como resultado de lo cual la batería puede salir de servicio en un período, a veces, significativamente rápido en dependencia de la magnitud de la perturbación.
- En el caso de los motores las variaciones de tensión conducen al calentamiento adicional y a la variación del momento al eje. Los bajones de tensión para los motores asíncronos tienden a frenarlos y a procesos de re arranques, pudiendo llegar a situaciones de disparo de protecciones, sobretodo, cuando trabajan simultáneamente grupos de motores.
- La presencia de armónicos superiores conducen a la aceleración del envejecimiento del aislamiento, al calentamiento adicional de las partes conductoras de los equipos e instalaciones, al incremento de las pérdidas de energía en las redes, a la operación errática de los esquemas de protecciones eléctricas, al envejecimiento acelerado de las baterías de condensadores provocando su fallo, etc.
- La presencia de armónicos superiores también implican el aumento de las pérdidas parásitas e histerésis en los núcleos de motores y transformadores, tanto del sistema eléctrico como de los propios consumidores. De igual manera crean interferencias en los servicios de comunicaciones y transmisión de datos.



- La práctica ha demostrado el incremento del error en las lecturas de metros contadores de energía del tipo de inducción ante la presencia de armónicos, además de daños mecánicos producidos por los armónicos de orden $3n+2$ cuando estos son significativos, lo que recomienda la no utilización de este tipo de metro en redes o consumidores contaminados.
- La reducción de la frecuencia conduce a una disminución de la productividad de los accionamientos eléctricos, al trabajo inestable de equipos electrónicos, de mediciones y de sistemas de protecciones. En las centrales termoeléctricas tiene también influencia en las vibraciones de las turbinas, las que tienen bandas estrictas de variaciones admisibles de este parámetro.

IMPLICACIONES DE LAS DEFICIENCIAS EN LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO

- La experiencia de los sistemas industriales ha demostrado una dependencia entre la disminución de la confiabilidad y la disminución de los parámetros de calidad del suministro eléctrico.
- La disminución de la tensión en determinados niveles trae como consecuencia el aumento de las demandas de potencia reactiva de los equipos eléctricos, esto conduce al aumento de las pérdidas de energía en las redes y al empeoramiento progresivo de las condiciones de tensión.

- La presencia de armónicos superiores en los sistemas implica el aumento de pérdidas en las líneas y la aparición de posibles condiciones de resonancia que provocan sobretensiones permanentes y transitorias en eventos de conmutación.

Equipamiento	Depresiones de tensión		Sobretensiones	Armónicos	Desbalance	Fluctuaciones de tensión
	<0.5s	>0.5s				
<i>Motores asincrónicos</i>						
<i>Motores sincrónicos</i>						
<i>Actuadores</i>						
<i>Accionamiento de velocidad</i>						
<i>Dispositivos de procesamiento de datos, control numérico</i>						

FIG. 4 AFECTACIONES AL SISTEMA

Equipamiento	Depresiones de tensión		Sobretensiones	Armónicos	Desbalance	Fluctuaciones de tensión
	<0.5s	>0.5s				
<i>Hornos de inducción</i>						
<i>Iluminación</i>						
<i>Bancos de capacitores</i>						
<i>Transformadores</i>						
<i>Inversores</i>						
<i>Interruptor</i>						
<i>Cables</i>						

FIG. 5 AFECTACIONES AL SISTEMA

1.8 CONSUMIDORES CONTAMINANTES DE LA RED

- Existen consumidores altamente contaminantes de la red, al tener equipos, en muchos casos de envergadura, que significan cargas alineales grandes generadoras de armónicos, tales son los casos de los hornos de fundición por arco eléctrico, los equipos de soldadura por arco, los equipos numéricos, los equipos de cómputo, los laminadores, etc.
- Las fuentes alternativas de energía no convencional, como la eólica y la solar, usualmente utilizan generadores con inversores, esquemas híbridos en muchos casos conectados a las redes de distribución. El proceso de conversión de cd a ca conlleva la generación de armónicos.

A. POR QUÉ LAS CARGAS ALINEALES SON CONTAMINANTES DE LA RED ELÉCTRICA?

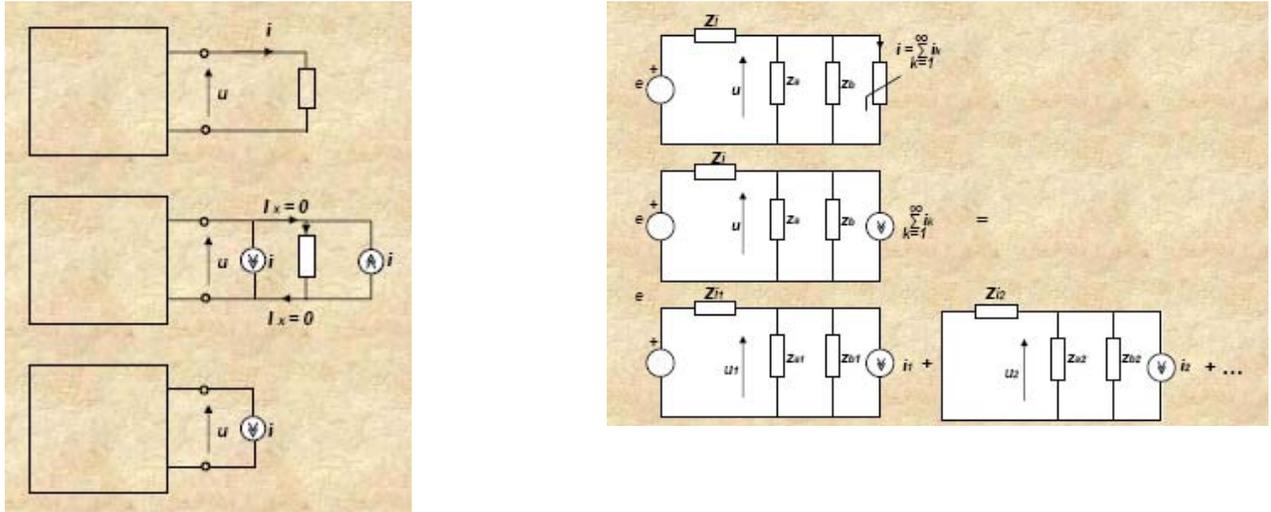


FIG. 6 LAS CARGAS ALINEALES SON CONTAMINANTES DE LA RED

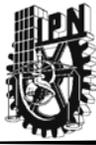
B. CONTAMINANTES DE LA RED CON LAS PERTURBACIONES DE LA TENSIÓN

Situaciones que conllevan a altas corrientes, causando caídas de tensión en las impedancias de la red.

- Fallas en los circuitos de transmisión y distribución.
- Recierres automáticos en los esquemas de protecciones de la red.

Conexión y desconexión de grandes cargas (motores asíncronos, hornos por arco eléctrico, máquinas de soldar, calderas eléctricas, etc) en función de las potencias de cortocircuito en los puntos de instalación.

- Fallas del aislamiento.



- Condiciones de ferresonancia.
- Fallas longitudinales en el neutro de los sistemas.
- Sobre compensación de potencia reactiva
- Conmutaciones en los sistemas de transmisión y distribución.
- Descargas atmosféricas (impactos directos e inducidos).

Responsabilidad en el aseguramiento de la calidad del Servicio Electrico

- El papel principal en la calidad del servicio eléctrico recae, por supuesto, en la empresa del servicio público, la que debe mantener los parámetros de tensión y frecuencia en los valores nominales o de trabajo en todo momento, pero tienen una incidencia muy importante los propios consumidores, causantes de contaminación de la red, desde los consumidores del sector residencial hasta los grandes consumidores industriales.
- La contaminación del sector residencial hacia la red es fundamentalmente de carácter extensivo, pues el peso relativo de un solo consumidor es insignificante.

C. INDICADORES DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA Y SU CÁLCULO

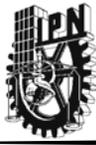
Desviación de la tensión (fluctuación lenta)

U -Unom

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{U_{nom}} * 100$$

Unom

Fluctuación rápida de tensión (parpadeo, flicker)½



$$P_{st} = (0.0314 P_{0.1} + 0.0525 P_1 + 0.0657 P_3 + 0.28 P_{10} + 0.08 P_{50})$$

Pst Índice de severidad del flicker de corta duración

P0.1, P1, P3, P10, P50 niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del período de observación

- Bajón de tensión

por debajo del 90% del Uref caracterizado por la magnitud efectiva y la duración

$\Delta t < T/2$ transitorias

- $T/2 < \Delta t < 30T$ instantánea
- $30T < \Delta t < 3 \text{ s}$ momentáneas
- $3 \text{ s} < \Delta t < 1 \text{ min}$ temporales
- $\Delta t > 1 \text{ min}$ sostenida

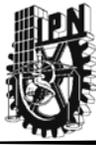
Distorsión de la onda de tensión (o corriente)

V_i

$V_i' = \frac{V_i}{V_{nom}} * 100$ valor porcentual de la tensión del armónico i

V_{nom}

402 1/2



$T_{hd} = (\sum(V_i)) / V_{nom}$ **distorsión total de armónicos**

V_i valor efectivo de los armónicos superiores

Asimetría de la tensión

$K_2 = 100 * U_2 / U_1$ **coeficiente de secuencia negativa**

$U_1 = 0.33 (U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})$

$U_2 = 0.62 (U_{dmax} - U_{dmin})$

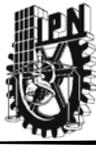
U_{dmax} y U_{dmin} mayor y menor desbalance entre las magnitudes de tensión

$K_0 = 173 U_0 / U_1$ **coeficiente de secuencia cero**

Normas para valorar la Calidad del Suministro de Energía Eléctrica

En ella se han considerado los siguientes fenómenos perturbadores:

- Armónicos
- Interarmónicos
- Fluctuaciones de tensión
- Caídas de voltajes e interrupciones cortas del suministro
- Desbalances de tensión
- Señales principales
- Variaciones de frecuencia



- Componentes de cd en los sistemas de ca

1.9 NIVEL DE CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO

- A partir de los niveles de inmunidad del equipamiento se pueden esperar niveles apropiados de comportamiento del sistema a perturbaciones en diferentes clases de entornos electromagnéticos, como por ejemplo podría ser, sólo con propósitos indicativos (no como norma):

Perturbación Clase1 Clase2 Clase3

Variación de tensión $\Delta U/U_n$ + -8% + -10% +10% -15%

Bajón de tensión

$\Delta U/U_n$ 10%-100% 10%-100% 10%-100%

Δt (cantidad de semiciclos) 1 1-300 1-300

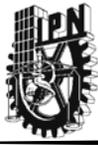
Interrupciones cortas ninguna ≤ 60

Desbalances (U_2/U_1) 2% 2% 3%

Variaciones de frecuencia $\Delta f/f_n$ + -1% + -1% + -2%

1.10 NORMAS PARA VALORAR LA CALIDAD DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Es muy utilizada la norma IEEE-519-92 que referentes a la emisión de armónicos de tensión establece las siguientes prescripciones:



Distorsión de tensión total la tensión en los Armónicos individuales, % thd:

Hasta 69 kV 3.0 5.0

69-161 kV 1.5 2.5

Más de 161 kV 1.0 1.5

Para bajas tensiones se establecen valores normativos mayores que los arriba indicados, siendo los valores máximos del thd hasta 1 kV de 6% para los impares y 3% para los pares

La distorsión de corrientes en sistemas de transmisión > 161 kV, la citada norma los estipula de la siguiente manera:

Número de orden de los armónicos individuales

$I_{cc}/I_{carga} < 11$ 11 < $h < 17$ 17 < $h < 23$ 23 < $h < 35$ 35 < h thd

< 50 2.0 1.0 0.75 0.3 0.15 2.5

> 50 3.0 1.5 1.15 0.45 0.22 3.75

Nota: los armónicos pares se limitan al 25% de los impares

En el caso de K_2 y K_0 se establecen los valores de 2% como normal y 4% como máximo para ambos en cualquier nivel de tensión



CAPITULO

II

“DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.”



2.1 DISTURBIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Los problemas relacionados con la Energía Eléctrica de Calidad tienen muchos nombres y descripciones. Fuentes, transitorios, cortes de suministro y ruido son algunas de las descripciones más comunes dadas a los problemas, pero qué significan? Esta sección nos introduce a las definiciones y terminología relacionadas con la Calidad de la Energía Eléctrica.

A. INTERRUPCIONES.

Una interrupción o paralización es una pérdida completa del voltaje que por lo común puede ser tan corta como 30 ciclos o durar hasta varias horas, o en algunos casos días. Las interrupciones suelen ser causadas por la operación inducida de los interruptores automáticos de circuito o de los fusibles. Algunas de estas interrupciones podrían clasificarse como prolongadas, mientras que otras podrían considerarse como temporales o momentáneas.

Interrupciones prolongadas. Las interrupciones prolongadas son el tipo más reconocible de perturbación. Se presentan ordinariamente como resultado de fallas eléctricas permanentes. El suministrador de energía eléctrica diseña los sistemas de transmisión y distribución eléctrica a manera de aislar las fallas permanentes y las interrupciones prolongadas resultantes, al área más pequeña posible. La figura II.7 muestra el diagrama unificar simple de un circuito típico de distribución y el aislamiento de las fallas eléctricas. La coordinación de los dispositivos eléctricos de protección en la red de utilización siguen una filosofía similar.

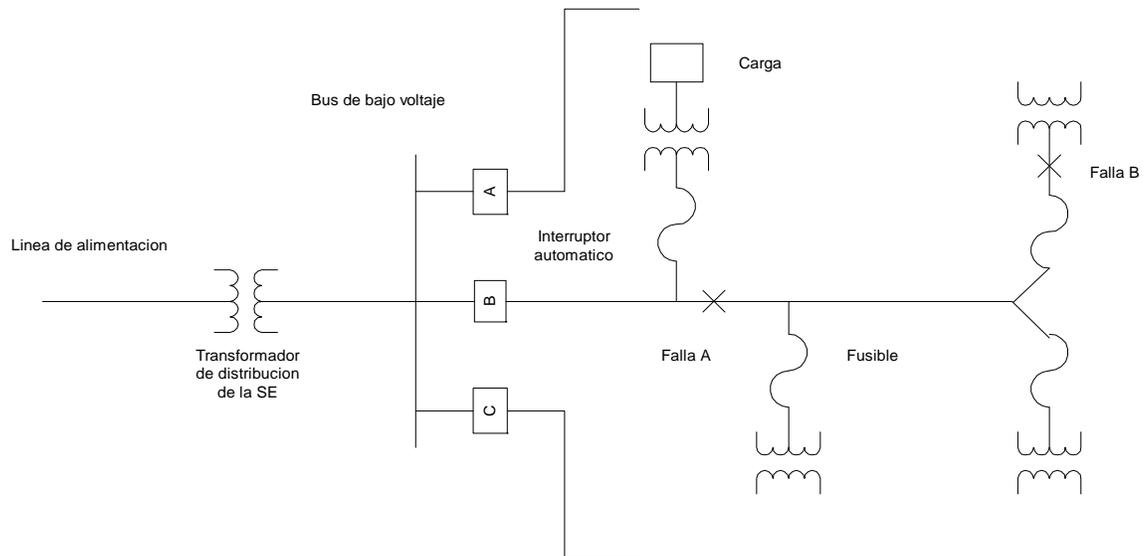


FIG. 7 CIRCUITO TÍPICO DE DISTRIBUCIÓN.

En el circuito, típico de distribución, una falla en el punto A hará que el interruptor B haga su ciclo por las operaciones rápida y retardada y finalmente se cierre. Una falla temporal en el punto A puede permitir que el interruptor B recorra varios ciclos de restablecimiento y posiblemente despeje la falla. Una falla temporal en B hará que el interruptor B recorra varios ciclos de restablecimiento. La falla puede despejarse por la acción del interruptor B, sin que opere el fusible, excepto que el fusible se haya seleccionado del tamaño para operar ya sea antes del primer ciclo de restablecimiento o antes de que el cortacircuito B recorra ciclos para cerrar el circuito.

Interrupciones momentáneas. Las interrupciones momentáneas son pérdidas temporales totales del voltaje y las origina a menudo la operación de los dispositivos automáticos de protección por sobrecorriente. Muchas fallas eléctricas que ocurren en los circuitos de distribución son de naturaleza temporal. Al interrumpir brevemente la corriente de falla generada por estas condiciones temporales, con un dispositivo automático de despeje de fallas, puede lograrse que la falla temporal se resuelva sin dañar los conductores del circuito ni el equipo.

La disminución del voltaje puede ocurrir como consecuencia de:

- Cargas grandes tales como motores o soldadoras eléctricas que estén en el mismo circuito.
- Caída total del voltaje de los buses en el circuito de distribución, por arranque de motores.
- Por fallas eléctricas en los circuitos alimentados desde la misma fuente de generación.

Un usuario que experimenta un voltaje de servicio o utilización de larga duración menor que el límite adecuado nominal de bajo voltaje de operación, se puede considerar que esta experimentando una situación de bajo voltaje. Una condición de este tipo puede ser provocada por varios factores, como una instalación eléctrica domestica sobrecargada o mala, malas conexiones o una caída de voltaje en el sistema.

Sobrevoltaje. Se llama así a los incrementos en el voltaje rms en la forma de onda que ocurren a la frecuencia fundamental y donde el tiempo de duración es mayor a unos cuantos segundos como se indica en la figura II.8. Normalmente se habla de un sobrevoltaje cuando se tienen valores de al menos 10% arriba del valor nominal. Pueden ocasionarlos las descargas de rayos o la interrupción de cargas grandes.

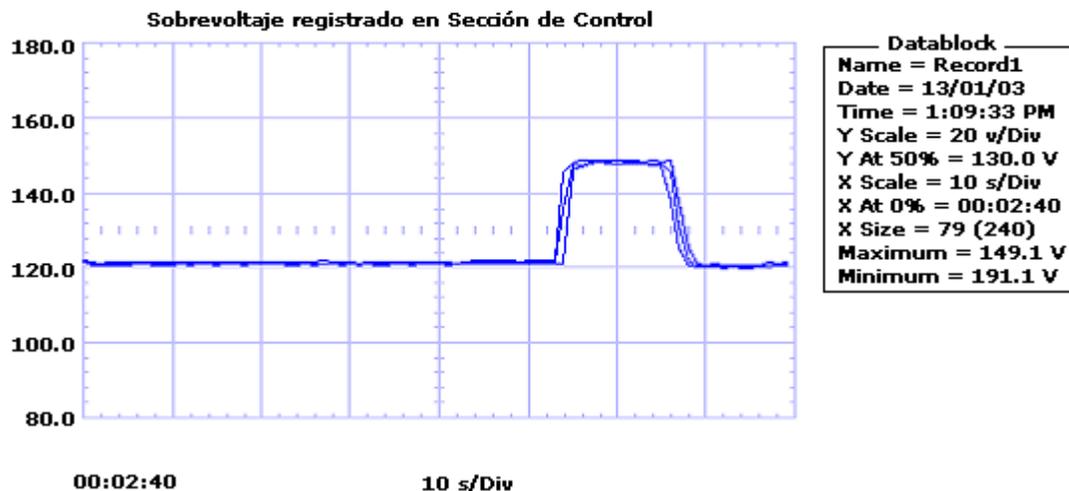


FIG 8 SOBREVOLTAJE REGISTRADO EN LA SEÑAL RMS DE VOLTAJE.



2.3 DISTURBIOS.

Un disturbio es un transitorio de corta duración en la forma de onda de voltaje de CA el cual se caracteriza por una breve discontinuidad repentina en la forma de onda. Puede ser de cualquier polaridad y puede ser aditivo o sustractivo de la forma de onda nominal, estas perturbaciones se pueden presentar en cualquier sistema eléctrico tanto en magnitud y frecuencias distintas a los valores fundamentales (60 Hz). Estas perturbaciones se manifiestan como sobre voltajes, bajo voltajes, impulsos transitorios, distorsión, ruido, etc. Los disturbios tienen dos tipos de orígenes, los externos y los internos al Sistema Eléctrico. Los disturbios de origen externos son los producidos por las descargas atmosféricas (rayos) en las líneas eléctricas, contactos incidentales entre dos líneas eléctricas principalmente los de origen internos son producidos por la operación de dispositivos de desconexión, conmutación electrónica (drive's, PLC's, computadoras, etc.), arranque de motores, entre otros.

Un disturbio puede tener una duración extremadamente corta y alta magnitud. Las instalaciones están sometidas a una gran cantidad de disturbios (fluctuaciones de tensión y corriente con bases de tiempo muy pequeñas con valores de 6000 V / 3000 A según IEEE 587 cat B). Estos disturbios pueden ser de origen atmosférico o eléctrico.

Un disturbio se observa como un impulso de corta duración de gran amplitud que aparece superimpuesto en la forma de onda del voltaje o corriente. Los Transitorios se clasifican en dos categorías:

Disturbio en forma de impulso. También conocido como Pico Transitorio de Voltaje, es un cambio repentino de la condición de estado estable del voltaje, corriente o ambos el cual es unidireccional en polaridad (principalmente positivo o negativo). El transitorio impulsivo es caracterizado normalmente por su elevación y tiempo de decaimiento el cual puede ser obtenido de su contenido espectral. Figura II.9.

Los eventos transitorios involucran altas frecuencias. Ellos pueden excitar la frecuencia natural de circuitos del sistema eléctrico y producir Transitorios Oscilatorios.

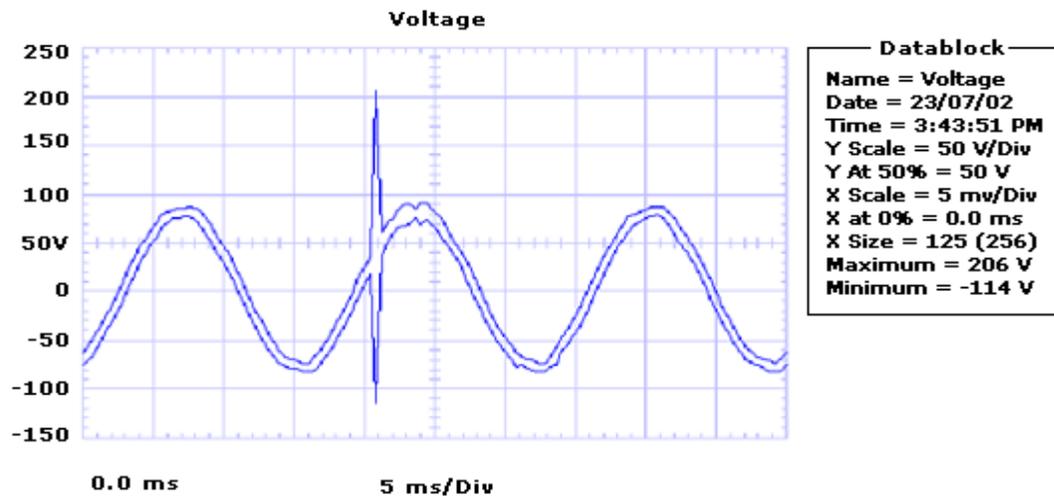
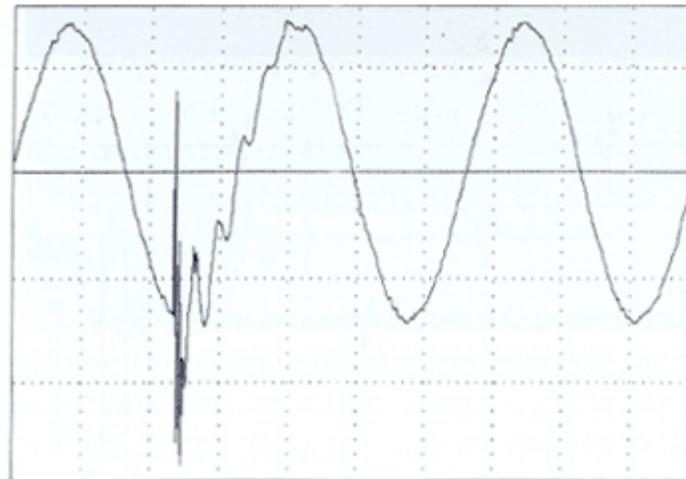


FIG 9 IMPULSO TRANSITORIO EN UNA SEÑAL DE VOLTAJE.

Por ejemplo, un Transitorio de $1.2 \times 50\text{ms}$, 2000 Volts, nominalmente se eleva desde cero hasta su valor pico de 2000 Volts en 1.2ms y entonces decae a la mitad de su valor pico en 50ms.

Disturbio oscilatorio. Es un cambio repentino de la condición de estado estable del voltaje, corriente o ambos, el cual incluye valores de ambas polaridades, positivos y negativos. Un Transitorio Oscilatorio consiste de un voltaje o corriente cuyos valores instantáneos cambian rápidamente de polaridad. Esto es descrito por su contenido espectral (frecuencia predominante) así como su duración y magnitud. Uno de los impulsos oscilatorios más comunes ocurre cuando capacitores para corrección de factor de potencia son switcheados en el sistema de potencia. FIG 10.



Horizontal 5 milliseconds/division
V rms: Prev = 494.2, min = 498.8, max = 500.4

Vertical 500 Volts/division
Worst Imp = 1078 V_{kp}, 258 deg

FIG 10. DISTURBIO OSCILATORIO.

2.4 ARMÓNICAS.

Son señales senoidales de frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la señal de voltaje o corriente. Estas señales se suman a la señal de frecuencia fundamental produciendo deformación en la onda senoidal original. La distorsión armónica es una forma de ruido eléctrico. Las cargas lineales, las que toman corriente en proporción directa del voltaje aplicado, no generan grandes niveles de armónicas. Las cargas no lineales no toman corriente en pulsos. Estas corrientes de pulsos crean caídas de voltaje en todo el sistema como resultado de la interacción de la corriente con la impedancia del sistema. Las distorsiones de voltaje creadas por las cargas no lineales pueden crear distorsión del voltaje más allá del sistema de cableado de los terrenos de la planta, a través del sistema de la compañía, en las instalaciones de otro usuario. Las cargas concentradas que generan grandes niveles de terceras armónicas pueden dar lugar a una corriente de neutro mucho más alta que la que normalmente se encuentra en circuitos en los que las corrientes de retorno de las diferentes fases se anulan.

El alimentar a ciertas cargas estas formas de onda distorsionadas y sus componentes armónicas asociadas puede provocar algunos efectos adversos tales como el calentamiento de motores y transformadores debido a las pérdidas inducidas por las altas frecuencias, calentamiento de bancos de capacitores, daño por falla en el equipo y operación no apropiada de interruptores (termomagnéticos y fusibles). Los controles

electrónicos pueden operar erráticamente particularmente cuando ellos dependen de una onda senoidal limpia para sincronización o propósitos de control.

Es una deformación que se presenta en la onda de voltaje debido a la operación normal de las cargas no-lineales, cuya curva voltaje-corriente es no-lineal, es decir que la forma de consumir la corriente es independiente de la onda senoidal de voltaje de alimentación produciendo tal distorsión. Para efectos de comparación, en las dos figuras siguientes se muestran tanto el voltaje y corriente en terminales de una carga lineal como en una no lineal.

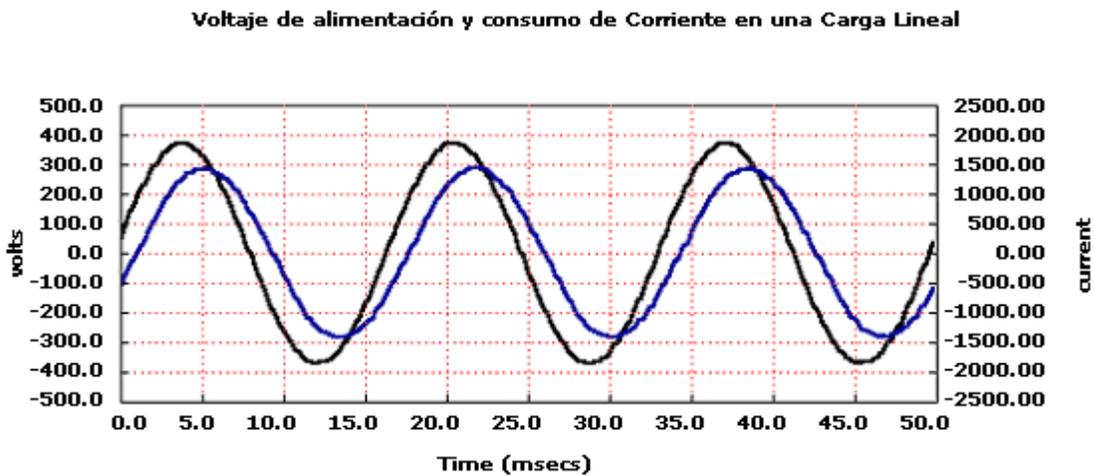


FIG 11 EL COMPORTAMIENTO VOLTAJE-CORRIENTE ES SENOIDAL EN UNA CARGA LINEAL.

Señales de Voltaje y Corriente con Distorsión Armónica

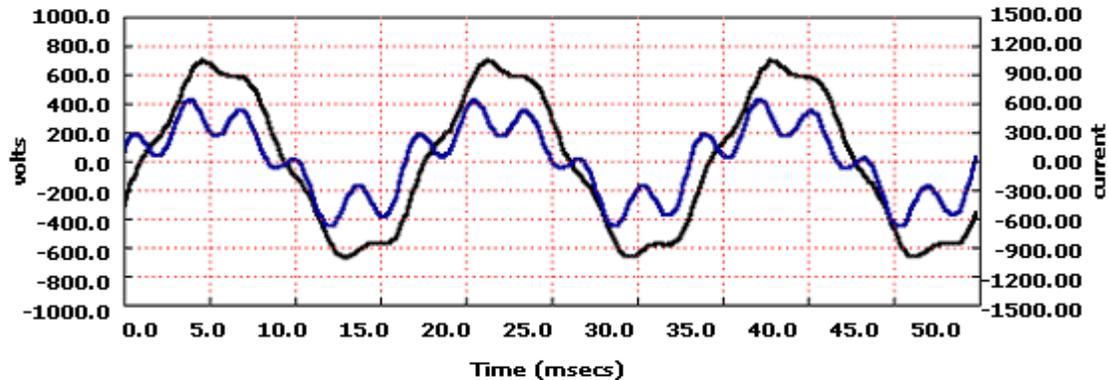


FIGURA 12 DEFORMACIÓN DE LAS SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE POR EL EFECTO DE CARGA NO-LINEAL.

2.5 RUIDO DE ALTA FRECUENCIA.

El ruido eléctrico se produce en sistemas de potencia debido a la operación normal de dispositivos electrónicos, circuitos de control, equipo de formación de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes de energía switchables. Los impulsos son condiciones de sobrevoltajes que duran menos de medio ciclo. A causa de la forma de la onda, a los impulsos se les llama en ocasiones “puntas de conmutación” o “transitorios”. Los rayos y la operación de interruptores pueden ocasionar impulsos y transitorios.

El ruido es un impulso repetitivo sobrepuesto en la onda senoidal de potencia. Los transmisores de radio, lámparas fluorescentes, cargadores de acumuladores, computadoras y conexiones eléctricas flojas pueden ocasionar ruido eléctrico.

Se define como señales eléctricas indeseables que producen efectos indeseables en equipo electrónico sensible. Su contenido espectral es de un ancho de banda menor a 200KHz superpuesto sobre la señal de voltaje o corriente, para voltaje existen dos tipos, modo normal o transversal, que es entre línea y línea ó línea y neutro y modo común, cuando se presenta entre línea y tierra ó neutro y tierra. También puede encontrarse presente en los conductores neutros o bien en líneas de señales. Las perturbaciones de modo

común son voltajes medidos entre ya sea una fase energizada y tierra o ambos. Las perturbaciones de modo transversal son voltajes medidos solamente entre conductores que lleven corriente. Las perturbaciones de modo transversal pueden volverse de modo común por el mutuo acoplamiento entre otros conductores y tierra cuando viajan por todo el sistema eléctrico.

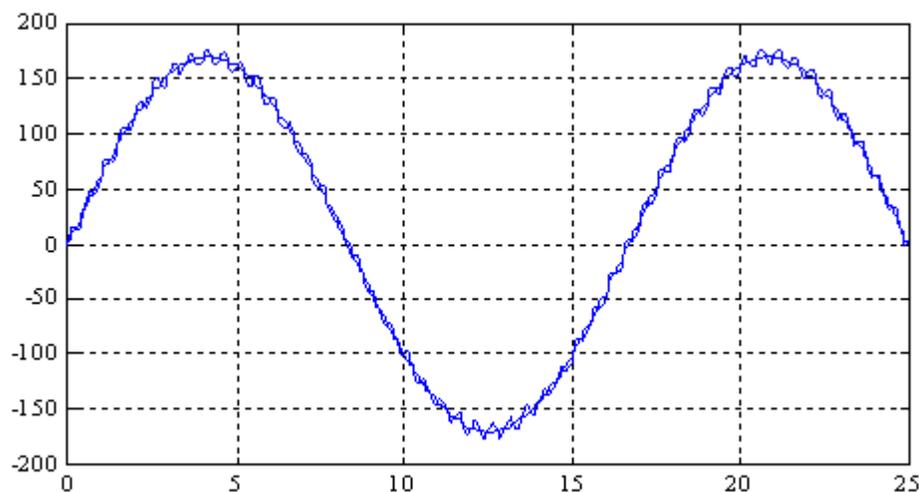


FIGURA 13 SEÑAL DE VOLTAJE CON PRESENCIA DE SEÑALES DE ALTA FRECUENCIA.

2.6 FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia es un indicador de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica, para producir un trabajo útil, es decir, es el porcentaje de la potencia entregada por la empresa eléctrica que se convierte en trabajo en el equipo conectado. En otras palabras, el factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa (Kw.) usada en un sistema y la potencia aparente (KVA) que se obtiene de la compañía eléctrica. El rango de valores posibles del factor de potencia (fp) varía entre 0 y 1.

Debido a esto a menudo se le aplican los términos factor de potencia adelantado o atrasado, términos muy relacionados con la dirección del flujo de la potencia real y reactiva. Como regla general se asume que un factor de potencia está atrasado si la carga requiere kvars y en adelanto si la carga suministra kvars.

De acuerdo con el triángulo de potencias de la figura 14 se obtiene que el factor de potencia depende de la relación entre la potencia activa y la potencia aparente:

$$f.d.p. \equiv \cos \phi = \frac{P}{S}$$

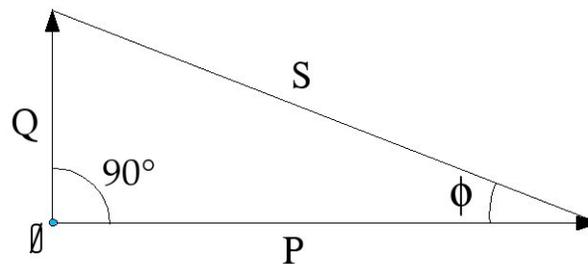


FIG 14 TRIANGULO DE POTENCIAS.

Su valor depende de las características del propio circuito, y es un parámetro importante en instalaciones con una importante demanda de potencia eléctrica. De acuerdo con su definición, el factor de potencia es adimensional y solamente puede tomar valores entre 0 y 1. En un circuito resistivo puro recorrido por una corriente alterna, la intensidad y la tensión están en fase ($\phi=0$), esto es, cambian de polaridad en el mismo instante en cada ciclo, siendo por lo tanto el factor de potencia la unidad. Por otro lado, en un circuito reactivo puro, la intensidad y la tensión están en cuadratura ($\phi=90^\circ$) siendo nulo el valor del fp.

En la práctica los circuitos no pueden ser puramente resistivos ni reactivos, observándose desfases, más o menos significativos, entre las formas de onda de la corriente y el voltaje. Así, si el fp. está cercano a la unidad, se dirá que es un circuito fuertemente resistivo por lo que su fp. es alto, mientras que si está cercano a cero que es fuertemente reactivo y su fp. es bajo. Cuando el circuito sea de carácter inductivo, caso más común, se hablará de un fp. en retraso, mientras que se dice en adelanto cuando lo es de carácter capacitivo.

Un bajo factor de potencia significa pérdidas de energía, lo que afecta la eficiencia en la operación del sistema eléctrico. Se penaliza con un recargo adicional en la factura eléctrica a las empresas que tengan un factor de potencia inferior a 0.9 o 0.95 según su potencia demandada.



Cuando se tiene un bajo factor de potencia, se tienen costos adicionales que repercuten negativamente en la facturación del cliente, por lo que debe solucionarse el problema mediante la instalación de bancos de capacitores eléctricos. Corregir el bajo factor de potencia en una instalación es un buen negocio, no sólo porque se evitarán las multas en las facturas eléctricas, sino porque los equipos operarán más eficientemente, reduciendo los costos por consumo de energía.

2.7 SISTEMAS DE TIERRAS.

El propósito de aterrizar los sistemas eléctricos es para limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o, de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos. El Estudio de Tierras Eléctricas consiste en la inspección de las instalaciones eléctricas de la planta con el objetivo de comprobar que éstas cumplan con los criterios de Puesta a Tierra que dicta la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999 (Art. 250). Las desviaciones que sean encontradas serán documentadas y se realizará la recomendación correspondiente para cumplir con la Norma y mejorar el Sistema de Puesta a Tierra en la planta

El Estudio de tierras eléctricas tiene un impacto directo sobre la seguridad eléctrica en la planta. Un sistema de puesta a tierra efectivo, garantizará la seguridad física del personal de la planta. Además de evitar que efectos atmosféricos afecten las instalaciones y los equipos. De acuerdo a la ley sobre Instalaciones, Suministro y Uso de la Energía Eléctrica (NOM-001-SEDE-1999) en el art. 250. "... Los sistemas y circuitos deberán ponerse a tierra para limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, a fenómenos transitorios en el propio circuito o a contactos accidentales con líneas de mayor tensión así como para estabilizar la tensión a tierra en condiciones normales de operación y para facilitar la acción de los dispositivos de sobrecorriente en caso de fallas a tierra...". Un sistema de puesta a tierra consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen nuestros equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa. El objetivo de un sistema de puesta a tierra es:

- ❖ El de brindar seguridad a las personas.
- ❖ Proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección.

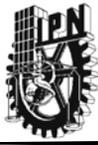


- ❖ Establecer la permanencia, de un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.

Para realizar un sistema de puesta a tierra se necesitan electrodos de tierra, los cuales existen de muchos tipos, algunos mejores que otros en ciertas características como el costo, entre otras, el sistema de electrodos de puesta a tierra se forma interconectando los siguientes tipos de electrodos:

- ❖ Tubería metálica de agua enterrada.
- ❖ Estructura metálica del inmueble.
- ❖ Electrodo empotrado en concreto.
- ❖ Anillo de tierra.

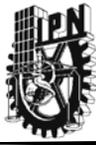
Los procedimientos para diseñar sistemas de tierras se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.



CAPITULO

III

“DISTURBIOS ELECTRICOS.”



3.1 DISTURBIOS ELÉCTRICOS.

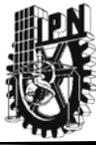
Podemos decir que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del cliente y, proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica,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

Existen diferentes perturbaciones que ocurren en los sistemas de energía por una variedad de razones tales como fallas, operación de interruptores y rayos. Las más usuales son: fluctuaciones de voltaje, sobre tensiones transitorias, interrupciones de energía, ruido eléctrico (interferencias) y distorsiones armónicas. Es posible que los disturbios puedan ser muy altos y den lugar a la falla del aislamiento del equipo con resultados destructivos. Es por tanto imperativo que se diseñen los sistemas de energía de tal manera que los disturbios esperados queden debajo de la capacidad de soporte del aislamiento del equipo.

A. CLASIFICACIÓN.

Los disturbios en el sistema son variaciones o perturbaciones que se pueden presentar en cualquier sistema eléctrico tanto en magnitud como en frecuencias distintas a los valores fundamentales, generalmente temporales en la tensión del sistema, que pueden causar mala operación o fallas del equipo. La variación de frecuencia puede ocasionalmente ser un factor en los disturbios del sistema, estas perturbaciones se manifiestan como sobre voltajes, bajo voltajes, impulsos transitorios, distorsión, ruido, etc., especialmente cuando una carga es alimentada por un generador de emergencia u ocurre un desequilibrio entre la carga de la planta industrial y la generación debido a la pérdida del suministro eléctrico. Sin embargo cuando el sistema eléctrico del usuario está interconectado a una red de potencia relativamente fuerte, la variación de frecuencia resulta a veces de preocupación insignificante.

Los disturbios tienen dos tipos de orígenes, los naturales o externos y los no naturales o internos al Sistema Eléctrico. Los disturbios de origen externos son los producidos por las descargas atmosféricas (rayos) en las líneas eléctricas, contactos incidentales entre dos líneas eléctricas principalmente. Los de origen internos



son producidos por la operación de dispositivos de desconexión, conmutación electrónica (drive's, PLC's, computadoras, etc.), arranque de motores, entre otros.

Los disturbios externos o naturales son generados fuera de la instalación eléctrica, en la red de distribución de media y alta tensión o por fenómenos como rayos, descargas eléctricas, campos magnéticos, etc. Son el de menor ocurrencia, sin embargo los de mayor potencia destructiva, también se les conoce como destructivos y cuando se desvían se van por tierra.

B. TORMENTAS ELÉCTRICAS.

La descarga del rayo sobre cualquier cable conductor, tanto en:

- líneas eléctricas (redes de baja tensión)
- líneas de datos (telefónicas e informáticas)
- líneas de alta frecuencia (antenas, coaxiales de radio frecuencia y transmisión)
- cables de alarmas o conductores de conexión a tierra.

Provocan transitorios que se caracterizan por su corta duración, crecimiento rápido y valores de cresta muy elevados (varios cientos de kV).

La descarga de un rayo se propaga en un radio de varios kilómetros y su dispersión en la tierra eleva su potencial, induciendo fuertes sobretensiones en los cables subterráneos y aumentando la tensión en las tomas de tierra.

"El rayo no es el único causante de sobretensiones transitorias", también lo son:

- Conmutaciones de compañías eléctricas.
- Actuación de dispositivos de protección de redes.
- Cortocircuitos.
- Entrada / Salida de cargas inductivas.

- Conmutaciones de máquinas de gran potencia.
- Compresores.
- ▲ Fotocopiadoras.
- ▲ Descargas electroestáticas.
- ▲ Actuación de bancos de capacitores.
- ▲ Transferencias de energía (grupos electrógenos)

En una instalación eléctrica todos los conductores que acceden desde el exterior son susceptibles de facilitar el camino a las sobretensiones transitorias, provocando así perturbaciones en la alimentación de todos los sistemas conectados.

Las sobretensiones producidas por fenómenos atmosféricos llegan hasta las instalaciones de tres formas:

Sobretensión conducida: El rayo puede caer directamente en las líneas aéreas, propagándose la sobretensión a lo largo de varios kilómetros; llegando al usuario y derivándose a tierra a través de sus equipos, produciéndoles averías o su total destrucción, figura 15 .

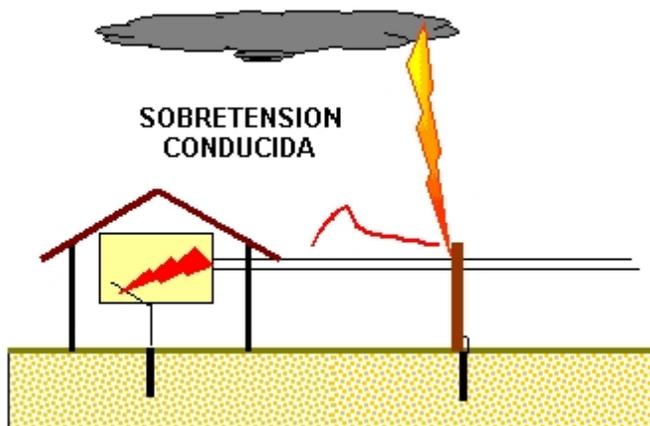


FIGURA 15 EJEMPLO DE UNA SOBRETENSIÓN CONDUCTIDA.

Sobretensión inducida: La radiación emitida por el impacto del rayo sobre un objeto (poste, árbol, pararrayos, etc.) próximo a líneas eléctricas o telefónicas, induce corrientes transitorias en éstas, transmitiéndose al interior de nuestras instalaciones provocando averías o destrucción de los equipos conectados figura 16.

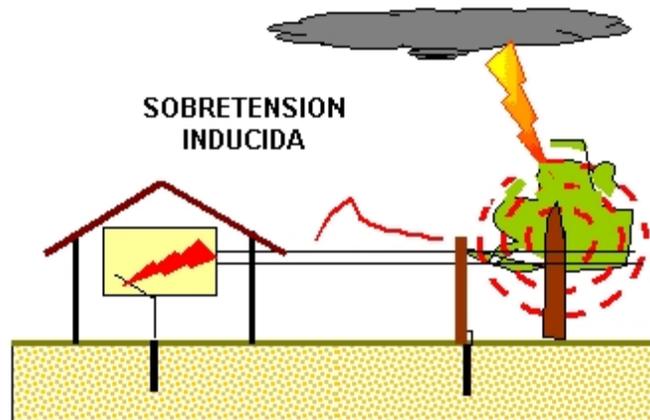


FIGURA 16 EJEMPLO DE UNA SOBRETENSIÓN INDUCIDA.

Aumento del potencial de tierra: Cuando un rayo cae directamente al suelo o a través de una estructura conectada a tierra (puede ser un poste eléctrico, un pararrayos, etc.) la corriente de descarga del rayo puede elevar el potencial de tierra varios miles de voltios como consecuencia de la corriente que circula por el terreno figura 17.

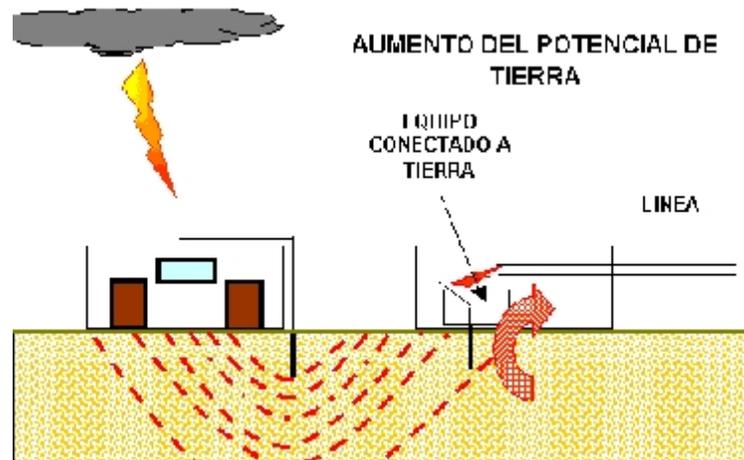


FIGURA 17 EJEMPLO DE UN AUMENTO DE POTENCIAL CON REFERENCIA A TIERRA.

Las descargas de rayos en árboles, terrenos u otros objetos cercanos pueden dar lugar a sobrevoltajes en el sistema de energía, por acoplamiento. El acoplamiento puede ser conductivo por intermedio del subsuelo conductor y las estructuras de aterrizaje del sistema. En una situación típica, pueden estar presentes todos los mecanismos de acoplamiento y dar como resultado un sobrevoltaje en el sistema de energía inductiva o capacitiva. A estos se les llaman sobrevoltajes inducidos y, en general, son mucho más bajos que los que ocurren después de una descarga directa.

C. VOLTAJES TRANSITORIOS.

Las sobretensiones transitorias se refieren a variaciones en la forma de onda de tensión que dan como resultado condiciones de sobretensión durante una fracción de ciclo de la frecuencia fundamental. Las fuentes comunes de estos transitorios son los rayos, operación de los dispositivos de interrupción de los sistemas eléctricos y el arqueo de conexiones flojas o fallas intermitentes.

La operación de interruptores es frecuente en un sistema de energía. Se efectúan una gran variedad de operaciones de desconexión o de conexión para los trabajos de rutina o bien en forma automática por los sistemas de protección y control. Las operaciones típicas de interruptores son:

- Líneas de transmisión.

- Cables.
- Capacitores en derivación/serie.
- Reactores en derivación.
- Transformadores.
- Generadores/motores.

Otra clase de transitorios por operación de interruptores son los que genera el salto de arco en aislamiento y por reencendido de cortacircuitos. Estos fenómenos son equivalentes al cierre de un interruptor y generan sobrevoltajes por operación de interruptores que se propagan en el sistema. Los sobrevoltajes que resultan de las operaciones de interruptores son típicamente proporcionales al voltaje de la frecuencia de la red. Por ejemplo, la energización de una línea trifásica puede resultar en un sobrevoltaje en el extremo abierto que puede ser muy alto, hasta de 5 p.u., dependiendo de la sincronización de la operación de los interruptores con respecto a la fuente. El contenido de frecuencia de los transitorios de interrupción depende de los parámetros del sistema. Los transitorios (figura 18) ocasionados por la operación de interruptores en sistemas de alto voltaje, es decir, superiores a 230Kv, pueden ser bastante altos y deben controlarse para evitar la necesidad de aislamiento de mas alto grado.

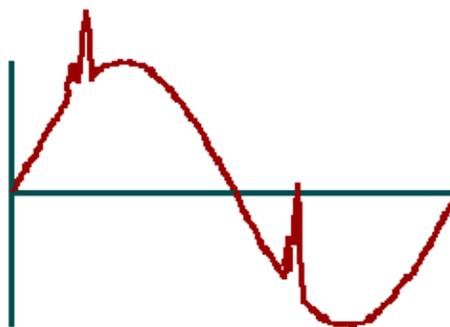


FIGURA 18 TRANSITORIO EN UNA ONDA SENOIDAL.

D. SAGS Y BAJO VOLTAJE.

Son decrementos en el voltaje o corriente que ocurren a la frecuencia fundamental con magnitudes entre el 10% y el 90% del valor nominal que duran de 0.5 ciclos a 1 minuto. Estos son normalmente causados cuando cargas pesadas tales como motores son puestos en operación. Estas cargas tienen corrientes de arranque de seis a diez veces su corriente nominal por lo que llegan a afectar la señal de voltaje. Figura 19.

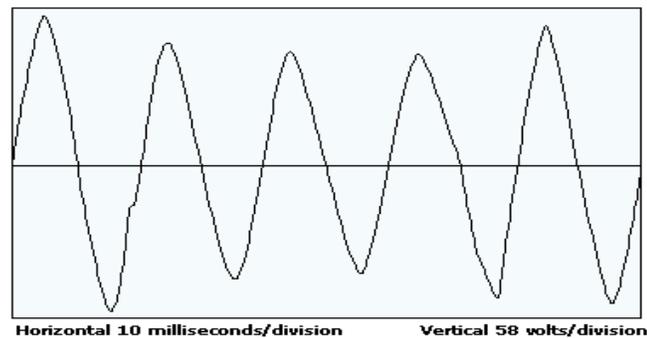


FIGURA 19 SAG REGISTRADO EN UNA SEÑAL DE VOLTAJE.

E. SWELLS Y ALTO VOLTAJE.

Un incremento temporal en el valor RMS del voltaje de más del 10% del valor nominal que ocurre a la frecuencia fundamental con duración de 0.5 ciclos a 1 minuto. Figura 20.

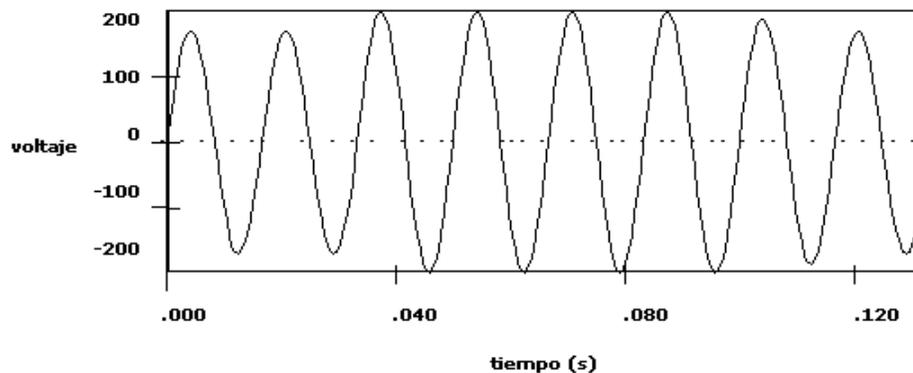


FIGURA 20 SWELL REGISTRADO EN UNA SEÑAL DE VOLTAJE.

F. NOTCH.

Es una disturbio periodico en la forma de onda del voltaje causado por la operación normal de aparatos electrónicos cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Ya que estos eventos ocurren continuamente, ellos pueden ser caracterizados a través del espectro armónico de la señal de voltaje afectada. Sin embargo ya que las frecuencias asociadas con este efecto son bastante altas y pueden no ser fácilmente caracterizadas con el equipo de medición normalmente usado para analisis de Armónicas el notching es tratado como un caso especial. Figura 21.

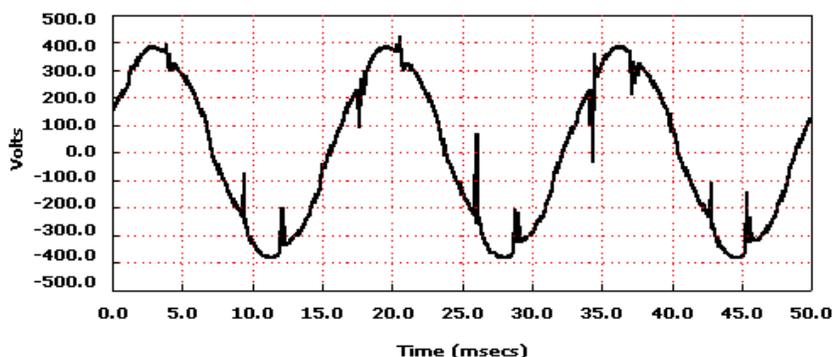


FIGURA 21 ONDA DE VOLTAJE CON NOTCHES.

3.2 FUENTES GENERADORAS DE DISTURBIOS.

Las caídas de tensión momentáneas de 60 Hz ocasionadas por fallas y arranques de cargas grandes, se han vuelto un problema común en los años recientes, produciendo efectos que van desde el parpadeo de relojes digitales en los hogares hasta procesos industriales interrumpidos. Esta es una condición que típicamente ocurre cuando se inicia una falla en el sistema eléctrico y dura hasta que la falla sea eliminada por un dispositivo de sobrecorriente. La falla puede ocurrir en la planta industrial o en el sistema de la empresa eléctrica. Este tipo de condición puede ocurrir también durante el arranque de motores grandes.

Los disturbios internos son generados dentro de la instalación eléctrica normalmente por los mismos equipos internos y dispositivos de switcheo. Son los de mayor ocurrencia, pero con magnitud pequeña que no daña a los equipos de forma instantánea. Los degrada con el tiempo y produce lo que se conoce como oxidación electrónica. Los producen los motores, aires acondicionados, balastras, elevadores, arrancadores, etc.

Muchos productos eléctricos no están hechos para ajustarse a estas condiciones de bajo voltaje temporal. Esta condición temporal tiende a ocurrir en el orden de diez veces más frecuentemente que una interrupción total de energía.

La operación de hornos de arco eléctrico sobre todo cuando funden chatarra ocasionan “flicker” o parpadeo de intensidad luminosa. La operación de estos hornos de arco eléctrico exhibe corrientes erráticas de magnitud suficiente para ocasionar fluctuaciones en el voltaje. Las lámparas y monitores alimentados del mismo transformador que dichos hornos de arco presentan de manera severa estos parpadeos. La figura 22 muestra 60 ciclos de forma de onda de la corriente de línea en la alimentación a un horno de arco eléctrico durante el proceso de fusión de chatarra. Se muestra además el voltaje al neutro en por unidad, el voltaje nominal entre líneas es 13.2 kV. Nótese que aunque la fluctuación del voltaje no es muy grande (menos del 3%) el efecto en las lámparas es considerable. Las fluctuaciones en la corriente ocasionan fluctuaciones en la caída del voltaje en la impedancia del circuito que alimenta a la planta y esto a su vez da lugar a las fluctuaciones en el voltaje.

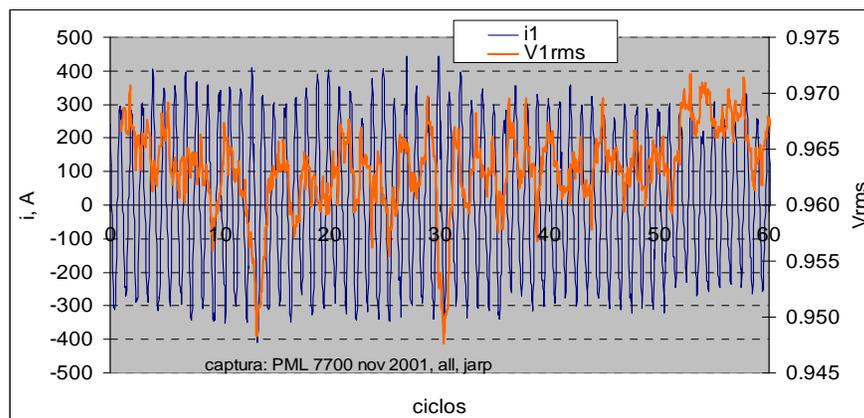
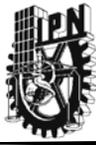


FIGURA 22 FORMA DE ONDA DE CORRIENTE Y VALOR RMS DEL VOLTAJE

La conmutación de bancos de capacitores, ya sea en la planta industrial o en la red del sistema eléctrico puede causar el funcionamiento defectuoso de algunos equipos. En años recientes se ha vuelto un problema común asociado con el disparo inexplicable de muchos arrancadores de ca pequeños. Muchos de estos arrancadores están diseñados para desconectarse de la línea por una sobretensión del 10 al 20 % con duración de una fracción de ciclo. Ya que muchos bancos de capacitores de empresas eléctricas son conmutados diariamente, este problema podría ocurrir en forma muy frecuente. Este indeseable problema



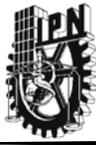
de disparo puede usualmente remediarse agregando un reactor en serie con el dispositivo sensible, o modificando su característica de disparo. Otras soluciones pueden incluir la reducción del transitorio en el banco de capacitores. La operación de los capacitores se asocia también ocasionalmente, con el funcionamiento defectuoso o falla de otros equipos además de los controladores.

Es importante darse cuenta de que existen otras fuentes de disturbios que no están asociadas con el suministro eléctrico de entrada. Estas pueden incluir descargas electrostáticas, interferencia electromagnética radiada, y errores de operadores. Adicionalmente, los factores mecánicos y ambientales juegan un papel en los disturbios del sistema. Estos pueden incluir temperatura, vibración excesiva y conexiones flojas.

3.3 EFECTOS DE LOS DISTURBIOS EN EL SISTEMA DE ENERGÍA.

Los disturbios en el sistema, que se han considerado normales durante muchos años, ahora pueden causar desorden en el sistema eléctrico industrial, con la consecuente pérdida de producción. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta nuevas medidas para desarrollar un sistema eléctrico confiable, mismas que anteriormente no se consideraban significativas. Dependiendo del tipo de disturbio, de su magnitud y su duración, es como se puede manifestar en menor o mayor grado sobre los equipos eléctricos. A continuación se mencionan alguno de los efectos producidos por los disturbios:

1. Ruido e Impulsos Eléctricos. Estos pueden ocasionar un funcionamiento errático en cualquier tipo de computadora, se puede inhibir o desprogramar, errores de paridad, teclados bloqueados o información perdida. Si la magnitud del disturbio es muy elevada, el daño puede ser físico e irreversible.
2. Los Sobre Voltajes y Bajo Voltajes. Los bajos voltajes del orden del 90% del Nominal y por un tiempo de 3 ciclos aproximadamente, los drives los detectarán como una condición de falla. Los bajos voltajes al momento del arranque de grandes motores, pudiera ocasionar que los contactores de los motores se abran. Por otra parte los sobre voltajes con duración muy larga, puede dañar el aislamiento de la electrónica de los equipos.



3. Distorsión Armónica. Este tipo de disturbio puede ocasionar funcionamiento errático de algunos variadores, calentamiento de cables y transformadores, y falsos disparos de interruptores.

Los factores importantes al tratar con bajas tensiones momentáneas se resumen como sigue:

1. En una planta industrial las lámparas de descarga de alta intensidad (HID) frecuentemente son los equipos más sensibles al bajo voltaje. Típicamente se apagan a tensiones en el rango del 85 al 90 % de la nominal por periodos tan cortos como de 1 ciclo, y toman varios minutos para reencender. Una forma de minimizar este efecto es utilizar alumbrado HID que tenga capacidad de reencendido instantáneo, o utilizar bulbos de cuarzo con lámparas de HID . El bulbo de cuarzo enciende inmediatamente y se apaga aproximadamente 10 minutos después. Cualquiera de los dos métodos podría emplearse en aproximadamente el 10 % de los lugares con alumbrado por HID en una planta industrial, para proporcionar un alumbrado temporal hasta que las luces HID vuelvan a encenderse. Es posible también obtener balastos regulados que pueden ajustarse a la baja de tensión hasta del 50 % .
2. Los PLC's que se utilizan para controlar dispositivos tales como arrancadores de cd y de ca pueden apagar los dispositivos cuando hay tensiones del orden del 80 a 85% de la nominal . Esto puede mejorarse, para condiciones momentáneas de bajo voltaje, proporcionando control instantánea de tensión para el PLC a través de un regulador o una fuente de alimentación ininterrumpible (UPS).
3. Los arrancadores de ca y cd están típicamente diseñados para operación continua con variaciones de tensión de +10% a -5% hasta -15%. Fuera de este rango el arrancador puede no ser capaz de mantener la velocidad u otros parámetros que son críticos para el proceso, y que pueden llevar a un paro. La duración y magnitud de la caída de tensión que puede causar que eso suceda varía de dispositivo a dispositivo. Adicionalmente, aún si el arrancador estuviera diseñado para ajustarse a esta condición, el producto que se está haciendo en el proceso puede resultar dañado, o sufrir en su calidad al grado de que no sea aceptable para su uso. Sin embargo, la inercia del motor ayudará a sobrellevar satisfactoriamente ese tipo de eventos. Si el proceso no es afectado por esta condición de transitorio, entonces pueden darse consideraciones para reparar el arrancador con re arranque automático. (La seguridad y el daño a los equipos son factores determinantes para decidir si el re arranque automático es apropiado).



4. Las bobinas de contactores de motores generalmente se desactivan para tensiones en el rango de 50 a 75% con duraciones de 1-5 ciclos. Si es necesario para condiciones momentáneas de bajo voltaje, esto puede mejorarse proporcionando regulación de tensión instantánea a la bobina.
5. Si el 100 % de los bajos voltajes incluyen tensiones del 90 % o menos, los estudios del sistema han demostrado típicamente que en forma aproximada:
 - El 30% de los bajos voltajes incluyen tensiones del 80 % o menos;
 - El 15 % de los mismos abarcan tensiones de 70 % o menos;
 - El 5 % de ellos incluyen tensiones del 60% o menos.

Estos valores ilustran cómo las mejoras relativamente menores en la capacidad de adaptación pueden reducir significativamente la cantidad de disturbios por bajo voltaje. Por ejemplo, la mejora de la capacidad de adaptación de un dispositivo particular desde 80 a 70 % típicamente recortaría el número de eventos de disturbio en un 50 %. Yendo de 80 a 60 % reduciría el número en más del 80 %.

6. El 80% de estos eventos tienen duraciones de menos de 0.2 - 0.5 seg. Los sistemas de transmisión tienden a tener tiempos de eliminación más rápidos que los sistemas de distribución, pero esto está en función de las prácticas de coordinación de protecciones de la empresa eléctrica.



CAPITULO

IV

“PRINCIPALES DISTURBANCIAS CAUSADAS POR ARMONICAS.”



4.1 PRINCIPALES DISTURBANCIAS CAUSADAS POR ARMONICAS DE CORRIENTE Y TENSION.

Las armónicas de corriente y tension sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución.

Para detectar los posibles problemas de armónicas que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso en que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40 % por debajo del verdadero valor eficaz.

El efecto principal causado por las armónicas consiste en la aparición de tensiones no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de tension deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionadas serán las tensiones en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Las tensiones no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipamiento de potencia así como la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

Existen equipos que son susceptibles a la presencia de armónicos como los son los hornos y soldadores de arco, ya que la función es de calentamiento no depende de la calidad de la energía.

Pero hay equipo más susceptible ya que su diseño o funcionamiento asume una perfecta alimentación sinusoidal sin embargo los motores se encuentran entre estos dos extremos de susceptibilidad ya que ellos pueden tolerar relativamente a los armónicos.



Para una mejor comprensión de los efectos de los armónicos sobre los equipos y los sistemas de potencia se explicara de manera individual.

4.2 EFECTO SOBRE LAS REDES INDUSTRIALES

El impacto mas significativo que tienen los armónicos sobre las redes es que pueden causar las llamadas, perdidas por efecto joule caracterizada por el calentamiento de los elementos del sistema además pueden provocar que el control y monitoreo de los equipos de medición hagan registros de forma inadecuada. Adicionalmente los armónicos pueden causar distorsiones en el voltaje. Estos efectos ocurren principalmente como resultado de situaciones de resonancia paralela o en serie ya que la resonancia del sistema es el factor más importante que afecta a los armónicos existentes en la red. Cuando las condiciones de resonancia no se presentan y no son un problema para la red, el sistema tiene la capacidad de absorber cantidades significativas de corriente armónicas sin mayores problemas. Cuando no esta presente una condición de resonancia las corrientes armónicas que pueden existir fluirán a la fuente de alimentación (transformadores y generadores).

4.3 EFECTO SOBRE LAS CARGAS Y DISPOSITIVOS

A. MOTORES Y GENERADORES

El mayor efecto de las corriente y voltajes armónicos en las maquinas rotativas (inducción y sincrónicas) es el incremento del calentamiento debido a las perdidas en el entrehierro y el cobre por frecuencias armónicas los componentes de armónicos de voltaje afectaran la eficiencia de la maquina y pueden afectar el torque desarrollado por la misma.

Las corrientes armónicas en un motor pueden dar lugar a emisión de ruidos (oscilaciones mecánicas) en comparación con la excitación sinusoidal. Estas corrientes armónicas también producen una distribución de flujo resultante en el entre hierro llamado cogging (rechazo para arrancar suavemente) o crawling (alto deslizamiento) en los motores de inducción.



B. TRANSFORMADORES

Además de los armónicos aplicados a los transformadores pueden resultar en un aumento de niveles de ruidos audibles el efecto principal de los transformadores es el calentamiento producido por corrientes parásitas. Las corrientes armónicas causan pérdidas adicionales a las producidas en el cobre y generan flujos desviados a los arrollamientos, mientras que los armónicos de voltaje causan un incremento en las pérdidas del hierro. Se propone un límite sobre los niveles de armónicos en las corrientes del transformador con el límite superior del factor de distorsión de corriente ajustado a un 5% de la corriente nominal.

C. CAPACITORES

El mayor interés que surge del uso de los capacitores en un sistema de potencia es la posibilidad de resonancia en el sistema. Este efecto impone voltajes y corrientes que son considerablemente mayores a los que serían para el caso sin resonancia.

La reactancia de un banco de condensadores disminuye con la frecuencia y de esta manera actúa como un dispositivo para corrientes armónicas mayores. Este efecto aumenta las tensiones dieléctricas y el calentamiento dentro del capacitor, las tensiones dieléctricas en el capacitor son de importancia porque los voltajes armónicos son aditivos al pico de voltaje fundamental. Como resultado de esto, la película dieléctrica en el capacitor está sujeta a mayores voltajes que los permitidos por el diseño de este y trae como consecuencia fatigas en el aislamiento, lo que a su vez ocasiona la disminución de la vida útil del capacitor.

D. EQUIPOS DE MEDICION

La medición e instrumentación son afectadas por los componentes armónicos, particularmente si existen condiciones resonantes que resultan en los altos voltajes y corrientes armónicas, los dispositivos de disco de inducción, tales como los medidores de



Kilovatios-horas (KWh), normalmente ven solamente la corriente fundamental que esta en la fase con el voltaje fundamental. Las corrientes armonicas también se registraran en el medidor debido a que la mayoría del voltaje armónico está fuera de fase con la corriente armónica.

E. CABLES DE POTENCIA

Los cables involucrados en la resonancia del sistema pueden estar sujetos a esfuerzos y al efecto corona, lo cual puede conducir a fallas dieléctricas en el aislamiento. Los cables que están sujetos a niveles ordinarios de corrientes armónicas están propensos a calentamientos elevados.

El flujo no sinusoidal en un conductor, producirá un calentamiento adicional por encima de lo esperado para un valor rms de la forma de onda. Esto se debe al fenómeno conocido como efecto piel o de proximidad, los cuales varían como una función de la frecuencia, así como también, del tamaño del conductor. Como resultado estos dos efectos, la resistencia efectiva de corriente alterna se eleva por encima de la resistencia de corriente directa, especialmente para conductores grandes.

F. EQUIPOS ELECTRONICOS

Los equipos electrónicos pueden ser susceptibles a los efectos de la distorsión armónica. Estos equipos pueden ser afectados debido a la inclusión de armónicos , a través del suministro de potencia del equipo por medio del acoplamiento magnético de los armónicos en las componentes del equipo.

Las computadoras y los equipos asociados a esta, tales como los controladores programables, frecuentemente requieren de fuentes de corrientes alternas que no poseen mas del 5% del factor de distorsión de voltaje armónico. Niveles mayores de armónicos provocan un mal funcionamiento del equipo en ocasiones imperceptible, lo cual puede, en algunos casos traer consecuencias serias. Los instrumentos pueden ser afectados de manera similar, dando datos erróneos de modo impredecible.



G. MECANISMOS DE CONTROL Y RELES

Al igual que otro tipo de equipos, las corrientes armónicas pueden aumentar el calentamiento y las pérdidas en mecanismos de control, reduciendo la capacidad de transporte de corriente, acortando la vida de algunos componentes de aislamiento.

Los fusibles pueden reducir su capacidad debido al calor generado por los armónicos durante las operaciones normales. En general, los niveles armónicos que se requieren para causar una mala operación de los relés son mayores que los niveles recomendados por los estándares.

H. INTERFERENCIA TELEFONICA

Las corrientes armónicas y voltajes asociados con las cargas no lineales pueden inducir campos magnéticos y eléctricos en circuitos de comunicación que están en paralelo con los conductores de potencia. Cuando estas corrientes inducidas fluyen en los sistemas de comunicación, producen voltajes, dando como resultado ruido en los circuitos.

Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tipo de carga encontrada, e incluye:

- Efectos instantáneos.
- Efectos a largo plazo debido al calentamiento.

Efectos instantáneos: Armónicos de tensiones pueden distorsionar los controles usados en los sistemas electrónicos. Ellos pueden por ejemplo afectar las condiciones de conmutación de los tiristores por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de tensión.

Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Por ejemplo, el error de un metro clase 2 será incrementado un 0.3 %, en presencia de una onda de tensión y corriente con una tasa del 5 % para el 5º armónico.



Disturbancias son observadas cuando líneas de comunicación y control son distribuidas a lo largo de líneas de distribución eléctrica que conducen corrientes distorsionadas. Parámetros que deben tenerse en cuenta incluyen: la longitud que se encuentran dichas líneas en paralelo, las distancias entre los dos circuitos y las frecuencias armónicas (el acoplamiento aumenta con la frecuencia).

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos esta la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y equipos y/o sistemas digitales de protección.

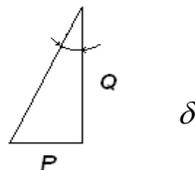
Para el caso de equipos protegidos contra sobretensiones cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con tensiones sinusoidales, estos pueden operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa. El caso típico se presenta ante formas de onda que presentan picos agudos. Si el dispositivo de medición esta diseñado para responder ante valores *rms* de la forma de onda, entonces estos cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y conllevarían a la desprotección del equipo ante aquellos picos agudos dañinos, que no provoquen un aumento notable de la magnitud medio cuadrática sensada. También pudiera ocurrir el caso contrario, el disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido. En estos casos el ajuste de la protección deberá depender de las características de la forma de onda: tensiones pico y *rms*, tiempo de crecimiento de la onda, entre otros. Las protecciones convencionales no tienen en cuenta todos estos parámetros y lo que toman como base del proceso de protección, lo hacen sobre la suposición de que la forma de onda es puramente sinusoidal lo cual puede ser aceptado para algunas formas de onda pero incorrecto para otras que pueden ser dañinas.

Efectos a largo plazo: El principal efecto a largo plazo de los armónicos es el calentamiento.

I. CALENTAMIENTO DE CAPACITORES:

Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado a tensión aplicada para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo tensión a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.

Estas pérdidas son definidas por el ángulo de pérdida (δ) del capacitor cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida, esto se representa en la figura.



$$\tan \delta = \frac{P}{Q}$$

FIGURA 22. TRIÁNGULO RELACIONADO CON LA POTENCIA DEL CAPACITOR, (POTENCIA ACTIVA (P), REACTIVA (Q), APARENTE (R)).

Valores de alrededor de 10^{-4} de la fundamental pueden ser citados para $\tan \delta$. El calor producido puede conducir a un rompimiento dieléctrico.

Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas y transformadores:

Pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de máquinas causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor.

En los transformadores existirán pérdidas suplementarias debido al efecto pelicular, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia, también



habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de eddy o Foucault (en el circuito magnético).

J. CALENTAMIENTO DE CABLES Y EQUIPOS:

Las pérdidas son incrementadas en cables que conducen corrientes armónicas, lo que incrementa la temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

- Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto pelicular.
- Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia, si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables.
- El fenómeno relacionado con la proximidad, de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

De una forma general todos los equipos (cuadros eléctricos) sometidos a tensiones o atravesados por corrientes armónicas, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Por ejemplo, una celda de alimentación de un condensador se dimensiona para una intensidad igual a 1.3 veces la corriente reactiva de compensación. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto pelicular en los conductores.

Muchas de las anomalías que ocasiona la circulación de corrientes de frecuencias que no son propiamente del sistema, a través de él y de los equipos conectados, causando en ocasiones problemas de operación, tanto a la empresa suministradora como al usuario, se deben a las siguientes razones:



1. Las frecuencias del flujo de potencia de tensiones y corrientes sobrepuestas a las ondas de flujo de 60 ciclos, originan altas tensiones, esfuerzos en los aislamientos, esfuerzos térmicos e incrementan las pérdidas eléctricas.
2. Muchos aparatos eléctricos son diseñados para aceptar y operar correctamente en potencia de 60 ciclos, pero no responden bien a cantidades significantes de potencia a diferentes frecuencias. Esto puede causar ruido en el equipo eléctrico, problemas mecánicos y en el peor de los casos falla del equipo.
3. Los armónicos generados en un sistema eléctrico pueden crear niveles altos de ruido eléctrico que interfieran con las líneas telefónicas cercanas.
4. La presencia de frecuencias diferentes a la nominal en la tensión y en la corriente, regularmente no son detectables por un monitoreo normal, por mediciones o por el equipo de control; por lo que su presencia no se nota. Por ejemplo los medidores residenciales monofásicos no detectan frecuencias mucho más arriba de 6 ciclos. Frecuentemente la primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando causan problemas de operación o fallas del equipo.

La tabla 5, muestra también algunos efectos dañinos que ocasionan los armónicos sobre los elementos eléctricos.

EFEECTO DE LOS ARMONICOS	CAUSA	CONSECUENCIA
Sobre los conductores	<ul style="list-style-type: none">• Las intensidades armonicas provocan el aumento de la IRMS.• El efecto peculiar (efecto SKIN) reduce la seccion efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia	<ul style="list-style-type: none">• Disparos intempestivos de las protecciones• Sobrecalentamiento de los conductores
Sobre el conductor de neutro	<ul style="list-style-type: none">• Cuando existe una carga trifásico + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3	<ul style="list-style-type: none">• Cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provoca

		calentamientos y sobreintensidades
Sobre los transformadores	<ul style="list-style-type: none">• Aumento de la I_{RMS}• Las pérdidas foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia las pérdidas, por histéresis son proporcionales a la frecuencia	<ul style="list-style-type: none">• Aumento de los calentamiento por efecto joule en los devanados• Aumento de las pérdidas en el entrehierro
Sobre los motores	<ul style="list-style-type: none">• Análogas a las de los transformadores y generación de un campo adicional al principal	<ul style="list-style-type: none">• Análogas a las de los transformadores mas pérdidas de rendimiento
Sobre los condensadores	<ul style="list-style-type: none">• Disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia	<ul style="list-style-type: none">• Envejecimiento prematura amplificación de las armónicas existentes

TABLA 5. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS. SE MENCIONAN ALGUNOS EFECTOS PERJUDICIALES QUE OCASIONAN LOS ARMÓNICOS EN LOS APARATOS Y SISTEMAS DE POCA CORRIENTE:

- El mal funcionamiento de ciertos aparatos que utilizan la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempos para la sincronización de ciertos equipos.
- Perturbaciones porque se crean campos electromagnéticos. Así, cuando los conductores de baja intensidad o de transmisión de datos están muy próximos a cables de gran potencia por los que circulan corrientes armónicas, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos,
- Por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión en el conductor, así, si el sistema de puesta a tierra del neutro, las



masas de los diversos equipos no quedan a la misma tensión, lo que por su propia naturaleza provoca perturbaciones en los intercambios de información entre receptores inteligentes. Además, hay circulación de corrientes por las estructuras metálicas de los edificios y, por tanto, creación de campos electromagnéticos perturbadores.

4.4 EFECTOS EN LOS FILTROS PASIVOS.

En los filtros pasivos también pueden aparecer problemas de sobreesfuerzo del aislamiento por sobretensión o sobrecorriente en sus elementos componentes. Como estos filtros son los más empleados en la descontaminación armónica de los sistemas eléctricos debido a su bajo costo económico y facilidad de operación; también se hace necesario tener en cuenta en el diseño de los mismos la presencia de armónicos.

4.5 EFECTOS EN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS SENSIBLES.

Existen numerosos equipos modernos que son muy sensibles a los cambios producidos en la tensión de alimentación de los mismos. Entre ellos están: las computadoras, los modems, las tarjetas de electrónica compleja (de captación de datos, de comunicaciones, etc.), las cajas registradoras y muchos otros equipos domésticos y de oficina. Estos equipos al estar constituidos por complejas y delicadas configuraciones de elementos de baja potencia, necesitan de una fuente de alimentación muy estable que les provea de una tensión CD de rizado casi nulo. Para ello necesitan de una fuente primaria de CA y de un bloque rectificador con fuente de tensión estabilizada. En algunos casos este bloque de alimentación no posee el grado de invulnerabilidad necesario para soportar ciertos grados de distorsión de la onda de tensión. Por esta razón los delicados circuitos son sometidos a variaciones notables en el lado CD de sus fuentes, afectando el funcionamiento de los mismos. Esta es la causa del re-arranque de computadoras y de la pérdida de control de las cajas registradoras sometidas a voltajes altamente contaminados. Además, los equipos con alto nivel de integración en sus elementos componentes que estén sometidos a voltajes distorsionados por armónicos durante prolongados períodos de tiempo, pueden



presentar daños irreparables. En su gran parte estos daños provocan la inutilidad total del componente integrado del equipo en cuestión.

Existen además equipos electrónicos que necesitan sensar las magnitudes de fase para tener una noción de tiempo con respecto a los comienzos de los períodos de las corrientes y tensión de alimentación. Normalmente basan su funcionamiento en la detección del cruce por cero de las magnitudes que chequean. Cuando estas están sometidas a los efectos de distorsión de las cargas no lineales, puede darse el caso de que aparezcan cruces por cero de las formas de onda en momentos que no coinciden con el cambio de signo del lóbulo (positivo o negativo) de la onda que se tome de referencia. Estas detecciones incorrectas pueden dar lugar a operaciones erróneas y en algunos casos al no funcionamiento de los equipos que controlan.

4.6 EFECTOS EN LOS TRANSFORMADORES.

Aunque los transformadores son dimensionados para la operación con cargas de 60 Hz, cuando estos alimentan cargas no lineales evidencian un incremento notable en sus pérdidas; tanto en las de núcleo como las de cobre.

Corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas de núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga *rms* y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto pelicular. El incremento en las pérdidas de cobre se debe a la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras de armónicos monofásicas y trifásicas, y a la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores neutros desde las cargas monolineales generadoras de armónicos.

Los armónicos triples de secuencia cero se suman algebraicamente en el neutro y pasan a través del sistema de distribución hasta que alcanzan un transformador conectado en delta-estrella. Cuando las corrientes de neutro de armónicos triples alcanzan un transformador delta-estrella la misma es reflejada dentro del devanado primario en delta donde circula y causa sobrecalentamiento y fallas en el transformador.



4.7 EFECTO EN EL CONDUCTOR NEUTRO.

El diseño de circuitos ramales en el pasado había permitido un conductor neutro común para tres circuitos monofásicos. La lógica dentro de este diseño fue que el conductor neutro llegaría solamente la corriente de desbalance de las tres cargas monofásicas. Un conductor neutro común parecía adecuado para las cargas y era económicamente eficiente puesto que un ingeniero de diseño balancearía las cargas durante el diseño, y un electricista balancearía las cargas durante su construcción. En muchos ejemplos el conductor neutro se disminuía en tamaño con respecto a los conductores de fase por las mismas razones.

Bajo condiciones balanceadas de operación en cargas monofásicas no lineales, el neutro común de los tres circuitos monofásicos es portador de armónicos triples de secuencia cero, los cuales son aditivos en el conductor neutro. Bajo condiciones de desbalance, el neutro común lleva corrientes comprendidas por las corrientes de secuencia positiva procedentes del desbalance en el sistema, las corrientes de secuencia negativa procedentes del desbalance del sistema, y las corrientes aditivas de secuencia cero procedentes de los armónicos triples. Un conductor neutro común para tres circuitos ramales monofásicos, puede fácilmente sobrecargarse cuando alimenta, cargas no lineales balanceadas o desbalanceadas.

Las corrientes excesivas en el conductor neutro provocan caídas de tensiones mayores que los normales entre el conductor neutro y tierra en las tomas de 127 volts. Esto puede desestabilizar la operación del equipamiento electrónico sensible, tales como computadoras, que pueden requerir de un receptáculo de tierra aislado.

Las barras de neutro de la pizarra de control representan el primer punto común de conexión de las cargas monofásicas conectadas en delta. Recuérdese que las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa, asumiendo cargas balanceadas, se cancelan en cualquier punto común de conexión. La barra del conductor neutro también puede sobrecargarse debido a los efectos de cancelación de las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores que sirven a diferentes cargas.

Además, las corrientes armónicas triples de secuencia cero fluyen en los conductores neutros, a pesar del balance de las cargas. Las corrientes armónicas triples solamente, pueden sobrecargar las barras de neutro. En la práctica, los conductores neutros de



circuitos ramales individuales portan corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa provenientes de los desbalances de fase junto a las corrientes de armónicos triples de secuencia generados por la carga. Las barras de neutro que son dimensionadas para llevar el valor completo de la corriente de la corriente nominal de fase pueden fácilmente sobrecargarse cuando el sistema de distribución de potencia alimenta cargas no lineales.

4.8 EFECTOS EN LOS CONDENSADORES.

La impedancia de los condensadores disminuye al aumentar la frecuencia. Por tanto, si la tensión está deformada, por los condensadores que se usan para la corrección del factor de potencia circulan corrientes armónicas relativamente importantes. Por otra parte, la existencia de inductancias en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzcan resonancias con los condensadores, lo que puede hacer aumentar mucho la amplitud de los armónicos en los mismos. Este fenómeno de resonancia puede ocasionar que sea perforado el aislamiento de los capacitores, provocando daños severos. Esta perforación puede ocurrir tanto por picos de voltaje como de corriente a través de los mismos aún cuando el diseño básico (a la frecuencia de operación) prevea pocas posibilidades de falla ante los picos de cargas operados y a los niveles de tensión y de corrientes esperados.

En la práctica, no se recomienda conectar condensadores en instalaciones que tengan una tasa de distorsión armónica superior al 8%.

A. ESQUEMA EQUIVALENTE DE UNA INSTALACIÓN TIPO.

Para proceder al análisis armónico de una instalación, se realiza una modelización de la red considerando las cargas no lineales como fuentes de intensidad armónicas.

En la figura 23 se ha representado una instalación tipo en la que se han agrupado todas las cargas de la instalación en tres tipos:

- Cargas generadoras de armónicos.

- Cargas no generadoras (lineales).
- Condensadores para compensación de la energía reactiva.

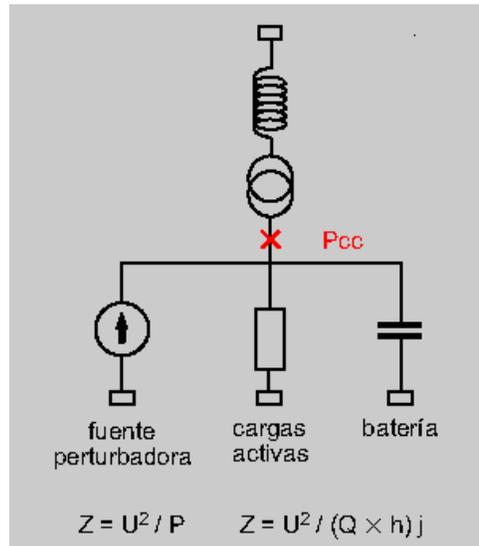


FIGURA 23. MODELIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN TIPO

La figura 24 muestra el esquema equivalente de la instalación modelizada anteriormente visto desde el barraje general de baja tensión. Todos los elementos eléctricos situados aguas arriba del barraje de baja tensión (el transformador y la impedancia de la red) son vistos como una impedancia inductiva.

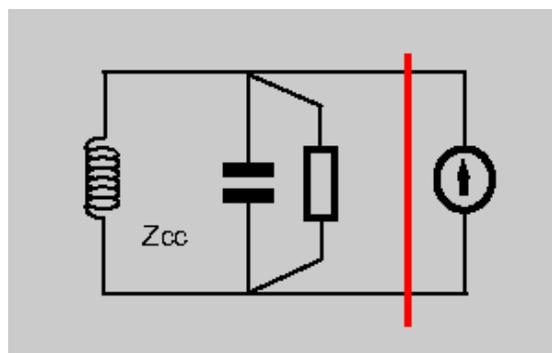


FIGURA 24. ESQUEMA EQUIVALENTE DE LA INSTALACIÓN.

B. LA RESONANCIA EN PARALELO.

Como se muestra en la figura 25 aparece una impedancia inductiva (transformador, conductor) en paralelo con la batería de condensadores.

Esta asociación inductancia y condensador en paralelo provoca el fenómeno de la resonancia en paralelo del sistema, por lo cual, a una frecuencia determinada, el valor de la impedancia inductiva del sistema se hace muy elevado. La representación de la impedancia en función la frecuencia para un sistema que representa resonancia en paralelo se representa en la figura 25, donde también se representa la impedancia del sistema sin batería de condensadores.

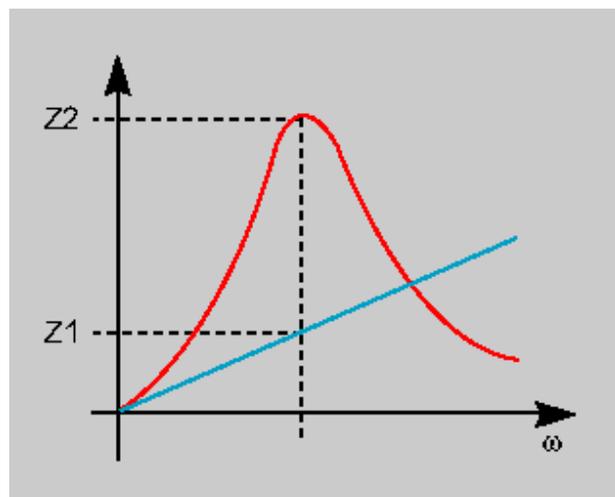


FIGURA 25. RESONANCIA PARALELO Y FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

En esta figura, se observa la diferencia de impedancias:

- Z_1 : impedancia de la instalación sin batería de condensadores,
- Z_2 : impedancia de la instalación con batería de condensadores.

La diferencia entre estos dos valores de impedancia es el factor de amplificación. La presencia de una batería de condensadores en una instalación, inclusive la propia capacitancia a tierra de un sistema de distribución no genera armónicos, sin embargo, pueden amplificar los armónicos existentes agravando el problema.



Por otro lado, el condensador es uno de los elementos más sensibles a los armónicos ya que presenta una baja impedancia a frecuencias elevadas y adsorbe las intensidades armónicas más fácilmente que otras cargas reduciendo considerablemente la vida de los condensadores.

Para comprobar de una forma rápida si en una red puede existir un riesgo importante de que se presente el fenómeno de la amplificación, se debe analizar lo siguiente:

- Que haya armónicos que puedan ser amplificados, es decir, que la frecuencia de resonancia paralelo del sistema coincida con un rango próximo al de los armónicos presentes en la instalación.
- La frecuencia de resonancia se puede calcular estimativamente con la siguiente expresión [2,6]:

$$f_{rp} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

Donde:

f_{rp} : Frecuencia de resonancia paralelo.

S_{cc} : Potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la batería.

Q : Potencia de la batería de condensadores.

Generalmente, S se expresa en MVA y Q en MVAr.

- Que el factor de amplificación tenga un valor importante:

$$FA = \frac{\sqrt{Q \times P_{cc}}}{P}$$

Donde:



FA : Factor de amplificación.

Pcc : Potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la batería de condensadores.

Q : Potencia de la batería de condensadores (kVAr)

P : Potencia activa de la instalación (kW).

Consecuencias prácticas:

- Si el orden de una corriente armónica inyectada por la fuente perturbadora corresponde al orden de la resonancia paralelo, existe el riesgo de sobretensiones armónicas, particularmente cuando la red está poco cargada. Las corrientes armónicas son entonces intensas en los componentes de la red, y representan un cierto peligro para los condensadores.
- Si el orden de la resonancia paralelo corresponde al orden de la frecuencia de los equipos de telemando del distribuidor (de la compañía distribuidora), existe riesgo de perturbaciones en estos equipos.

C. RESONANCIA EN SERIE

La resonancia serie aparece con la conexión serie de reactancia inductiva y una capacitiva. Existirá una determinada frecuencia que hará cero la impedancia del conjunto L-C serie.

Bajo condiciones de resonancia en serie, el sistema ofrece una impedancia muy baja a tensiones armónicas de frecuencia igual a la de resonancia. Por lo tanto, tensiones pequeñas armónicas en el sistema pueden originar corrientes elevadas de armónicos en los equipos.

Este fenómeno es utilizado para filtrar los armónicos en una instalación.



D. SÍNTOMAS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN EQUIPO DE DISTRIBUCIÓN.

Los componentes de los sistemas de distribución de potencia conducen corrientes y por consiguiente, son sensibles a la distorsión de corriente. Esta distorsión nos lleva a evaluar nuevamente muchos de los conceptos normales que se refieren a electricidad, especialmente con respecto al sistema de potencia.

Primero y principalmente, la distorsión de corriente y tensión deben medirse con un equipo RMS real. Si no se especifica como RMS real, probablemente es un medidor de tipo promedio que provee datos seriamente imprecisos.

Segundo, debemos cambiar nuestro concepto de carga de transformador. Cuando un transformador conduce corriente distorsionada, genera más calor por ampere (A) que si la corriente fuera sinusoidal. Esto significa que los transformadores se sobrecalentarán aún si no están totalmente cargados eléctricamente. Debe considerarse en la disminución de la potencia del transformador y el uso de transformadores tipo K.

Tercero, la sabiduría común dice que si un sistema de tres fases tipo estrella está balanceado, no habrá corrientes en el neutro. Cuando existen armónicas de corriente, algunas de las armónicas no se cancelan en el neutro, originando lecturas de alta corriente aún cuando el sistema está balanceado. Pueden ser posibles corrientes tan altas como del 200 % de los conductores de fase.

Las corrientes armónicas pueden causar que los desconectores (drop out) y fusibles operen incorrectamente. Aún pensando que las corrientes no exceden sus límites, los desconectores se dispararán. Frecuentemente esto es debido al nivel de corriente que es medida con un medidor tipo promedio. El medidor puede indicar 15 A, mientras que realmente existen más de 27 A. El desconector portafusible (drop out) está funcionando correctamente y el medidor no.

También hay ocasiones en que las altas corrientes de cargas electrónicas dispararán los desconectores. Si los desconectores se disparan determinan si hay una carga no lineal encendida al mismo tiempo.



4.9 FRECUENCIAS DE LOS ARMONICAS.

Las frecuencias de los armónicas que más problemas generan en el flujo de potencia, son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental como son: 120, 180, 240, 300 y 360 ciclos/segundos y los que siguen. Obsérvese que la frecuencia del sistema es la primer armónica.

En contraste las frecuencias no armónicas, por ejemplo 217 ciclos/segundo, generalmente son generadas e inyectadas al sistema de transmisión y distribución con algún objetivo especial. Estos casos son producidos deliberadamente o en algunos casos inadvertidamente.

Es más difícil detectar una armónica que no es múltiplo de la frecuencia fundamental, porque no altera la longitud de onda de la misma manera, esto significa que no se ve un cambio estable en el osciloscopio cuando se estudia la onda, sin embargo, una vez que se detecta es mucho más fácil identificar su origen.

A. ARMONICA CERO.

El flujo de corriente directa es la armónica de frecuencia cero, la contaminación con corriente directa de un sistema o potencia es parte de un estudio teórico completo de todas las armónicas, ya sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Generalmente la presencia de tensión o corriente directa es una señal de una pobre puesta a tierra, severo desbalanceo de carga o daño de algún equipo. Aún con la presencia de una pequeña señal, existe el problema de puesta a tierra, flujo en el conductor neutro o desbalanceo interno.

Como las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, las armónicas en sus diferentes frecuencias siempre estarán en fase con la fundamental y su impacto es básicamente el mismo. Esto significa que la distorsión armónica que se presenta en la onda de 60 ciclos es la misma.



B. DIFERENTES FORMAS DE ONDA DE LA TENSION Y LA CORRIENTE.

El resultado de la presencia de cargas no lineales es que la forma de onda de la corriente y la tensión en el flujo de potencia pueden ser muy variables.

De hecho como la presencia de armónicas significa que la carga es no lineal, la forma de onda de la tensión y corriente son diferentes, ó mejor dicho significativamente diferentes. Es importante observar como la distorsión armónica para un sistema de potencia es medido y reportado en base a la tensión, ya que un sistema de potencia es diseñado y se espera que opere como una fuente de tensión constante. Sin embargo, los sistemas de potencia son casi una fuente de tensión constante, las cargas no lineales usualmente originan más distorsión en la corriente que en la tensión.

C. INDICES DE DISTORSION ARMONICA.

El método más usado para medir la distorsión armónica en un sistema de potencia es la distorsión total armónica (THD), este puede ser calculado por la corriente o para la tensión, dependiendo de donde se quiera medir la distorsión. Hay al menos otros dos índices usados en el análisis armónico, generalmente aplicables a circunstancias especiales. Esto incluye el factor de influencia telefónica, que compara el contenido armónico en relación al sistema telefónico, el otro índice es el factor K que es útil para estimar el impacto de las armónicas en las pérdidas eléctricas. Sin embargo, en la mayoría de los casos donde las armónicas son estudiadas en un sistema de potencia para identificar su fuente o diseñar como deshacerse de ellas, el índice de distorsión más apropiada es el THD, medido por separado para la tensión y para la corriente.

La adquisición de datos de una forma periódica (cada 30 min) durante un intervalo de tiempo amplio y el análisis posterior de estos registros, de forma diaria y semanal, para cada orden de armónico y para THD, puede utilizarse como metodología para este tipo de estudios.

En algunos circuitos, una semana de medición puede tomarse como representativa, siempre y cuando la curva de carga sea aproximadamente constante durante el mes.



Debido a la influencia que pueden presentar los transformadores de medida en cuanto a saturación, es necesario establecer la frecuencia límite de estudio. Se hace referencia a que los transformadores de corriente son confiables en mediciones en el rango de 60 a 1500 Hz, es decir, los primeros 25 armónicos. La amplitud de la respuesta de frecuencia es constante dentro de este rango, y el ángulo de fase entre la onda de entrada y de salida es despreciable.

4.10 EVIDENCIA DE LA PRESENCIA DE ARMONICAS EN LA RED

Se puede inferir la presencia de armonicas en un sistema de potencia cuando:

- Se presenta calentamiento y vibraciones excesivas en las maquinas rotativas tales como motores, generadores, etc.
- Sobrecalentamiento de los conductores
- Daño de los fusibles que protegen a los bancos de condensadores de correccion del factor de potencia
- Disparos innecesarios de los reles y breakers de protecciones
- Operación incorrecta de los circuitos de disparos de equipos electronicos basados en paso por cero de la corriente y la tension
- Error en los equipos de medición de estado solido
- Interferencia en los circuitos de comunicación
- Señales de interferencia en los circuitos electronicos y mal funcionamiento de los reles electronicos
- Fallas en los bancos de condensadores
- Sobretension y excesivas corrientes en los cicuitos debido a la resonancia
- Destrucción del dielectrico en cables aislados y capacitares instalados
- Oscilaciones mecanicas exageradas en los motores electricos



Existen otros problemas atribuidos en teoría a la presencia de los armónicas, estos problemas son:

- Pérdidas inexplicables de la data en las memorias de la computadoras
- Fallas en los capacitores de las unidades de alimentación
- Excesivo calentamiento y fallas en los sistemas de alimentación

4.11 REDISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION DEL USUARIO.

La instalación de equipos de gran capacidad en el sistema de transmisión y distribución, particularmente el caso de transformadores, reduce el problema de los armónicos al reducir la impedancia transitoria y proporcionalmente disminuir la distorsión armónica en la tensión. En los sistemas conectados en estrella la capacidad del neutro debe ser incrementada 173 % con respecto a la capacidad de las fases, debido a la posibilidad de que circulen una cantidad significativa de armónicos. Los transformadores con conexión delta proporcionan una trayectoria para que circule la tercera armónica y todos sus múltiplos, de esta manera las armónicas de orden $(3 \times N)$ generados por los usuarios circulan en la trayectoria cerrada formada por la delta de los devanados del transformador. Las pérdidas de calor generadas por los armónicos de los devanados del transformador, pueden ser significativas debiendo ser apropiada su capacidad.

En los casos donde por investigación y análisis se observa que el sistema de transmisión y distribución propaga el flujo de armónicos, modificaciones deberán hacerse para evitarlo. Generalmente los capacitores y capacitancias de los cables son quienes más contribuyen.

A. METODOS PARA ANALIZAR LOS ARMONICAS.

Existe una gran variedad de métodos analíticos usados para estudiar los armónicas y evaluar las soluciones de su problemática. Todos los métodos de análisis de armónicas emplean aproximaciones, linealizaciones de uno u otro tipo, presentando ventajas y desventajas los diferentes métodos, ninguno de ellos es el mejor en todas las situaciones. Ocasionalmente, dos o más métodos nos darán



ligeras diferencias en los resultados cuando se usan para estudiar el mismo problema, en muy raras ocasiones pueden tenerse recomendaciones contradictorias de cómo reducir los armónicos. En general, estos métodos pueden agruparse en cuatro principales categorías.

B. METODO DE LA FRECUENCIA.

El estudio del comportamiento de los armónicas de un circuito, un aparato eléctrico o de una parte del sistema ante una serie de pasos de frecuencias discretas, en cada paso se usa un modelo apropiado dependiente de la frecuencia para la parte que se analiza. En este análisis se pueden escoger los armónicos de frecuencia 60, 120, 180, 240, 300 etc., ciclos/seg. Este método es el más apropiado para análisis de condiciones posibles de resonancia y para análisis de diseño de filtros.

El análisis con diferentes frecuencias puede ser hecho junto con los estudios de flujo de carga, con análisis para la frecuencia de 60, 120, 180 y 240 ciclos, usando los valores de impedancias para las frecuencias mencionadas anteriormente y representando como generadores de armónicos a sus fuentes. Esta aproximación tiene la ventaja de que los programas de flujo de carga normales pueden ser usados para los flujos armónicos, identificando de esta manera los flujos de armónicos a través del sistema.

Desafortunadamente el método de las frecuencias, con frecuencia falla en el diagnóstico de los problemas de las armónicas, por diferentes razones, entre ellas tenemos: El flujo armónico y el flujo de frecuencia fundamental son aditivos, esta superposición puede causar saturación y otros problemas con cargas no lineales. El método de la frecuencia parece ser el mejor para identificar los armónicas que pueden causar problemas en circuitos y diferentes sistemas y donde pueden existir problemas de resonancia.



Análisis linealizados.- Usualmente se aplican las técnicas de inyección de corriente, se utilizan para estudiar fuentes armónicas compuestas de varias ondas cuadradas, los equipos y circuitos deben ser representados como conjuntos de elementos lineales conectados en serie y en paralelo, o al menos lineales con cada rango de frecuencia.

Las ventajas de este método son su relativa simplicidad, su buena representación de porque y como las armónicas son creadas y como se propagan. Modelos de este tipo son frecuentemente construidos, después de que la naturaleza general de los armónicos en un sitio en particular son conocidas, como un modelo para estudio del comportamiento y propagación de los armónicas de una manera más detallada.

Análisis no lineal en el dominio del tiempo. Directamente se aplica a cargas no lineales simulando modelos en el dominio del tiempo. En programas tales como el EMTP o como mejor se conoce actualmente ATP, así como lo que se ha llamado simulación armónica en el tiempo con modelos para el flujo de potencia, los cuales calculan el aspecto de flujos de potencia usando modelos de cargas no lineales y modelos en líneas de equipos eléctricos representando sus impedancia a través del aspecto de frecuencias.

El ATP es la mejor herramienta para hacer análisis de problemas severos, su aproximación es muy buena y presenta una buena habilidad para realizar interacciones complejas de energía y equipo. Es el método preferido para evaluar los transitorios originados por armónicas como los causados por las corrientes de puesta en servicio (inrush) originados por los transformadores.

C. MÉTODO WAVELET.

Utiliza técnicas analíticas basadas en la teoría wavelet como análisis en el dominio de la frecuencia. Esta teoría utiliza análisis tanto en el dominio de la frecuencia como en el tiempo.

Se recomienda aplicar dos o los 3 métodos discutidos anteriormente para evaluar los problemas de armónicas, tal vez los resultados serán diferentes, pero esto identifica los límites del conocimiento acerca del problema que se analiza y que se tiene un rango amplio de posibles soluciones que deben ser exploradas.

4.12 INFLUENCIA DE LAS ARMÓNICAS EN EL SISTEMA

La Figura 26 ilustra la respuesta obtenida en el nodo 4, al final de la línea de transmisión. Las formas de onda distorsionadas de voltaje y su contenido armónico mostrado en la Figura ilustran el efecto combinado del desbalance intrínseco del sistema, saturación e interacción de armónicos entre estator-rotor en el generador, saturación del transformador, núcleo magnético (3 columnas), configuración eléctrica (estrella aterrizada-delta) y efecto de la línea de transmisión.

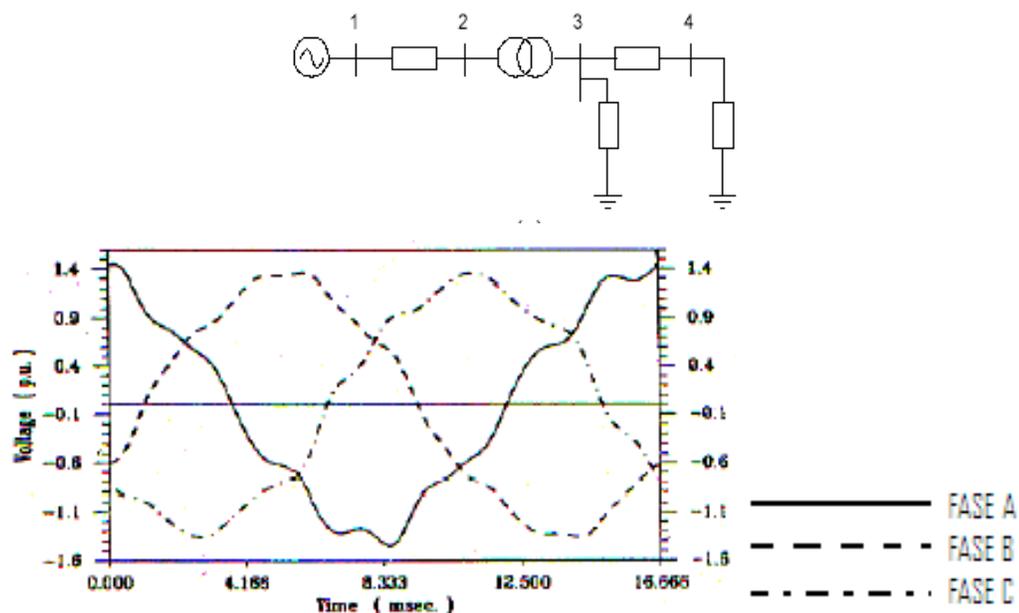


FIG 26 RESPUESTA DEL NODO 4 AL FINAL DE LA LINEA DE TRANSMISION

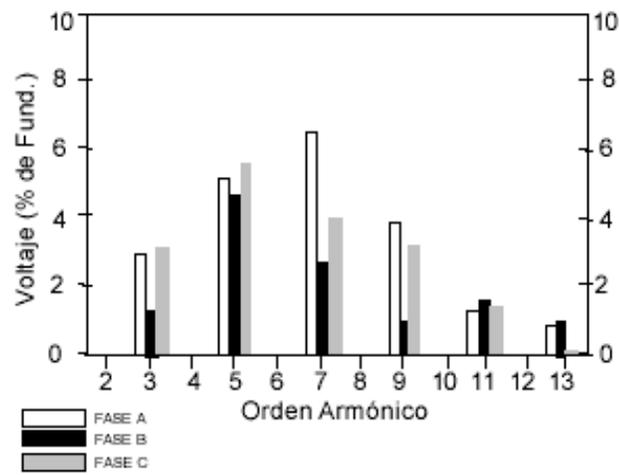
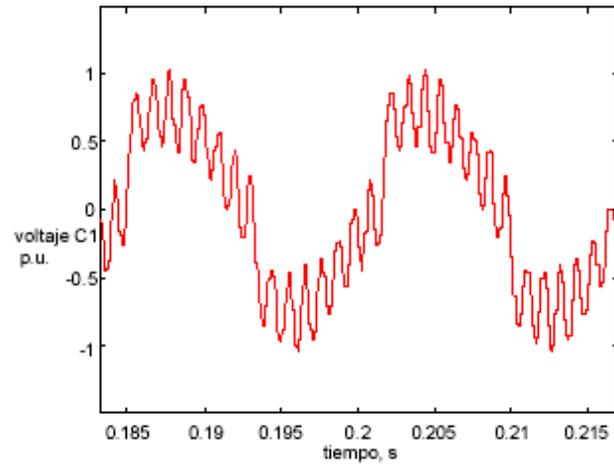
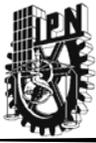


FIG. 27 GRAFICAS DE VOLTAJE Y CONTENIDO ARMÓNICO



CAPITULO V

“EL FACTOR DE POTENCIA.”

5.1 FACTOR DE POTENCIA.

La corriente requerida por los motores de inducción, lámparas fluorescentes, transformadores y otras cargas inductivas, puede considerarse constituida por corriente magnetizante y por corriente de trabajo.

La corriente de trabajo es aquella que es convertida por el equipo en trabajo útil, por ejemplo hacer girar un torno, efectuar soldaduras o bombear agua. La unidad de medida de la potencia producida es el kilowatt (kW).

La corriente magnetizante (reactiva o no productora de trabajo) es la necesaria para producir el flujo para la operación de los dispositivos de inducción. Sin corriente magnetizante, la energía no puede fluir a través del núcleo del transformador o a través del entrehierro de los motores de inducción. La unidad de medición de esta "potencia magnetizante" es el kilovar (kVAR).

La potencia total denominada "potencia aparente" (kVA), será la suma geométrica de ambas potencias, esto es:

$$kVA = ((kW)^2 + (kVAR)^2)^{1/2}$$

El factor de potencia es un indicador de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica, para producir un trabajo útil, es decir, es el porcentaje de la potencia entregada por la empresa eléctrica que se convierte en trabajo en el equipo conectado. En otras palabras, el factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa (kW) usada en un sistema y la potencia aparente (KVA) que se obtiene de la compañía eléctrica (figura 28). El rango de valores posibles del factor de potencia (fp) varía entre 0 y 1; y se expresa como la razón entre la potencia real entre la potencia aparente.

$$\text{Factor de potencia} = \frac{kW}{kVA}$$

Un bajo factor de potencia significa pérdidas de energía, lo que afecta la eficiencia en la operación del sistema eléctrico. Se penaliza con un recargo adicional en la factura

eléctrica a las empresas que tengan un factor de potencia inferior a 0.9 o 0.95 según su potencia demandada.

Cuando se tiene un bajo factor de potencia, se tienen costos adicionales que repercuten negativamente en la facturación del cliente, por lo que debe solucionarse el problema mediante la instalación de bancos de capacitores eléctricos. Corregir el bajo factor de potencia en una instalación es un buen negocio, no sólo porque se evitarán las multas en las facturas eléctricas, sino porque los equipos operarán más eficientemente, reduciendo los costos por consumo de energía.

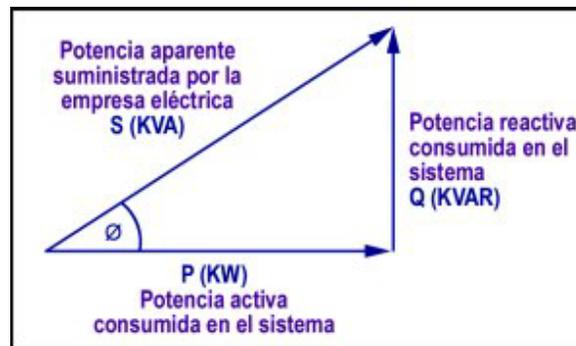


FIG. 28 EL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONSUMIDOR SE DEFINE COMO LA RELACIÓN DE LA POTENCIA ACTIVA HACIA LA POTENCIA APARENTE REALMENTE EXTRAÍDA DE LA RED Y SE DENOMINA $\cos\phi$.

5.2 CARGAS QUE PROVOCAN UN BAJO FACTOR DE POTENCIA.

Las cargas inductivas como motores, balastos, transformadores, etc., son el origen del bajo factor de potencia ya que en este tipo de equipos el consumo de corriente se desfasa con relación al voltaje.

En muchas instalaciones eléctricas de la industria, hay grandes consumos de corriente. Este consumo se agrava más cuando se trabaja con muchos motores (carga inductiva), que causan que exista un gran consumo de corriente reactiva que normalmente es penalizada por las empresas que distribuyen energía, cuando esta situación se presenta, se dice que tenemos un bajo factor de potencia.

En caso de que el factor de potencia sea inferior a 1.0, implica que los equipos consuman energía reactiva y por tanto se incrementa la corriente eléctrica que circula en las instalaciones del consumidor y de la compañía suministradora en la medida que el factor de potencia disminuya; los excesos de corriente pueden provocar daños en las instalaciones eléctricas por efecto de sobrecargas, además, produce alteraciones en la regulación de la tensión, con lo cual empeora el rendimiento y funcionamiento de los equipos.

Para una potencia constante (kW), la cantidad de corriente de la red se incrementará en la medida que el factor de potencia disminuya (véase figura 29), por ejemplo, con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente para la carga será dos veces la corriente útil, en cambio para un factor de potencia igual a 0.9 la cantidad de corriente será 10% más alta que la corriente útil.

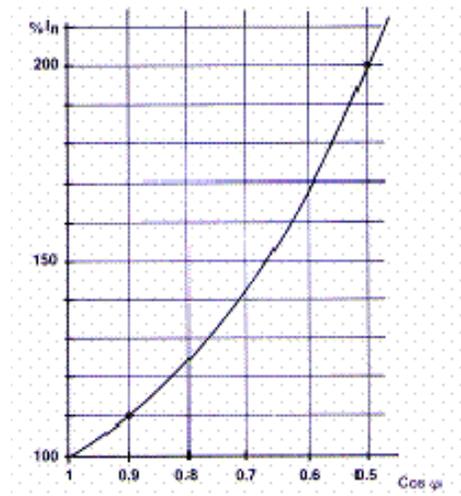
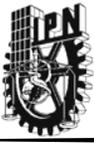


FIGURA 29 DIAGRAMA DE CORRIENTE NOMINAL AFECTADA POR EL FACTOR DE POTENCIA.

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución



exagerada del factor de potencia. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de:

- Un gran número de motores.
- Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.
- Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.

Si se conecta una carga puramente resistiva tales como alumbrado incandescente, resistencias, etc., a una fuente de suministro eléctrico, la corriente y el voltaje cambiarán de polaridad en fase, el factor de potencia será 1 y la energía eléctrica fluirá en una sola dirección a través de la red en cada ciclo.

Las cargas inductivas, tales como transformadores, motores de inducción y, en general, cualquier tipo de inductancia (tal como las que acompañan a las lámparas fluorescentes) generan potencia reactiva con la corriente *retrasada* respecto a la tensión.

Las cargas capacitivas, tales como bancos de condensadores o cables enterrados, generan potencia reactiva con la corriente *adelantada* respecto a la tensión.

Ambos tipos de cargas absorberán energía durante parte del ciclo de corriente alterna y solamente devolverán energía a la fuente durante el resto del ciclo.

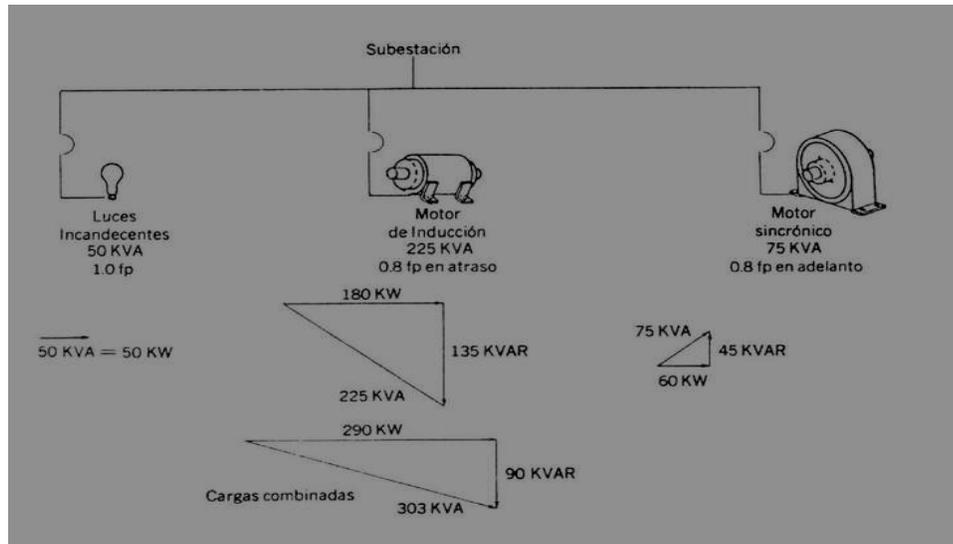


FIGURA 30 COMBINACIÓN DE LAS TRES TIPOS DE CARGAS EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA.

5.3 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

A menudo es posible ajustar el factor de potencia de un sistema a un valor muy próximo a la unidad. Esta práctica es conocida como *corrección del factor de potencia* y se realiza mediante la conexión a través de conmutadores, en general automáticos, de bancos de condensadores o de inductores. Por ejemplo, el efecto inductivo de las cargas de motores puede ser corregido localmente mediante la conexión de condensadores. En determinadas ocasiones pueden instalarse motores síncronos con los que se puede inyectar potencia capacitiva o reactiva con tan solo variar la corriente de excitación del motor.

Las pérdidas de energía en las líneas de transporte de energía eléctrica aumentan con el incremento de la corriente. Cuando una carga tiene un factor de potencia menor que 1, se requiere más corriente para conseguir la misma cantidad de energía útil. Por tanto, las compañías suministradoras de electricidad, para conseguir una mayor eficiencia de su red, requieren que los usuarios, especialmente aquellos que utilizan grandes potencias, mantengan los factores de potencia de sus respectivas cargas dentro de límites especificados, estando sujetos, de lo contrario, a pagos adicionales por energía reactiva.



El consumo de KW y KVAR (KVA) en una industria se mantienen inalterables antes y después de la compensación reactiva (instalación de los condensadores), la diferencia estriba en que al principio los KVAR que esa planta estaba requiriendo, debían ser producidos, transportados y entregados por la empresa de distribución de energía eléctrica, lo cual le produce consecuencias negativas .

Pero esta potencia reactiva puede ser generada y entregada de forma económica, por cada una de las industrias que lo requieran, a través de los bancos de capacitores y/o motores sincrónicos, evitando a la empresa de distribución de energía eléctrica, el generarla, transportarla y distribuirla por sus redes.

La corrección del factor de potencia debe ser realizada de una forma cuidadosa con objeto de mantenerlo lo más alto posible, pero sin llegar nunca a la unidad, ya que en este caso se produce el fenómeno de la resonancia que puede dar lugar a la aparición de tensiones o corrientes peligrosas para la red. Es por ello que en los casos de grandes variaciones en la composición de la carga es preferible que la corrección se realice por medios automáticos.

Mejorar el factor de potencia resulta práctico y económico, por medio de la instalación de condensadores eléctricos estáticos, o utilizando motores sincrónicos disponibles en la industria (algo menos económico si no se dispone de ellos).

El método más práctico para mejorar (corregir) el factor de potencia, es instalando capacitores o condensadores, en donde la corriente del condensador se encargará de suministrar la corriente magnetizante requerida por la carga, como se observa en la figura 31. El efecto de los condensadores es opuesto al de las cargas inductivas, debido a esto la cantidad neta de potencia reactiva se reduce y por consecuencia se aumenta el factor de potencia. Esto permite conectar equipo eléctrico adicional en el mismo circuito y reduce los costos por consumo de energía como consecuencia de mantener un bajo factor de potencia.

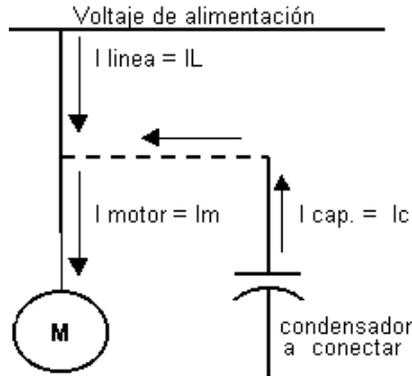


FIGURA NO. 31 INSTALACIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES CERCA DE LA CARGA.

Se emplean tablas y gráficas para facilitar la determinación de la capacidad de los condensadores necesarios para corregir el factor de potencia, a continuación se muestra la tabla la cual es una de las más utilizadas en este proceso.

CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA					
FACTOR DE POTENCIA ORIGINAL	FACTOR DE POTENCIA DESEADO				
	100	95	90	85	80
50	1.732	1.403	1.248	1.112	0982.
51	1.687	1.358	1.202	1.1087	0.936
52	1.643	1.314	1.158	1.023	0.892
53	1.600	1.271	1.116	0.980	0.850
54	1.559	1.230	1.074	0.939	0.808
55	1.518	1.189	1.034	0.898	0.768
56	1.479	1.150	0.995	0.822	0.729
57	1.442	1.113	0.957	0.785	0.691
58	1.405	1.076	0.920	0.748	0.654
59	1.368	1.040	0.884	0.713	0.618
60	1.333	1.004	0.849	0.679	0.583
61	1.299	0.970	0.815	0.646	0.549
62	1.266	0.937	0.781	0.613	0.515
63	1.233	0.904	0.748	0.581	0.482
64	1.201	0.840	0.716	0.549	0.450
65	1.169	0.810	0.685	0.518	0.419
66	1.138	0.799	0.654	0.488	0.388
67	1.108	0.750	0.624	0.458	0.358
68	1.078	0.720	0.594	0.429	0.328



69	1.049	0.720	0.565	0.429	0.298
70	1.020	0.691	0.536	0.400	0.270
71	0.992	0.663	0.507	0.372	0.241
72	0.964	0.635	0.480	0.344	0.214
73	0.936	0.608	0.452	0.316	0.180
74	0.909	0.580	0.425	0.289	0.158
75	0.882	0.580	0.398	0.262	0.132
76	0.855	0.553	0.371	0.235	0.105
77	0.829	0.527	0.344	0.209	0.078
78	0.802	0.500	0.318	0.182	0.052
79	0.776	0.447	0.292	0.156	0.026
80	0.750	0.421	0.266	0.130	
81	0.724	0.395	0.240	0.104	
82	0.698	0.369	0.214	0.078	
83	0.672	0.343	0.188	0.052	
84	0.646	0.317	0.162	0.026	
85	0.620	0.291	0.136		
86	0.563	0.265	0.109		
87	0.567	0.238	0.082		
88	0.540	0.211	0.056		
89	0.512	0.183	0.28		
90	0.484	0.155			
91	0.456	0.127			
92	0.426	0.097			
93	0.395	0.066			
94	0.363	0.034			
95	0.329				
96	0.292				
97	0.251				
98	0.203				
99	0.143				

TABLA NO. V.1 SELECCIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS BANCOS DE CAPACITORES A INSTALAR DE ACUERDO AL VALOR REAL Y AL VALOR AL CUAL SE DESEA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA.



5.4 CONSECUENCIAS DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA.

Las instalaciones eléctricas que operan con un factor de potencia menor a 1.0 tienen las siguientes consecuencias en la medida que este disminuye, además afecta a la red eléctrica tanto en alta tensión como en baja tensión:

Al usuario:

➤ **Incremento de las pérdidas por efecto Joule**

La potencia que se pierde por calentamiento está dada por la expresión I^2R donde I es la corriente total y R es la resistencia eléctrica de los equipos (bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.). Las pérdidas por efecto Joule se manifestarán en:

- Calentamiento de cables
- Calentamiento de embobinados de los transformadores de distribución, y
- Disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección

Uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, puede provocar cortos circuitos.

➤ **Sobrecarga de los generadores, transformadores y líneas de distribución.**

El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución, trabajen con cierta sobrecarga y reduzcan su vida útil, debido a que estos equipos, se diseñan para un cierto valor de corriente y para no dañarlos, se deben operar sin que éste se rebase.

➤ **Aumento de la caída de tensión**



Resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.); estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Esta caída de voltaje afecta a:

- Los embobinados de los transformadores de distribución
- Los cables de alimentación, y a los
- Sistemas de protección y control
- **Incremento de la potencia aparente**

Con lo que se reduce la capacidad de carga instalada en KVA en los transformadores de distribución.

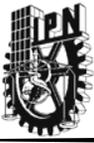
- **Incremento en la facturación eléctrica**

Ya que un bajo factor de potencia implica pérdidas que afectan al productor y distribuidor de energía eléctrica, por lo que se penaliza al usuario haciendo que pague más por su electricidad.

A la empresa distribuidora de energía:

- Mayor inversión en los equipos de generación, ya que su capacidad en KVA debe ser mayor, para poder entregar esa energía reactiva adicional.
- Mayores capacidades en líneas de transmisión y distribución así como en transformadores para el transporte y transformación de esta energía reactiva.
- Elevadas caídas de tensión y baja regulación de voltaje, lo cual puede afectar la estabilidad de la red eléctrica.

Una forma de que las empresas de electricidad a nivel nacional e internacional hagan reflexionar a las industrias sobre la conveniencia de generar o controlar su consumo de energía reactiva ha sido a través de un cargo por demanda, es decir cobrándole por



capacidad suministrada en KVA. Factor donde se incluye el consumo de los KVAR que se entregan a la industria.

5.5 VENTAJAS DE LA COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

La compensación del factor de potencia trae como consecuencia los siguientes beneficios energéticos y económicos:

- Incremento de la vida útil de las instalaciones
- Beneficios económicos:
- Reducción de los costos por facturación eléctrica
- *Eliminación del cargo por factor de potencia.*

Cabe recordar que la suministradora de energía penaliza a aquellos usuarios que tengan un factor de potencia menor a 0.9.

- Bonificación por parte de la compañía suministradora

Bonificación de hasta un 2.5% de la facturación cuando se tenga factor de potencia mayor a 0.9. Cabe aclarar que la suministradora de energía bonifica a aquellos usuarios que tengan un factor de potencia mayor a 0.9.

- Liberar potencia del transformador en kilovolts-amperes (kVA)
- Aumento de la disponibilidad de potencia de los transformadores, líneas y generadores
- Reducción de pérdidas en los cables por efecto Joule I^2R .

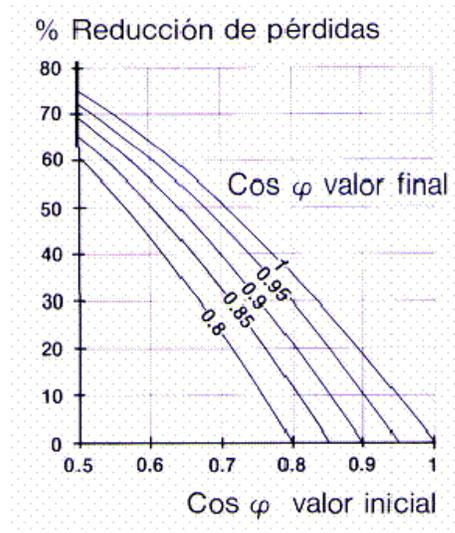


FIGURA 32 PÉRDIDAS EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS.

- Ahorro en consumo de energía al pasar de un factor de potencia inicial $\cos\varphi_1$ a un valor final $\cos\varphi_2$.
- Disminución de la caída de tensión en cables.



CAPITULO VI

“EL SISTEMA DE TIERRAS.”



6.1 SISTEMA DE TIERRAS.

A. GENERALIDADES.

El tratamiento de la puesta a tierra de las instalaciones eléctricas con frecuencia ha supuesto un reto para su solución, dado que son elementos que tienen contacto con algo tan variable, y muchas veces impredecibles, como es la propia naturaleza. Ello ha llevado a buscar soluciones, muchas veces empíricas, y pocas veces basadas en modelos ajustados a las circunstancias reales.

Por ello, uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones en las subestaciones y edificios es la de disponer de una red de tierras adecuadas, a la cual se conectan los neutros de los aparatos, los apartarrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquellas partes metálicas que deban estar a potencial de tierra. Teniendo como objetivo principal dar seguridad al personal, proteger el equipo y mejorar la calidad del servicio, tanto en condiciones de funcionamiento normal como en falla en el sistema.

Hay que resaltar que el objetivo principal de la puesta a tierra es el de limitar la tensión de cualquier elemento respecto a tierra. Recordando que desde el punto de vista eléctrico, los accidentes se pueden reducir o eliminar disminuyendo la tensión, o aminorando el tiempo de contacto con materiales en tensión. Con la puesta a tierra disminuimos esos riesgos, pues se evita que las masas metálicas se puedan poner en tensión al tenerlas conectadas a tierra.

En la actualidad se están teniendo mayores cuidados en el diseño de la redes de tierra, ya que el uso generalizado de los sistemas de cómputo y comunicaciones, no se pueden permitir elevaciones de potencial, ya que en el caso de un sistema de cómputo, un



impulso de sobretensión se puede transmitir como un dato erróneo, lo cual puede ser más perjudicial que si dañara el equipo.

6.2 NECESIDAD DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

Un buen sistema de puesta a tierra es necesario para mantener buenos niveles de seguridad del personal, buena operación de los equipos y el buen desempeño de los mismos.

En sistemas de potencia, la puesta a tierra mantiene la referencia necesaria; ya que la forma en que el sistema se conecta a tierra puede tener un gran efecto en la magnitud de los voltajes de línea a tierra que deben ser mantenidos en condiciones normales y bajo condiciones transitorias. La puesta a tierra del neutro del sistema permite la operación de sistemas de protección basados en la detección de corrientes que circulan por la misma, aislando así el circuito bajo falla.

La circulación de las intensidades de corriente mencionadas por la instalación de puesta a tierra pueden originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo entre la instalación de puesta a tierra y el terreno que la rodea o entre dos puntos de la misma instalación, por esa razón debe de considerarse la instalación de puesta a tierra para que incluso con la aparición de las diferencias de potencial se cubran los siguientes propósitos:

- a) Seguridad de las personas.
- b) Protección de las instalaciones.
- c) Mejora de la calidad de servicio.
- d) Establecimiento y permanencia de un potencial a tierra.



Debe hacerse especial énfasis en que la seguridad de las personas, es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra. La función de la puesta a tierra de una instalación eléctrica es la de forzar la derivación al terreno, de las intensidades de corriente de cualquier naturaleza, que se puedan originar, ya se trate de corrientes de falla, o debidas a descargas atmosféricas. En el diseño de una subestación e instalación eléctrica es necesario definir diversas conexiones a tierra (puesta a tierra), para conectar a la propia red de tierra los neutros, tanques y carcasas de los equipos, los cables de guarda, las estructuras metálicas y todas aquellas partes que deben estar a potencial de tierra logrando así las siguientes funciones principales:

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra ya sea que se deban a una falla de circuito corto o a la operación de un pararrayos, con ello, evitando exceder los límites de diseño de los equipos.
- Evitar que, durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producir diferencias de potencial entre los distintos puntos de la subestación, significando un peligro para el personal.
- Proporcionar una trayectoria a tierra para el neutro de los sistemas o equipos eléctricos que así lo requieran, limitando la aparición de potencial en el neutro de un sistema en estrella aterrizado.
- Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección, mediante sistemas de relevadores, se logra la eliminación de las fallas a tierras en los sistemas eléctricos.
- Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de las corrientes de falla y



descargas atmosféricas y estáticas, y así eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos.

- Contar con un medio seguro que aterrice los equipos eléctricos cuando estén en mantenimiento.
- Limitar la elevación de potencial de la red a valores aceptables cuando ocurre una falla a tierra.
- Dar mayor continuidad y confiabilidad al servicio.

Por ello, toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada en forma tal que, en ningún punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, exista el riesgo de que puedan estar sometidas a una tensión peligrosa durante cualquier defecto de la instalación eléctrica o en la red unida a ella.

6.3 **NORMATIVIDAD.**

Las normas mexicanas y extranjeras juegan un papel muy importante cuando se tiene un proyecto eléctrico y de otros tipos, ya que siguiendo sus recomendaciones se puede estar seguro que lo que se hace tiene el respaldo de experiencias que se plasman en la normas y dan la seguridad que el proyecto esta bien fundamentado en todos los aspectos y por ultimo saber que ante una unidad verificadora cuando se revise la instalación no se encuentra “ningún problema” ya que se estará cumpliendo con lo especificado en las a normas oficiales y vigentes. Se ha empezado a hablar de normas, pero ¿que entendemos por una norma?, en el diccionario de la real academia de la lengua española da la siguiente definición:

Norma: Regla de conducta o regla a que se deben ajustarse las operaciones.



Como lo menciona la definición anterior, una norma son reglas que hay que seguir; entonces cuando se hace alguna instalación eléctrica de cualquier tipo, se tiene que seguir las reglas ya determinadas para la seguridad de los que vayan a ser uso de las instalaciones así como de las personas que den mantenimiento a esa instalación y no corra ningún riesgo su integridad física.

La NOM-001-SEDE-1999 en su artículo 250 referente a puesta a tierra abarca los requisitos generales para la puesta a tierra y sus puentes de unión en las instalaciones eléctricas, además de los requisitos específicos que se indican a continuación:

- En sistemas, circuitos y equipos en los que se exige una conexión a tierra, se indica el lugar donde se permite o donde no se permite que estén puestos a tierra.
- El conductor del circuito que es puesto a tierra en sistemas puestos a tierra.
- Ubicación de las conexiones a tierra.
- Tipos y tamaños nominales de los conductores, puentes de unión y electrodos de conexión para puesta a tierra.
- Métodos de puesta a tierra y puentes de unión.
- Condiciones en las que se puede sustituir a los resguardos, separaciones o aislamiento por la puesta a tierra.

La norma hace ver la importancia que conlleva tener una puesta a tierra y especificando que los sistemas se conectan a tierra para limitar las sobrecorrientes eléctricas debidas a descargas atmosféricas, transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión, y para estabilizar la tensión eléctrica a tierra durante su funcionamiento normal. Los equipos se conectan a tierra de modo que ofrezcan un camino de baja impedancia

para las corrientes eléctricas de falla, y faciliten el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a tierra.

Los materiales conductores que rodean a conductores o equipo eléctrico o que forman parte de dicho equipo, se conectan a tierra para limitar la tensión a tierra de esos materiales y para facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en caso de falla a tierra.

En su artículo 200 de la NOM hace notar el uso e identificación de los conductores puestos a tierra; en este artículo se establecen los requisitos para la identificación de terminales, conductores puestos a tierra en el sistema de alambrado de usuarios e identificación de los conductores puestos a tierra. Para su identificación de las terminales de los dispositivos de puesta a tierra la NOM en su artículo 250-119 especifica lo siguiente: las terminales de conexión de los conductores de puesta a tierra de equipo se deben identificar (1) mediante un tornillo terminal de cabeza hexagonal pintada de verde, que no se pueda quitar fácilmente (2) mediante una tuerca terminal hexagonal pintada de verde que no se pueda quitar fácilmente o (3) mediante un conector a presión pintado de verde. Si la terminal del conductor de puesta a tierra no es visible se debe marcar el orificio de entrada del cable de tierra con la palabra “V” o “T” o con el símbolo de puesta a tierra N. 5019 de la Comisión Electrotécnica Internacional o de cualquier otro modo en color verde.



FIGURA 33 SÍMBOLO DE PUESTA A TIERRA IEC N. 5019

La importancia de la puesta a tierra aclara como evitar las corrientes indeseables; en su artículo 250-21 menciona lo siguiente: La puesta a tierra de sistemas eléctricos



conectores de circuitos, apartarrayos y partes conductoras de equipo y materiales normalmente sin energía se deben hacer y disponer de modo que se evite el flujo de corrientes eléctricas indeseables por los conductores de puesta a tierra o por la trayectoria de puesta a tierra. No se consideran corrientes eléctricas indeseables a las temporales que se produzcan accidentalmente, como las debidas a fallas a tierra, y que se presentan sólo mientras los conductores de puesta a tierra cumplen sus funciones de protección previstas.

Otra norma que se tomó en cuenta y es muy importante es la **NOM-022-STPS-1999, ELECTRICIDAD ESTÁTICA EN LOS CENTROS DE TRABAJO – CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE**. En esta norma se observa la importancia de una buena puesta a tierra, que rige en todo el territorio nacional y aplica en todos los centros de trabajo donde por razones del mismo trabajo se puedan generar cargas estáticas, ya sea porque se manejen sustancias explosivas o inflamables o porque estén en una zona donde puedan recibir descargas eléctricas atmosféricas. Esta norma permite a toda persona tener un conocimiento mas concreto acerca de las instalaciones, maquinaria y equipo que por sus características requieran de conexión a tierra. A continuación se citan algunos puntos que se mencionan en dicha norma:

- Todo el equipo de seguridad del personal debe conectarse a tierra con cable de cobre desnudo para evitar que en algún momento puedan quedar a un potencial diferente del de tierra y ser tocados por alguna persona.
- Las estructuras de los edificios, se deben conectar a la red general de tierra mediante cable de cobre desnudo de 34mm^2 de área nominal de sección transversal (Calibre 2 AWG), empleando de preferencia conectadores soldables. Deben conectarse todas las columnas de las esquinas y las intermedias que sean necesarias para tener las conexiones a distancias que no excedan de 20 m.



- Las estructuras de subestaciones a la intemperie, así como los equipos metálicos ahí instalados deben conectarse a la red de la tierra mediante cable de cobre desnudo 34 mm^2 de área nominal de sección transversal (Calibre 2 AWG). La red de tierra para estos casos se puede usar cable de cobre desnudo de 107 mm^2 de área nominal de sección transversal (Calibre 2 AWG) o mayor dependiendo de la magnitud de la corriente de falla.

6.4 COMPONENTES DE UNA RED DE TIERRAS.

Los componentes de una red de tierras son de vital importancia, todos y cada uno de ellos, ya que si alguno no cumpliera con lo que se le demanda esta red de tierras no estaría dando su funcionamiento en un 100 % y se estaría poniendo en riesgo la integridad física de las personas que hicieran uso en cualquier momento de esta instalación, por tal motivo todos y cada uno de estos componentes deben ser revisados cuidadosamente por una persona capacitada para que pueda detectar cualquier anomalía en alguno de estos componentes y se pueda actuar a tiempo, haciendo el cambio de alguna parte de este componente o haciendo su cambio total.

La conexión de un conductor del electrodo de puesta a tierra con el electrodo correspondiente debe ser accesible y estar hecha de tal manera que asegure una puesta a tierra eficaz y permanente.

Una recomendación de NOM-001-SEDE-1999 es que los conductores de puesta a tierra y los cables de puentes de unión se deben conectar mediante soldadura exotérmica, conectadores a presión aprobados y listados, abrazaderas u otros medios de conexión que sólo dependan de soldadura. Para conectar los conductores de puesta a tierra a los envolventes no se deben usar pijas; estas son las recomendaciones con un grado de gran importancia que hace notar la norma en su artículo 250-113.



Dándole la importancia que merecen los componentes de una red de tierras, será muy importante saber de que manera se pueda estar seguro que el material que se compre verdaderamente tenga una buena calidad; Tomando como referencia una norma de Comisión Federal de Electricidad que es la CFE-56100-16-1996, se resalta que la tomada en cuenta es una especificación de Julio de 2000 y sustituye a la edición de Agosto de 1996 y todos los documentos de CFE relacionados con electrodos para tierra que se hayan publicado. La presente especificación establece las características técnicas, los métodos de prueba y control de calidad que deben cumplir los electrodos para tierra de las instalaciones de Comisión.

Para conocer más afondo un electrodo de tierra se citan algunos términos que se utilizan en documentos que hablen de electrodos.

- Cubierta del Electrodo.
- Recubrimiento metálico conductor que cubre la superficie del núcleo.
- Cubierta Electrolítica.
- Recubrimiento metálico logrado por medio de un proceso de electrodeposito.
- Cubierta Soldada.
- Recubrimiento metálico que cubre el núcleo del electrodo mediante un enlace soldado de los componentes de los materiales de núcleo y la cubierta.
- Núcleo del Electrodo.
- Parte central que constituye el cuerpo interior del electrodo.

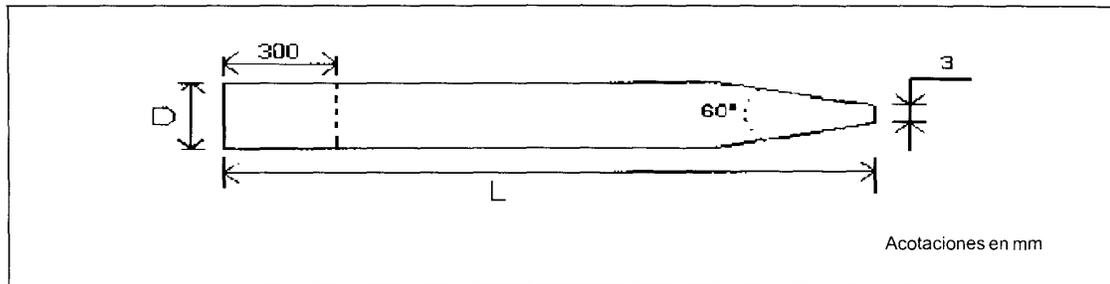
Utilizando como referencia la norma antes mencionada se puede estar seguro que se utiliza un componente de la red de tierras de buena calidad; además de que no se



sacrifica la calidad de sus materiales por su costo, y de esta manera se le da un mayor respaldo al proyecto que se realice.

A. ELECTRODOS.

Se define como electrodo de puesta a tierra todo material conductor (por lo general metálico), en perfecto contacto con el terreno, encargado de introducir en él las corrientes de falla o de origen atmosférico canalizadas a través de una instalación de protección. El objetivo del electrodo es que el potencial de la red de tierras respecto de tierra sea 0V, ó lo más próximo posible. Para lograr este objetivo hay que conseguir que la unión electrodo-terreno sea la mejor posible, porque sólo de ella depende este valor que se denomina resistencia de puesta a tierra. A continuación se muestra las características de una varilla que se deben cumplir, basados en la norma de CFE 56100-16 (Electrodos para Tierra).



Concepto		Acero con recubrimiento de cobre electrolítico	Acero con recubrimiento de cobre soldado
Uso:		Electrodos con profundidad para conexiones a tierra en terrenos de alta resistencia eléctrica	
Descripción corta:		ACE - 16	ACS - 16
Abreviaturas en la descripción corta:		A = Acero, C = Cobre E = Electrolítico	A = Acero, C = Cobre S = Soldado
Código:		2077 X 1	2077 A 2
Longitud (L) mm (Tolerancia):		3 000 (-0 + 10 mm)	3 000 (-0 + 10 mm)
Masa aproximada en kg:		4	4
Rectitud cm/m:		0,083	0,083
Núcleo	Material:	Acero estirado en frío AISI 1018, 1035 o 1045	
	Diámetro en mm:	14,3 min. 15,5 máx.	16
Recubrimiento	Material:	Cobre electrolítico ASTM-B-152	Acero y cobre soldado
	Espesor mínimo (mm):	0,25	0,25
	Adherencia:	Ningún desprendimiento del recubrimiento del núcleo	
Información	Logotipo o marca de fabricación:	Debe ser permanente en forma circular o longitudinal a 300 mm a partir del extremo de aristas redondeadas	
	Número de lote y año de fabricación:	Debe estar contenido en la información	
	Empaque:	10 piezas. Atados con fleje galvanizado o plástico	
	Unidad:	Pieza	

TABLA CARACTERÍSTICAS DE LOS ELECTRODOS PARA TIERRA.

Está prohibido, y no se puede utilizar como electrodos, las tuberías de gas, tuberías de gasóleo, etc. Por obvias razones. Los electrodos más utilizados y que son fáciles de instalar, calcular y mantener son los electrodos artificiales, que se colocan superficialmente y en número de acuerdo con el cálculo previsto.

Hay 4 tipos de electrodos que son utilizados en la puesta a tierra; se mencionan a continuación:

- Picas



- Placas.
- Cable enterrado.
- Empleo de la canalización del agua.

B. PICAS.

Son electrodos cilíndricos que se introducen en el terreno de forma vertical por lo general, (ver figura VI.2). El electrodo que se emplea más en las instalaciones de puesta a tierra es la varilla de tierras (varilla copperweld). Es elaborada con acero de alta dureza a la cual se le adhiere una lamina de cobre, procurando que haya entre estos dos materiales una buena conexión y una alta conductividad; son templadas para proveer fuerza y rigidez para el empleo de los métodos de instalación ya sea con martillo ligero o bien con manejadores mecánicos, el cobre exterior antioxidante esta soldado con el núcleo de acero obteniendo con esto la eliminación total del efecto electrolítico. El valor de la resistencia de tierra que nos ofrecen estos electrodos enterrados en el terreno, está en relación directa con la resistividad aparente del terreno y en relación a la longitud del mismo, según la expresión siguiente:

$$R = \frac{\rho_a}{L} \dots\dots\dots 2.1$$

Donde: R = Resistencia del terreno.

ρ = Resistividad aparente del terreno.

L = Longitud del terreno.



FIGURA 34 VARILLA DE ACERO RECUBIERTA DE COBRE (VARILLA COPPERWELD).

C. PICAS EN PARALELO.

Este sistema de colocación de picas en paralelo (figura 34), es el utilizado normalmente para realizar la puesta a tierra en edificios y viviendas, debido a su facilidad de ejecución y bajo costo. Este sistema tiene la ventaja de que es fácilmente instalable y no requiere maquinaria especial. La única precaución que hay que tener es que las varillas tengan una separación, como mínimo de 1.8 metros de cualquier otro electrodo o sistema de puesta a tierra. De acuerdo con lo especificado en la NOM-001-SEDE-1999 en su artículo 250-83.

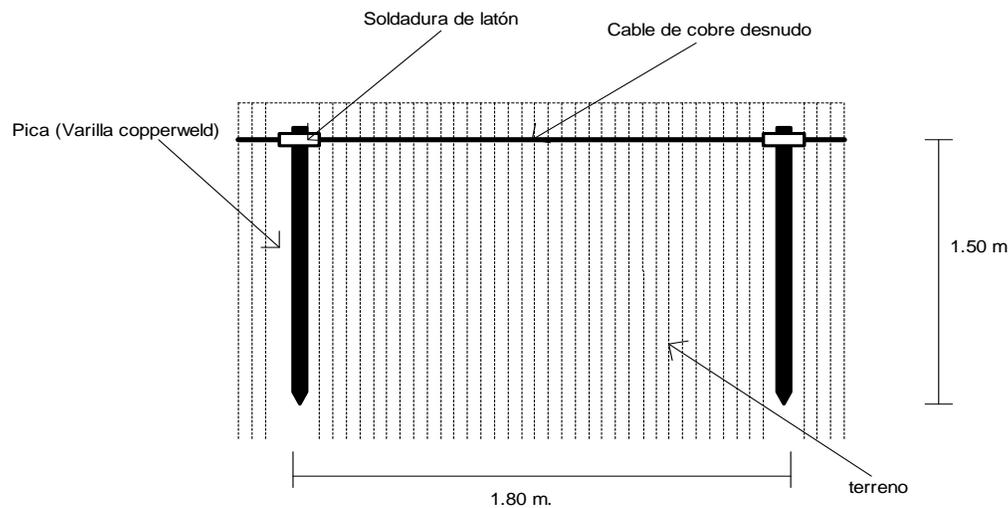


FIGURA 35 PICAS EN PARALELO.

D. CABLE ENTERRADO.

Son electrodos artificiales que consisten en colocar horizontalmente un cable desnudo en zanjas, debajo de la cimentación de los edificios o enterrados a una profundidad suficiente. En el caso de colocar dos cables enterrados en zanjas paralelas, se dejará una separación mínima entre ejes de zanjas de 5 metros. Lo ideal es colocar el cable por el perímetro del edificio, debajo de la cimentación, y si no es suficiente, continuar la zanja por uno de los laterales del edificio. En cualquiera de los casos, y cuando el conductor no está colocado bajo la cimentación del edificio, las zanjas se rellenaran de material susceptible de retener humedad (tierra arcillosa, tierra vegetal, etc.), y nunca con guijarros, escorias, cascajo o material de desecho, que impediría el buen contacto tierra electrodo.

E. REGISTRO PARA ELECTRODO DE PICA.

Cuando la puesta a tierra de una instalación se realiza con picas, es necesario realizar registros de inspección que permitan la conexión del cable de tierra de la instalación con la pica, y su posterior mantenimiento y conservación.

El registro de inspección es un hoyo donde se encuentra el electrodo de pica (50 cm. por debajo de la superficie del terreno), donde se conecta el cable de tierra de la instalación y sirve como aislamiento en la zona próxima al punto de contacto del electrodo con el terreno (Figura 36). Las dimensiones del registro de inspección serán las precisas para una fácil inspección, conexión y mantenimiento, y tendrá una tapa de cemento o similar lo suficientemente robusta para permitir su conservación aunque se transite sobre ella.

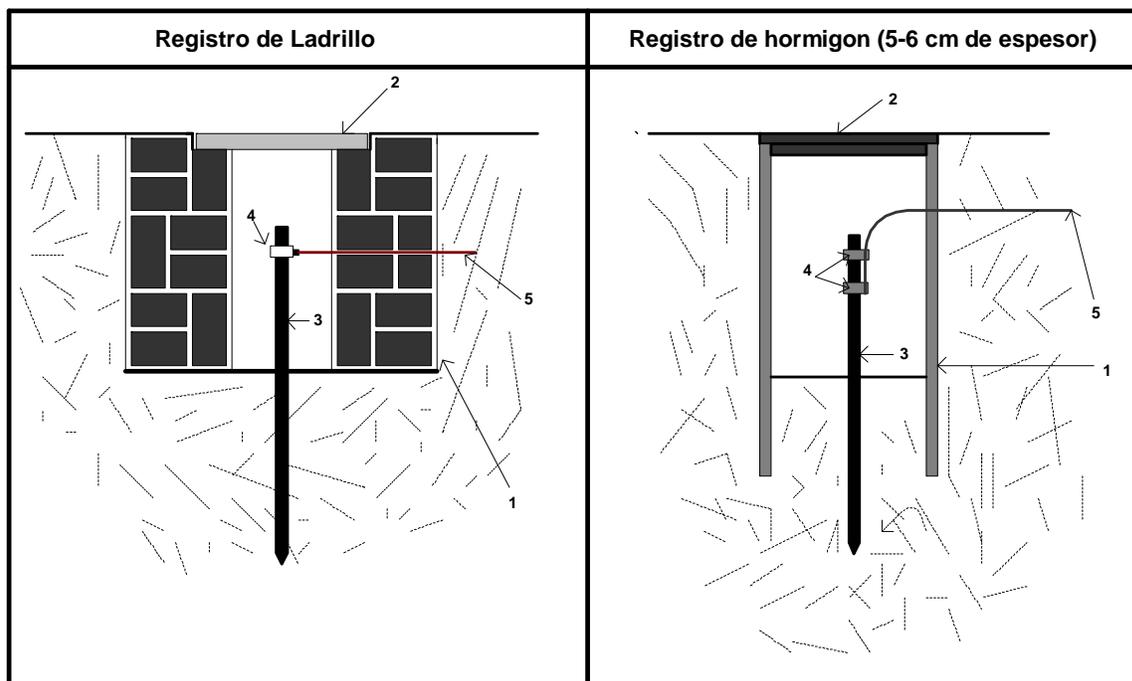


FIGURA 36 TIPOS DE REGISTROS Ó POZOS PARA PICAS.

1. Pozo ó Registro.
2. Tapa de hormigón o hierro.

3. Electrodo en forma de pica o tubular. Puede igualmente ser la derivación de un electrodo en malla.
4. Bornes. Estos pueden ser soldados o atornillados (ver tabla VI.2)
5. Cables de cobre o de acero galvanizado.

F. PLACAS.

Son electrodos artificiales de forma rectangular o cuadrada, que ofrecen una gran superficie de contacto con el terreno en relación a su espesor. Suelen ser de cobre, o de acero recubiertas de cobre, de al menos 2 mm de espesor para garantizar una buen contacto y una buena conductividad, o de acero galvanizado, de 2.5 mm de espesor. (Figura 37).

Las placas más utilizadas son las de 0.5m x 1 m y las de 1 m x 1 m. Para columnas de alumbrado se pueden utilizar placas de 0.5 m x 0.5 m que tienen una superficie útil de 0.25 metros cuadrados.

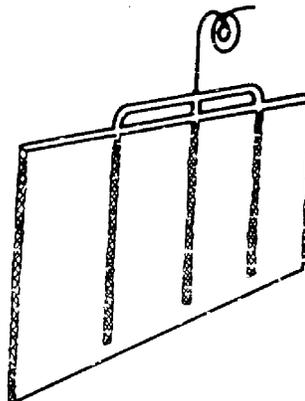


FIGURA 37 ELECTRODO DE PLACA RECTANGULAR.

La instalación de un electrodo de placa es más laboriosa y más cara que la instalación de una pica, y requiere para su buena conservación, una escrupulosa colocación en el



terreno. En primer lugar se cavará en el terreno un hoyo de dimensiones suficientes, que como mínimo debe tener medio metro de ancho por un metro de largo y una profundidad tal que, una vez colocada la placa en forma vertical, su parte superior quede como mínimo a 50 cm. por debajo de la superficie del terreno. Se coloca la placa verticalmente y se rellena con tierra buena, arcillosa y grasa, y no con tierra de escombros o con piedras, hasta cubrirla por completo. Regar con agua, compactar la tierra y rellenar el hoyo. La construcción del registro para la placa es similar al construido para las picas.

G. EMPLEO DE LA CANALIZACIÓN DEL AGUA.

En las instalaciones receptoras funcionando a tensión nominal inferior a 1000 volts. Se admite el empleo de la canalización del agua como electrodo de tierra, siempre y cuando las tuberías tengan una considerable extensión, sean metálicas y estén profundamente enterradas.

Conviene no olvidar, que se va extendiendo el uso de tubos de material aislante, en cuyo caso la eficacia de la conducción del agua como electrodo es nula.

La conexión eléctrica del conductor de tierra al emplear la canalización del agua como electrodo, se realiza antes del contador general del agua. La entrada y salida de éste pueden ponerse en corto circuito con un puente realizado con cable de cobre (figura VI.6 (a)), fijándolo al tubo con abrazaderas adecuadas.

La capa de protección contra la corrosión que eventualmente pueda recubrir el tubo (pintura) deberá eliminarse cuidadosamente a fin de obtener un buen contacto entre el conductor de tierra y el tubo metálico. Luego, se aplicará de nuevo la capa protectora contra la corrosión, por encima de la conexión. La red de distribución de agua (caliente o fría) que se extiende después del contador deberá conectarse equipotencialmente a la instalación de tierra.

Prescindiendo del empleo de la conducción del agua como electrodo, la conexión entre esta y la instalación de tierra de las redes de tuberías metálicas destinadas al aporte, distribución y descarga del agua en el interior del edificio, adquiere una importancia particular en los efectos de equipotencialidad de las masas. Recuérdese también, en este caso, que los empalmes entre las distintas tuberías no garantizan una perfecta conexión eléctrica y, por lo tanto, será conveniente poner en corto circuito (figura 38 (b)) dichas partes mediante puentes.

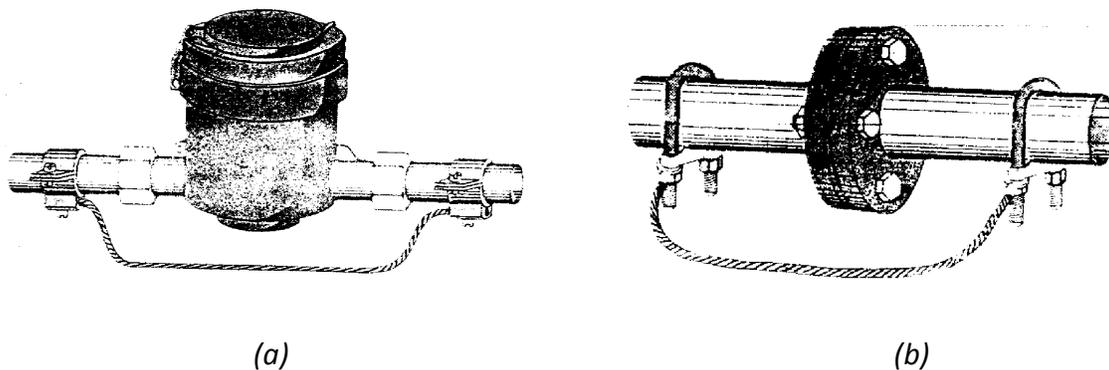


FIGURA 38 A) PUENTE DE CIRCUITO CORTO A UN CONTADOR GENERAL DE AGUA, B) PUENTE DE CIRCUITO CORTO EN UN EMPALME DE UNA TUBERÍA DE AGUA.

6.5 CONDUCTORES.

Cada uno de los elementos del sistema de tierra incluyendo los conductores de la red, los cables de puesta a tierra de los equipos, estructuras y los electrodos, deben ser seleccionados de tal manera que presenten las siguientes características:

- a)** Tengan la suficiente conductividad para que no contribuyan substancialmente a producir diferencias de potencial locales.
- b)** Resistencia a la fusión y deterioro en las condiciones más desfavorables de magnitud y tiempo de duración de corriente de falla a que pueden quedar expuestas.



- c) Confiables y con una alta resistencia mecánica, especialmente en aquellos lugares en que puedan quedar expuestos a un daño o abuso físico.
- d) Sean capaces de mantener sus características aún cuando sean expuesto a la corrosión.

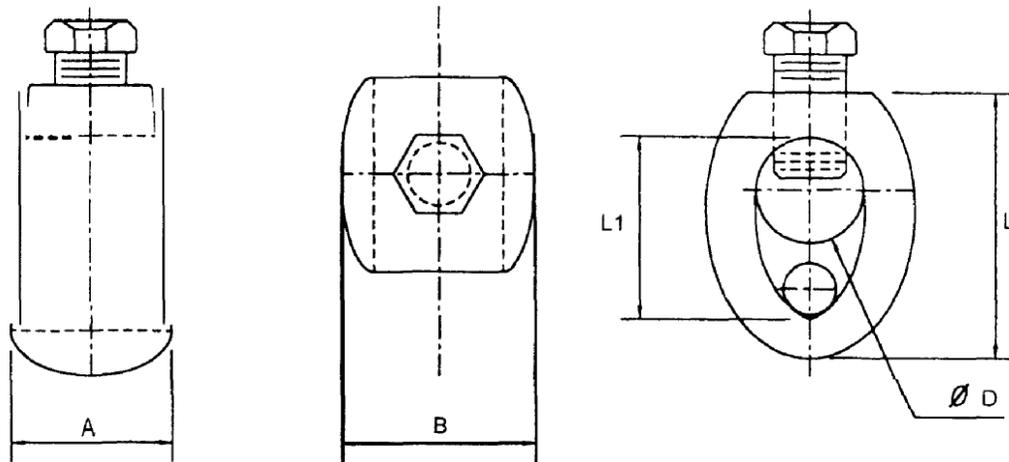
En el sistema de tierras para una subestación se utiliza un conductor de cobre desnudo de acuerdo al cálculo y no menor de 107 mm^2 de área nominal de sección transversal (4/0 AWG). Y para el sistema de tierras para edificios y/o plantas de proceso no menor a 67.43 mm^2 de área nominal de sección transversal (2/0 AWG). En cuanto al conductor con el cual deben ser aterrizados los equipos de la instalación eléctrica al sistema de tierras, se utiliza un calibre mínimo de 33.62 mm^2 de área nominal de sección transversal (2 AWG).

6.6 CONECTORES Y ACCESORIOS.

Son los elementos que sirven para unir a la red de tierra con los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc. Los tipos de conectores son básicamente de tres tipos:

- Conectores atornillados
- Conectores a presión.
- Conectores soldados.

Todos los tipos de conectores deben soportar la corriente de la red de tierra en forma continua. Los conectores atornillados se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión. Los conectores a presión son más económicos que los atornillados y dan mayor garantía de buen contacto.



Descripción corta	Diámetro del electrodo	Intervalo del diámetro del conductor	Dimensiones Tolerancias en mm					Masa aprox. (kg)	Código
	(mm)		D	L	LI	A	B		
Conector MET-16	16	3,25 - 8,25	17,5	43	25	22,3	26	0,08	3061X1

Material, forma y acabado	Conector de bronce, tipo opresor con tornillo de bronce, cuerda estándar, clase 2 B, de cabeza hexagonal de 9,5 mm o nominal.	
Especificación general a cumplir	CFE 20000-01 * CFE 56100-16 * IEEE - 837 *	
Abreviatura de la descripción corta	M = Mecánico ET = Electrodo de tierra 16 = Diámetro nominal en mm	
Uso	Conectar electrodo de tierra y conductor de bajada a tierra.	
Unidad	Pieza	
Empaque	Tipo	Caja
	Cantidad	500 piezas
Identificación	Logotipo y/o marca de fabricación	
	No. de lote y año de fabricación.	

* última edición

TABLA CARACTERÍSTICAS DE UN CONECTOR MECÁNICO

Los conectores soldados son los más económicos y seguros por lo que usan con mucha frecuencia. A continuación se muestran algunos tipos de conectores soldados que se emplean en los sistemas de puesta a tierra:

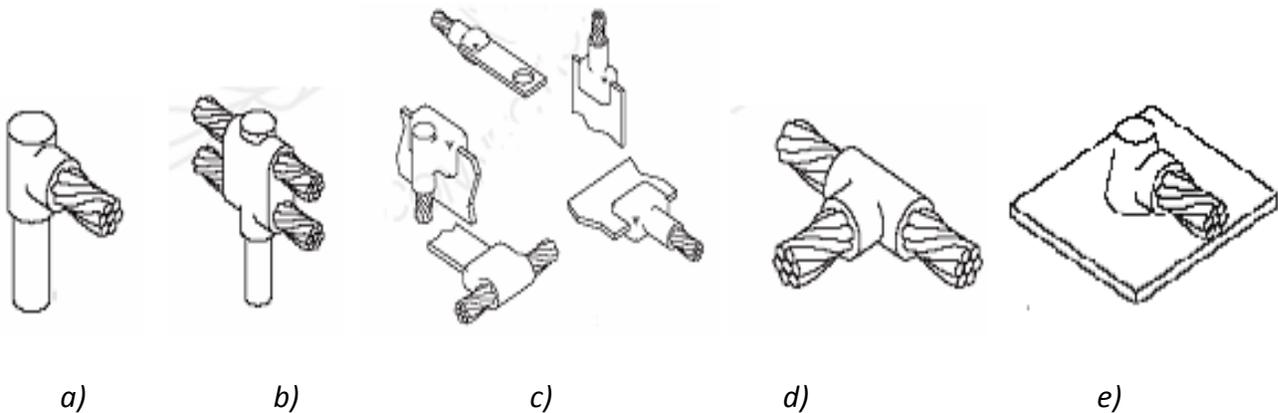


FIGURA 39 A) CABLE HORIZONTAL CON PICA VERTICAL, B) DE PICA VERTICAL A DOS CABLES HORIZONTALES, C) ZAPATAS DE CONEXIÓN A DIFERENTES EQUIPO, D) CONEXIÓN HORIZONTAL EN T, E) CABLE HORIZONTAL CON SUPERFICIE HORIZONTAL (PLANO O TUBO).

6.7 COMPUESTOS QUÍMICOS.

Básicamente se refiere al tratamiento del terreno donde se va a realizar una puesta a tierra mediante compuestos químicos, y así obtener una mejor resistividad en el lugar especificado para la puesta a tierra. La resistividad de un terreno depende de su contenido de electrolitos, que a su vez dependerá de su naturaleza mineralógica y del contenido de humedad (variable según la porosidad y el clima). Cuando el terreno es mal conductor debe tratarse alrededor de los electrodos, para disminuir artificialmente la resistividad del mismo afectando a un volumen de terreno importante. Esto puede lograrse realizando lo siguiente:

- a) Tratamiento con sales.

- b) Tratamiento con geles.
- c) Tratamiento por abonado electrolítico del terreno.
- d) Tratamiento con Bentonita.

A. TRATAMIENTO CON SALES.

Se entierra en una excavación poco profunda alrededor del electrodo (placa, pica o conductor enterrado) una sal (cloruro sódico, carbonato de sosa, sulfito de cobre, sulfito de magnesio, etc.). Se riega la tierra alrededor de la toma y la lluvia al caer realiza la filtración. La figura 39 muestra el tratamiento realizado en el caso de una pica. En periodos lluviosos el arrastre de la sal por las aguas de lluvia hace que al cabo de dos años como máximo, el tratamiento debe realizarse de nuevo.

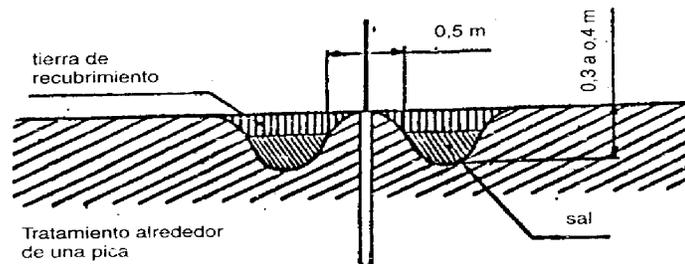


FIGURA 39 TRATAMIENTO DE UN TERRENO CON SAL.

B. TRATAMIENTO CON GELES.

Consiste en tratar el terreno con dos soluciones simultáneamente cuya combinación forma un gel. Al realizarse el tratamiento se disuelve cada uno de los productos en la cantidad de agua requerida en los diferentes depósitos. Las soluciones se aplican a continuación, una después de la otra, por encima del terreno a tratar. En este caso el arrastre del producto por las aguas de lluvia es mucho más lento que en el caso de las sales y la eficacia del tratamiento alcanza de 6 a 8 años. Los electrolitos se introducen por inyección alrededor de los electrodos.



C. TRATAMIENTO POR ABONADO ELECTROLÍTICO DEL TERRENO.

Consiste en aumentar la cantidad de electrolitos en solución en el agua del terreno aumentando el poder de retención del agua. Se utilizan para ello electrolitos a base de sulfato cálcico convenientemente tratado y estabilizado, cuya solubilidad es muy pequeña, pero que son susceptibles, con poca concentración, de multiplicar considerablemente la conductividad del terreno. El tratamiento consiste en extender en la superficie del terreno de 6 a 8Kg de mezcla por m². El agua de lluvia disuelve el electrolito y lo retiene por absorción en la superficie de los granos de roca.

Se ha comprobado que el periodo de eficacia de este tratamiento alcanza de 10 a 15 años, según sea la naturaleza del terreno. Si los terrenos son muy porosos, la cantidad del tratamiento debe ser mayor. A los productos base se añaden:

- Productos capaces de engendrar, por acción muy lenta sobre los componentes del suelo, otros electrolitos que complementen la acción de los electrolitos base.
- Productos que engendran hidrosuelos cuyas micelas se fijan sobre las paredes de las partículas neutras del terreno confiriéndose un mayor poder de absorción.
- Productos que aumentan el poder de retención de la humedad del terreno (coloides hidrófilos, minerales y orgánicos).

D. TRATAMIENTO CON BENTONITA.

La Bentonita es una arcilla de la familia de las mont-morillonitas y su principal propiedad es la capacidad de absorber y retener agua. Básicamente consiste en rellenar las grietas y otras aberturas que puedan existir en el terreno, para que una masa que envuelve las partículas del mismo terreno uniéndolos eléctricamente, formando una gran superficie de contacto, provocando así un buen camino para las corrientes eléctricas que se drenen a



tierra a través de la toma de tierra ó electrodo. La bentonita es de difícil manejo debido a que en contacto con el agua, forma una película impermeable, provocando así que se necesite de dos meses para absorber agua al 100% en el terreno.

6.8 TIPOS DE CONFIGURACIONES.

De acuerdo a las redes de tierra, se consideran tres tipos de configuración de sistemas de tierras básicos como lo son:

- a) **Sistema radial.** El sistema radial es el más barato pero el menos satisfactorio ya que al producirse una falla en un aparato, se producen grandes gradientes de potencial. Este sistema consiste en uno o varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones a cada aparato.
- b) **Sistema de anillo.** El sistema de anillo se obtiene colocando en forma de anillo un cable de cobre de suficiente calibre (aproximadamente 1000 MCM) alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación eléctrica y conectando derivaciones a cada aparato, mediante un cable más delgado de 107mm^2 de área nominal de sección transversal (Calibre 4/0 AWG). Es un sistema económico y eficiente y en él se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial. Los potenciales peligrosos disminuyen al disiparse la corriente de falla por varios caminos en paralelo.
- c) **Sistema de red.** El sistema de red es el más usado actualmente en nuestro sistema eléctrico y consiste en una malla formada por cable de cobre de 107mm^2 de área nominal de sección transversal (calibre 4/0 AWG), enterrada a una profundidad aproximada de 0.3 a 0.5 metros debajo de la superficie, conectado a través de electrodos de varilla de acero con recubrimiento de cobre de 15.9 mm de diámetro (Copperweld de 5/8") y de 3 metros de longitud a partes más profundas para

buscar zonas de menor resistividad (Ver figura VI.9). Este sistema es el más eficiente, pero el más costoso de los tres tipos.

El tipo de configuración de sistema de tierras que ofrece un rango de protección mejor en comparación con los otros es el de **sistema en red**, ya que proporciona el mejor circuito de baja impedancia para la circulación de corrientes de falla, elimina los posibles gradientes de potencial en cualquier punto de la instalación, además ayuda a determinar los límites de tensión tolerables por el cuerpo humano y el potencial en la periferia de la malla. Con esto no solo se elige el mejor tipo de configuración de sistema de tierras, sino la mejor protección de los equipos y seguridad de las personas que laboran en el recinto ante cualquier tipo de falla y se cumple con el objetivo principal de la puesta a tierra que es “la seguridad de las personas”.



FIGURA 40 MALLA O RED DE TIERRAS.



CAPITULO VII

**“SOLUCIONES A LA MALA
CALIDAD DE LA ENERGIA”**



7.1 SUPRESORES DE PICOS.

Un supresor de picos de voltajes transitorios o también conocidos como supresores de picos, se les define como un dispositivo de desvío de energía, que corta los impulsos de tensión y desvía la corriente del transitorio para no dañar la carga sensible, y mantener el voltaje de la carga libre de transitorios. La finalidad de dichos dispositivos es proteger equipos electrónicos sensibles de daños generados por picos de voltaje y/o descargas atmosféricas, esta conformado por discos de material cerámico llamados Varistores de Oxidos Metálicos (MOV'S).

Un Varistor de Óxidos Metálicos (MOV's), es un dispositivo que presenta una alta impedancia cuando el nivel de tensión es nominal y cambia a muy baja impedancia cuando se presenta un pico de tensión, por lo que permite desviar la corriente transitoria a tierra, simultáneamente el pico de tensión es cortado y la carga es protegida. Cuando el transitorio finaliza se restablece la condición inicial de alta impedancia y el equipo queda listo para proteger ante un nuevo evento. El tiempo de un supresor es por lo general menor a 1ns.

Los Transitorios de voltaje son picos de voltaje con magnitudes de hasta 20 KV, 10 KA con duración de nano a microsegundos de aparición aleatoria y bipolar en la onda senoidal. Se pueden clasificar por su origen como externos e internos:

Transitorios Externos: Son generados fuera de la instalación eléctrica, en la red de distribución de media y alta tensión o por fenómenos como rayos, descargas eléctricas, campos magnéticos, etc. Son el de menor ocurrencia, sin embargo los de mayor potencia destructiva, también se les conoce como destructivos y cuando se desvían se van por



tierra. A continuación se enlistan los factores que aumentan el riesgo de transitorios externos:

- Zonas de alto nivel isocerámico
- Cliente final de un alimentador
- Edificios o estructuras altas
- Zonas rurales o áreas abiertas

Transitorios Internos: Son generados dentro de la instalación eléctrica normalmente por los mismos equipos internos y dispositivos de switcheo. Son los de mayor ocurrencia, pero con magnitud pequeña que no daña a los equipos de forma instantánea. Los degrada con el tiempo y produce los que se conoce como oxidación electrónica. Los factores que producen este tipo de transitorios son:

- Arranque y paro de motores
- Generadores de rayos X
- Compresores de refrigeración
- Maquinaria de producción
- Robots y soldadoras
- Bancos de capacitores
- Sistemas de bombeo
- Equipos de aire acondicionado, ventilación y calefacción



Un Supresor contra transitorios será necesario para proteger los equipos electrónicos de control y comunicación instalados dentro del sistema eléctrico y se requieren cuando se presentan las siguientes condiciones:

- Instalación de equipos sensibles en zonas de influencia eléctrica nociva, como tener como vecino a una empresa de manufactura o soldadura.
- Instalación eléctrica en zonas de alto nivel isoceráunico.
- Equipos en constante conmutación de apertura-cierre.
- Proliferación de cargas no lineales: UPS, PC's, balastras, conmutadores, copadoras, etc.
- Equipos de alta velocidad de procesamiento: servidores, pentium's, PLC's.
- Equipos de conmutación: routers, enlace satelital, hubs, etc.
- Equipos sin respaldo de energía ininterrumpible.

Casi todos los supresores de picos operan como circuitos en paralelo (figura VII.1); se conecta entre línea y tierra en el alimentador que va de la fuente a la carga, por lo tanto la corriente de la carga no pasa a través del equipo. Siendo así, la selección del equipo depende de la probabilidad de la existencia de transitorios, por lo tanto se evalúan los aspectos de ubicación geográfica, localización en la red eléctrica y costo asociado al daño del equipo que se desea proteger. El voltaje en exceso se desvía de la ruta normal hacia otro circuito, regresando la línea viva a un voltaje adecuado sin interrumpir el suministro a los aparatos conectados.

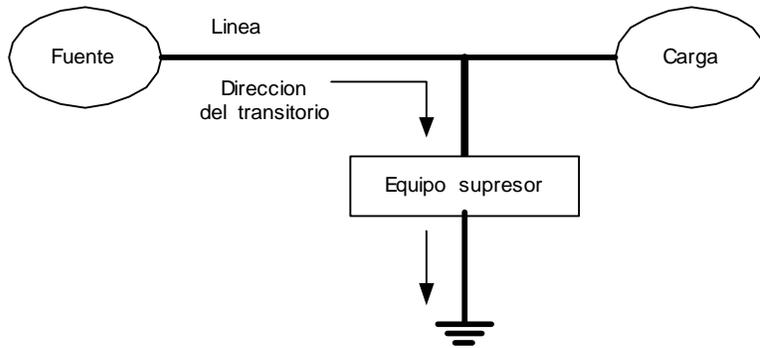


FIG EN CONDICIONES DE TRANSITORIO, LA IMPEDANCIA DEL SUPRESOR TIENDE A CERO Y LA CORRIENTE QUE DRENA A TIERRA ES LA DEL TRANSITORIO.

Pocos son los supresores que emplean circuitos en serie, esto es, reteniendo el exceso de energía. Tal es el caso de los supresores con capacitores, que se emplean en aquellos casos donde la instalación eléctrica local no posee conexión a tierra física o, bien, si se desea una respuesta más rápida ante las variaciones de corriente.

Capacitores y MOVs no son la única protección. Estos aparatos contienen un fusible, que no es otra cosa que un conductor de energía hasta cierto nivel. Si la corriente eléctrica se incrementa más allá del límite, el calor causado por la resistencia del fusible al paso de la corriente lo quema, cortando el circuito. Si el MOV o los capacitores no detienen el pico de voltaje, la corriente adicional fundirá el fusible, protegiendo al equipo conectado. Además, algunos protectores incluyen un sistema de regulación de la línea, filtrando posibles ruidos o interferencias generadas por otros aparatos.

A. NIVELES DE EXPOSICIÓN.

Los supresores de picos se clasifican de acuerdo a sus niveles de exposición, tomando como referencia el Std. C62.41-1991, "IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low – Voltage AC Power" en la que se manejan tres categorías de protección A, B y C (figura VII.2).

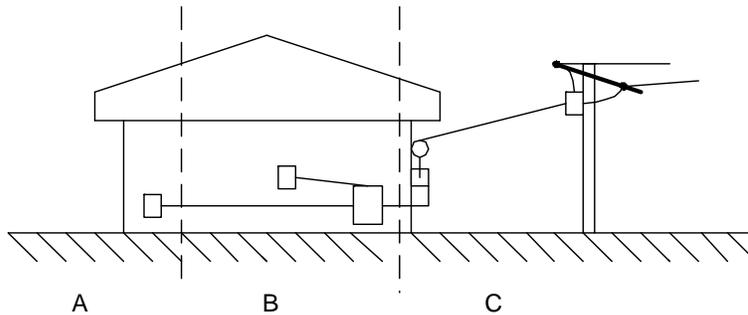


FIG NIVELES DE EXPOSICIÓN DE LOS SUPRESORES.

Nivel C: Los equipos colocados en este nivel deben ser de alta capacidad de supresión, ya que están expuestos a transitorios destructivos, por lo general se utilizan que van de 160kA a 480kA de supresión y se ubican en:

- Instalación exterior y acometida (Tableros principales de la subestación).
- Circuitos que van del watthorímetro al medio de desconexión principal.
- Líneas aéreas a edificios externos y líneas subterráneas para bombas.

Nivel B: Este es un nivel de exposición medio y son las áreas de cableado y equipos de distribución, así como nuevas fuentes de transitorios internos como compresoras y soldadoras. Los transitorios en esta zona se dan en las tres fases del sistema y por lo general la capacidad de los equipos esta entre 120kA y 240kA; su localización es en:

- Alimentadores y circuitos derivados cortos.
- Tableros de distribución,
- Alimentadores en plantas industriales
- Tomacorrientes para aparatos grandes con cableados cercanos a la acometida.



Nivel A: Es el nivel de exposición mas bajo. En este nivel se cuida más el filtrado que la supresión debido a que el rizo del transitorio llega minimizado si se cuenta con supresores en los niveles anteriores. En este nivel los valores de los supresores son del orden de 40kA a 120kA de supresión y su ubicación es la siguiente:

- Tomacorrientes y circuitos derivados largos,
- Todos los tomacorrientes que estén a más de 10 m de categoría B con hilos #14 - #10,
- Todos los tomacorrientes que estén a más de 20 m de categoría C con hilos #14 - #10.
- Tableros que alimentan cargas criticas como PLC's, computadoras, servidores y cargas altamente electrónicas.
- Tableros terminales de distribución y alumbrado que alimentan las cargas finales.

Esta clasificación es el resultado de un compromiso entre dos extremos:

- a) Proteger en forma eficiente sin importar la inversión inicial.
- b) No proteger evitando así la inversión inicial.

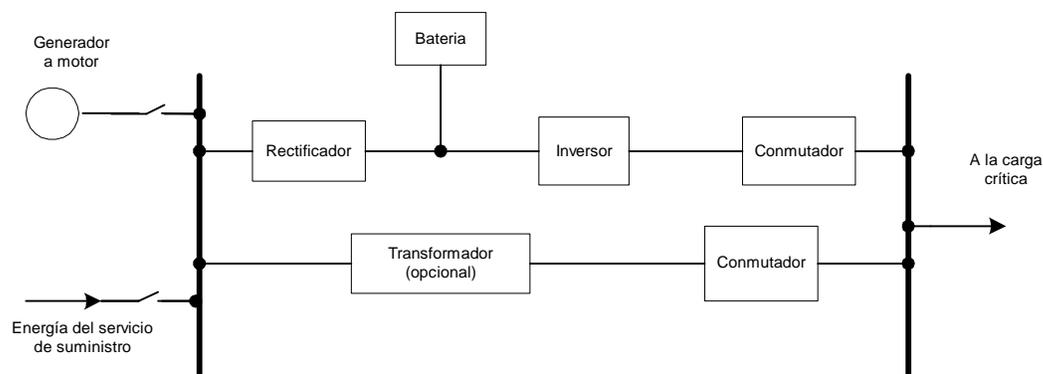
Entre estos extremos, el estándar recomienda que los protectores de categoría C deben ser capaces de tolerar mayores corrientes que los de categoría A y B, mientras que el B debe soportar mayores corrientes que los de categoría A. Es por esto que, en general, los de categoría C son más robustos y más costosos. La clasificación también sugiere que los de categoría A tengan un voltaje de sujeción menor, de esta manera los de clase B y C se encargan de manejar altas energías y los de categoría A se encargan de restringir las excursiones del sobrevoltaje.

7.2 UPS (UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY).

Un UPS es un sistema que protege a equipos normalmente electrónicos sensibles, contra los distintos disturbios eléctricos presentes en la alimentación de energía (picos, ruido, caídas de voltaje, cortes de energía etc.) entregando siempre una señal senoidal limpia, manteniéndose además el suministro de energía en el caso de un corte en la alimentación principal. Los UPS, brindan la mejor tecnología para aplicaciones críticas, a base de IGBT en inversor y rectificador, UPS 100% confiables.

Estas fuentes incorporan equipo complejo que debe planearse y especificarse cuidadosamente antes de comprarlo. Estos sistemas, que constan de rectificadores-inversores (por lo general respaldados con generadores impulsados por motores), se emplean para el suministro de energía a las computadoras, procesadores de datos en línea, controladores de proceso y otras cargas críticas, para prevenir las interrupciones costosas de energía.

El corazón de la UPS es la unidad rectificadora-inversora, o módulo, la cual acepta el voltaje de línea de C.A. y entrega energía de C.A. libre de transitorios a la carga crítica. Una batería suministra energía al inversor cuando se interrumpe el suministro de energía de la línea de C.A. hasta por varios minutos. En la figura VII.3 se muestra la configuración de una UPS típica.





**FIG DIAGRAMA A BLOQUES DE LA CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UNA FUENTE DE SUMINISTRO
ININTERRUMPIBLE (UPS).**

A las unidades rectificadoras-inversoras se les emplea en muchas combinaciones para suministrar una carga crítica-única, en paralelo, con un conmutador en derivación, respaldado por un conjunto de generadores impulsados a motor, etc. A la combinación particular seleccionada se le determina por la magnitud de la potencia de la carga crítica, el patrón de interrupción de la C.A. de la línea y la sensibilidad y naturaleza crítica de la carga.

Las fuentes de energía ininterrumpible constan típicamente de un rectificador, un banco grande de acumuladores de CD y un inversor de C.D. a C.A. El rectificador mantiene cargados a los acumuladores y energiza la carga a través del inversor. Si se interrumpe el voltaje de entrada de corriente alterna, los acumuladores toman la carga por medio del inversor hasta el retorno del voltaje normal de C.A.

Un UPS, además de regular la energía y suprimir los picos de voltaje, convierte el suministro de corriente alterna (AC) en corriente directa (DC) que se almacena en unas baterías. Si llega a haber una interrupción en el suministro externo de electricidad, la computadora seguirá operando mientras las baterías tengan energía y el proceso de conversión de corriente directa a alterna pueda efectuarse sin problema. Dado que el tiempo no es demasiado -y cada vez menor si varios aparatos están conectados a un UPS- debe guardarse la información que se esté procesando y apagar de forma normal el equipo a la brevedad. El proceso de conversión entre AC y DC reduce los picos y las interferencias en la línea.

Algunos de los problemas más comunes con la calidad de la energía, para los cuales un UPS es empleado para corregirlos son los siguientes:

1. Corte en el suministro de energía eléctrica por parte de la compañía



- suministradora, provocando que las maquinas y equipos detengan su trabajo.
2. Transitorios de voltaje, ya sea bajo o alto voltaje causando daño al equipo electrónico y oscilaciones en las lámparas.
 3. Bajo voltaje en las líneas de suministro causando sobrecarga en los motores.
 4. Alto voltaje por periodos de tiempo largos causando que las lámparas se dañen.
 5. Ruido que se presenta como una distorsión en la forma de onda e interferencia electromagnética.
 6. Distorsión armónica en la forma de onda de la frecuencia fundamental causando daño a las instalaciones eléctricas.
 7. Variaciones en la frecuencia nominal causando incrementos y decrementos de la velocidad de las maquinas.

En condiciones normales, la carga del UPS opera del inversor de CD a C.A. con el rectificador de C.A. a CD para mantener cargados los acumuladores y alimentar al inversor. Al haber una falla interna en el UPS, el interruptor de desvío cambia automáticamente a energía no acondicionada. El interruptor de desvío proporciona un medio manual para cambiar a energía de suministro eléctrico normal para hacer reparaciones a los componentes del UPS.

Algunos sistemas de respaldo de acumuladores parecen funcionar como UPS normales pero, en realidad, son sistemas de energía de reserva. Suministran energía a la carga desde una fuente eléctrica normal en circunstancias normales. Pero cuando se interrumpe la energía normal, los acumuladores, que se mantienen cargados, se conectan y toman a su cargo el suministro de energía por medio del inversor. Cuando se restablece el voltaje normal de alimentación, el dispositivo retorna al suministro normal de C.A. y recarga los



acumuladores para el siguiente evento. Existen varios esquemas para hacer la transferencia de energía normal de C.A. a acumuladores y nuevamente en retroceso sin interrupción ni atraso. Sin embargo, la filosofía es la misma: mantener un voltaje adecuado a la carga mientras se hace el cambio en cualquier dirección.

A. CLASIFICACIÓN DE LOS UPS'S

Básicamente, un UPS se clasifica en tres tipos: stand by off line, híbrido o ferroresonante y on line.

1.- Stand by Power Supply. En este tipo de fuente, la potencia es suministrada directamente de la línea de alimentación, después de una interrupción, la batería cargada por el inversor entra en servicio y continúa brindando la alimentación a la carga. Las baterías son cargadas, cuantas veces la línea de alimentación esta disponible.

La calidad y efectividad de este tipo de equipos varia considerablemente; sin embargo, son un poco mas baratos que un UPS online. El tiempo requerido por el inversor para entrar en servicio, es comúnmente llamado tiempo de interacción y equivale a un segundo.

Otras características que podemos observar en esta clase de equipos son los filtros de armónicas y los bancos de capacitares. Conectar los aparatos a una fuente de este tipo es como conectarlos directamente a la línea de alimentación, esto por que los UPS de este tipo ofrecen una pobre protección contra las variaciones de frecuencia, el ruido, los picos y los apagones. Algunos UPS de este tipo suelen contar con supresores de picos o transformadores de aislamiento que impiden la transferencia de la línea de alimentación a las baterías si un pequeño disturbio se presenta. Por sus bajas características también es llamado como UPS interactivo con la línea.



2.- Sistemas UPS Ferroresonantes. La teoría detrás de este tipo de fuentes de alimentación es simple. Cuando esta operando mediante la línea de alimentación, la fuente funciona por medio de un transformador ferroresonante. Este transformador mantiene una señal de voltaje de salida constante, aun cuando se presenten variaciones en el voltaje de entrada, y proporciona una buena protección contra el ruido presente en la línea. El transformador también mantiene una señal de salida por el secundario breve cuando ocurre un corte en la alimentación. La mejor característica que el inversor tiene es que opera en línea rápidamente sin ninguna interrupción de la alimentación.

De acuerdo a algunas fuentes, los transformadores ferroresonantes en un UPS pueden interactuar con la transformadores ferroresonantes en los equipos de alimentación y producir extraños resultados. Por el otro lado, un sistema UPS ferroresonante no disipa todo el calor, que es importante en algunos climas. Los equipos ferroresonantes operan de la misma manera que los stand by con la excepción de que los transformadores ferroresonantes son usados como filtros de salida. Este transformador esta diseñado para almacenar energía en grandes cantidades para cubrir el tiempo entre la interrupción de la línea de alimentación y la carga de las baterías y eliminar el tiempo de transferencia. Debido a que el transformador genera demasiado calor, estos equipos son generalmente grandes, pesados e ineficientes.

Cuando comenzó el uso de este tipo de sistemas de alimentación ininterrumpible, no era muy común su aplicación. El equipo de corrección del factor de potencia encontró que la interacción de los nuevos sistemas de computación con los transformadores, provoca oscilaciones de daño potencial, y el transformador crea por si solo distorsiones que propician una baja calidad de la energía de CA. Estos equipos aun continúan siendo utilizados en algunos procesos industriales, pero tienden a desaparecer por el uso general de las computadoras.



3.- Un autentico UPS, es aquel que esta en continua operación debido a un inversor. Obviamente, no hay tiempo de interacción, y estos sistemas generalmente cuentan con el mejor asilamiento contra los problemas presentes en la línea. Las desventajas de este tipo de herramientas son el incremento en el costo, el incremento en el consumo de potencia y el incremento en la generación de calor. A pesar de que el inversor esta siempre en operación, la fiabilidad de este tipo de unidades no se ve afectada. En realidad, se observan mas fallas en los UPS “stand by”. Estos brindan la misma calidad de conversión, solo que el primero soporta periodos mas largos. Estos equipos son comúnmente llamados UPS “on line”.

La conversión delta es un nuevo concepto de tecnología on line. A diferencia de la tecnología off line, este no requiere de un tiempo para el cierre del interruptor. Como la tecnología on line, la continua separación de la carga y la fuente de alimentación se presenta excepto por la frecuencia. Con la conversión delta, la frecuencia se sincroniza con la entrada principal.

La conversión delta, como su propio nombre lo implica, incluye tener al inversor que genera la diferencia entre la línea de voltaje y el voltaje deseado. Hace esto mediante acoplamiento magnético de la línea de alimentación en el lado primario con el inversor en el secundario. Cuando la línea de voltaje esta dentro de un rango aceptable, no se observa potencia del inversor y la carga es directamente alimentada por la fuente de alimentación. La conversión delta brinda alta eficiencia. Cuando la línea de voltaje se sale de un rango aceptable, el inversor entrega un voltaje en el devanado secundario del transformador que induce un voltaje a través del primario que incrementa o reduce el voltaje de la fuente.

La conversión dual en los sistemas de alimentación ininterrumpible opera bajo la conversión de la señal de entrada de CA en CD y también funciona a la inversa, es decir, de CD a CA. Esto es lo que se conoce como conversión dual o doble conversión. Las



baterías están directamente conectadas a la salida de CD, que provee un excelente filtro para eliminar el ruido. Efectivamente, este equipo aísla la carga de la fuente y regenera la forma de onda. Esto brinda algunos beneficios. Primero, este diseño protege contra los problemas comunes que afectan la calidad de la energía, esto permite que un UPS sea empleado en casi todo tipo de equipos, inclusive generadores. Segundo, este diseño permite al UPS soportar los cambios de voltajes de entrada y las frecuencias fácilmente. Tercero, ya que la carga esta siempre conectada por el inversor, cuando la alimentación falla, no hay tiempo de transferencia ya que el UPS cambia de la línea de alimentación a las baterías. Los tiempos de transferencia no son problema para las computadoras, pero para algunos equipos industriales si lo es tales como aire acondicionado, compresores, etc. El cuarto beneficio es el tiempo de duración, ya que se mantiene operando el inversor sin ningún problema. Los otros tipos de UPS requieren de un cambio en la dirección de la corriente cuando se presente una falla. Esto puede revelar problemas internos del UPS cuando mas se necesita. Desde que el UPS de conversión dual esta en operación los problemas no están ocultos, y pueden ser detectados y resueltos antes de que ocurra la falla. Un circuito derivado puede prevenir las perdidas de alimentación mientras se soluciona el problema en la red principal. El UPS de conversión dual es mas caro y no es tan eficiente en el momento de la interacción con la línea de alimentación como las unidades stand by o conversión delta. Su eficiencia alcanza el 94%, pero no esta influenciada por las desviaciones en la entrada, sino solo marginalmente por las corrientes de carga no senoidales.

Para la especificación de una UPS se deben de tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Los requerimientos de energía eléctrica de estado estacionario y transitorio del equipo de carga crítica que se va alimentar con el UPS. La mayoría de los fabricantes de computadoras tendrán esta información disponible. Se deben dar las condiciones bajo las cuales el UPS cumplirá estos requerimientos de carga (falla



de energía comercial, condiciones de batería, operación del generador a motor y fallas internas del UPS).

2. La confiabilidad y la facilidad de mantenimiento del UPS requeridas. Esto se expresa, por lo general, como el tiempo medio entre fallas (MTBF), en horas, del UPS, para que cumpla los requerimientos de energía eléctrica de la carga crítica, y el tiempo medio para reparar (MTTR), en horas, cualquier unidad rectificadora-inversora con fallas en el sistema. La especificación debe describir cómo se van a medir estos requerimientos y como los va a demostrar el vendedor.
3. Los términos de aceptación del UPS por el cliente. Estos términos deben incluir las pruebas que se llevaran a cabo en la planta del vendedor, las pruebas de la instalación completa en el sitio y la eficiencia del equipo para su aceptación.

Algunas características con las que debe contar un UPS son:

- Regulación de la frecuencia de salida no debe ser mayor al 5%.
- Contar con supresores de ruido e interferencia electromagnética.
- Costo razonable en el reemplazo de las baterías.
- En la eficiencia de la energía es importante dejar de utilizar los UPS on line, híbridos y ferroresonantes.
- Si la forma de onda de salida en el UPS es senoidal, un transformador con regulación de voltaje ofrecerá una señal de alta calidad.
- Si la forma de onda de salida en el UPS es cuadrada, utilizar la modularon pulse-width ayudara para obtener una unidad de alta calidad.



El paso mas importante en la compra de una UPS es el de prueba. El objetivo de las pruebas es doble: ver que el equipo cumpla con los requerimientos de las especificaciones y exponer algunos defectos de diseño o fabricación.

El primer conjunto de pruebas de las UPS es en relación con el comportamiento de estado estacionario; a estas pruebas se les debe dirigir para efectos de variación de la carga, voltaje de línea factor de potencia, frecuencia, temperatura y humedad relativa. El segundo conjunto de pruebas es en relación con el comportamiento dinámico, tal como es el caso de la suspensión de la energía de línea de entrada, aislamiento e inserción de líneas paralela, transferencia hacia y desde una derivación, carga de conmutación, cortocircuito de las terminales de salida y eliminación de fusibles. El tercer conjunto de pruebas es para demostrar la habilidad de una unidad rectificadora-inversora con fallas en el sentido de que se aisle así misma del sistema mientras que la UPS continúe dando suministro a la carga crítica, bajo condiciones tales como perdida de la excitación de compuerta del SCR, falla de conmutación en el inversor, falla de la unidad de ventilación y desperfecto en los circuitos de frecuencia común y de división de la carga. El conjunto final de pruebas consiste en probar la confiabilidad viendo que la UPS opere sin fallas, en un programa que incluya tiempo y carga en el que se vea si se cumplen las predicciones del tiempo medio entre fallas (MTBF). Finalmente, se pone en operación el sistema con una carga simulada durante un período de tiempo más o menos largo como una prueba de aceptación.

Las unidades rectificadoras-inversoras comerciales se construyen desde aproximadamente 1 a 250 KVA y se les ha arreglado en sistemas hasta de 2000KVA. A las unidades se les designa para suministrar cargas críticas a voltajes y frecuencias comerciales típicas monofásicas y trifásicas. Incluyendo las de 400Hz. Las baterías emplean celdas de plomo-calcio y por lo general se les selecciona para proporcionar energía a plena carga durante 10 minutos. Los valores nominales en ampere-hora de la batería decaen con rapidez para



tiempos breves de descarga de corriente alta, de tal manera que es menor el ahorro en costo cuando se selecciona una capacidad de cinco minutos en vez de una de 10. Excepto para los valores integrales en KVA, las unidades rectificadoras-inversoras por lo general no son artículos de entrega inmediata; ellas se fabrican bajo pedido y con base en las variaciones de un diseño original.

El costo de un UPS puede ser desde mil a decenas de miles de pesos, en función de la cantidad de equipos por proteger y la energía necesaria. A pesar de que un UPS cubre a la computadora de los picos de voltaje, esto no elimina el uso de un protector por separado, ya que el mismo UPS se puede estar dañando por los picos de voltaje que entran a ella.

7.3 FILTROS DE ARMÓNICAS.

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

La distorsión armónica en la red de corriente alterna puede ocasionar inconvenientes tales como:

- Exceso de corriente en capacitores y bancos de capacitores, con el consiguiente acortamiento de su vida útil.



- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección.
- Actuación indebida de fusibles.
- Aumento de las pérdidas, y mal aprovechamiento de la instalación.
- Sobrecalentamiento de motores y transformadores.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y/o cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Resonancia con otros componentes del sistema.
- Fallas en el aislamiento.

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

Si el estudio de armónicas nos revela un problema sumamente potencial (violación de los límites, por ejemplo), dos categorías de soluciones son posibles: (1) reducir las armónicas desde el punto de origen (antes de que ingresen al sistema), o (2) el empleo de filtros para reducir las armónicas indeseables. Existen algunos métodos para reducir armónicas en el punto de origen; por ejemplo, la conexión de varios transformadores para cancelar las armónicas que son extremadamente dañinas para el sistema. En muchos casos, sin embargo, reducir o eliminar las armónicas en su punto de origen es efectivo solo en el diseño o la expansión de la instalación. Para las instalaciones ya existentes, los filtros de



armónicas proporcionan a menudo la solución de menor costo. El objetivo primario de los filtros de armónicas es el de reducir la amplitud de la frecuencia de una o mas corrientes y voltajes.

Cuando la finalidad de los filtros de armónicas es la de prevenir una frecuencia en particular de todo un grupo de componentes de un sistema, es posible el empleo de filtros de armónicas que consisten en un inductor en paralelo con un capacitor, que presentan una impedancia relativamente grande con relación a la frecuencia. Como una solución, de cualquier modo, no puede ser extendida para eliminar las armónicas de la red, porque la producción de armónicas por cargas no lineales como los transformadores o convertidores estáticos es esencial para la operación normal del sistema. En el caso de los convertidores estáticos, las corrientes armónicas son normalmente prevenidas por el resto del sistema debido a un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas. La combinación de los filtros en serie y paralelo puede ser diseñada para minimizar las corrientes y voltajes armónicas en el sistema sin importar el valor de la impedancia, pero son muy caros.

El criterio ideal en el diseño de los filtros es la eliminación de todos los efectos perjudiciales causados por la distorsión de la forma de onda, incluyendo la interferencia telefónica, que es el efecto mas difícil de eliminar completamente. No obstante, este criterio ideal es irrealista por razones económicas y técnicas. Desde el punto de vista técnico, es muy difícil estimar el avance en la distribución de armónicas a través de la red. En el punto de vista económico, la reducción de la interferencia telefónica normalmente puede ser llevada a cabo tomando algunas medidas preventivas en el sistema telefónico y otras en el sistema de potencia.

A. TIPOS DE FILTROS.

Los filtros de armónicas pueden ser subdivididos en dos categorías: activos y pasivos. Los filtros activos están comenzando a ser un producto viable para la operación y aplicación en potencias elevadas. Para cargas que inyectan ciertas corrientes armónicas al sistema, un inversor de CD a CA puede ser controlado como un inversor que suministra corrientes armónicas para la carga, cuando el sistema de potencia permite suministrar la frecuencia de la corriente a la carga. La figura VII.4 muestra el diagrama de cómo un filtro activo funciona.

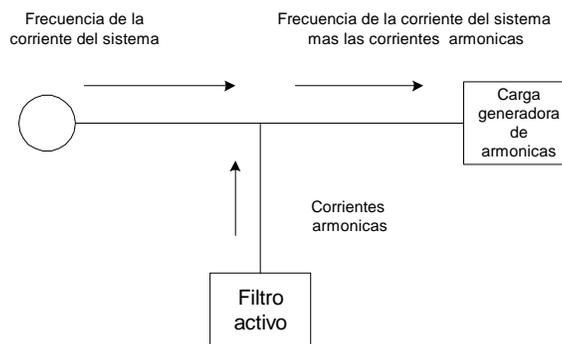


FIG DIAGRAMA DE UN FILTRO ACTIVO.

Para aplicaciones en tensiones elevadas o donde ya existen capacitores para la corrección del factor de potencia, es típico y efectivo el empleo de filtros pasivos. Los filtros pasivos están basados en el principio de resonancia en serie (recordando que una impedancia baja a una frecuencia específica es una característica de resonancia en serie) y puede ser fácilmente implementada. La figura VII.5 nos muestra un filtro de armónicas trifásico que es comúnmente empleado para filtrar las 5ª y la 7ª armónicas.

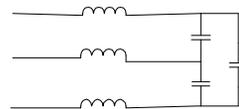


FIG DISEÑO TÍPICO DE UN FILTRO PASIVO.



B. FILTROS SINTONIZADOS.

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

La impedancia equivalente de dos filtros sencillos sintonizados cerca de su frecuencia resonante son prácticamente las mismas de aquellos filtros dobles sintonizados, como se muestra en la figura VII.7. Estos tienen la ventaja de reducir las pérdidas de potencia a la frecuencia fundamental comparada con la configuración de los filtros sintonizados sencillos. La principal ventaja de los filtros dobles sintonizados representa en aplicaciones de alta tensión, debido a la reducción en el número de inductores que son expuestos en toda la línea de impulsos de voltaje. Triples y cuádruples filtros sintonizados también pueden ser diseñados pero estos son raramente justificados por la dificultad de ajuste que presentan.

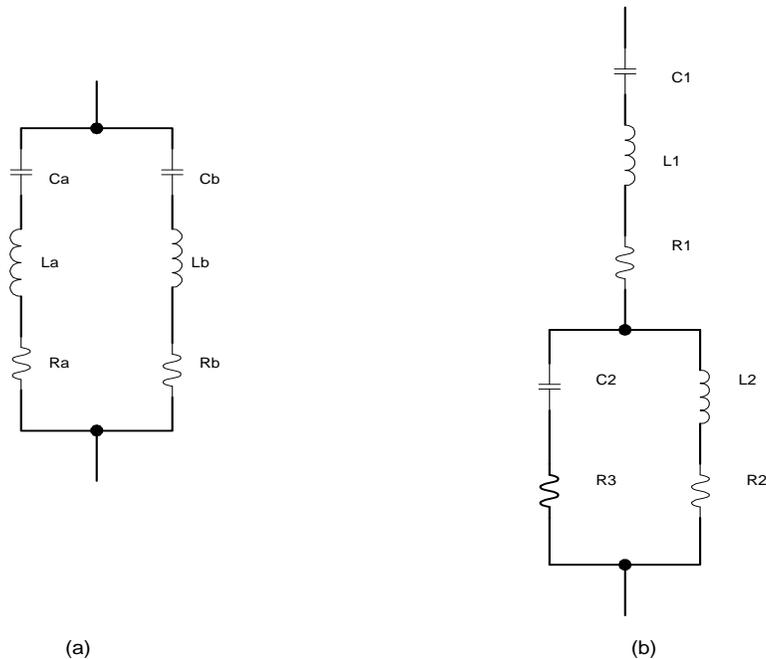


FIG . TIPO DE TRANSFORMACIÓN (A) DOS FILTROS SENCILLOS SINTONIZADOS; (B) FILTRO DOBLE SINTONIZADO

C. FILTROS SINTONIZADOS AUTOMÁTICOS

En el diseño de filtros sintonizados es provechosa la reducción máxima de la distorsión de la frecuencia. Esto se puede llevar a cabo mediante el diseño de filtros sintonizados intercambiando automáticamente el valor de la capacitancia o variando la inductancia. Un rango del 5% es comúnmente considerado adecuado. Un sistema de control, el cual mide la potencia reactiva de la frecuencia armónica en el filtro, que controla la inductancia (L) o la capacitancia (C) basado en el signo y la magnitud de la potencia reactiva, esta siendo utilizado conversores en alta tensión en corriente directa (HVDC). Los filtros automáticos sintonizados ofrecen las siguientes ventajas sobre los filtros fijos:

- i. La capacidad del capacitor es baja.



- ii. El capacitor empleado puede combinar un coeficiente alto de temperatura con la capacitancia y con un valor alto de la potencia reactiva por unidad de volumen y por unidad de costo.
- iii. Debido a lo elevado de la potencia reactiva, las pérdidas de potencia son bajas.

Las ventajas (i) y (ii) reducen el costo del capacitor que es el componente mas costoso del filtro. La ventaja (iii) reduce el costo del resistor y el costo de las pérdidas en el sistema.

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

- Compensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental para un factor de potencia especificado.
- Disminuyen el porcentaje de distorsión armónica total (THD).
- Evitan fenómenos de resonancia, que surgirían al conectar capacitores sin protección contra armónicas.
- Disminución de pérdidas activas en cables y aparatos electromagnéticos, por reducción del THD.



FIG REPRESENTACION DE UN FILTRO SINTONIZADO AUTOMATICO.

D. FILTROS DESINTONIZADOS O ANTIRRESONANTES

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

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

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

E. FILTROS ANTIRRESONANTES FIJOS

Están equipados con:

- Capacitores cilíndricos antiexplosivos contruidos con film de polipropileno total autorregenerable (MKP) y/o film de polipropileno mas papel metalizado (MPP) con sistema de protección por sobre presión y resistores de descarga incorporados.
- Reactores antirresonantes trifásicos contruidos con chapa de acero magnético de bajas pérdidas, secado e impregnados con resina al vacío.
- Contactores equipados con relevo térmico.
- Fusibles de alta capacidad de ruptura para protección contra cortocircuitos.

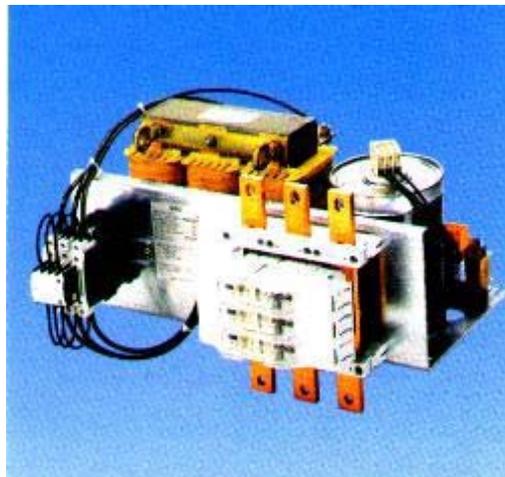




FIGURA VII.8 FILTRO ANTIRRESONANTE FIJO.

F. FILTROS ANTIRRESONANTES AUTOMÁTICOS

Están equipados con:

- Conjunto de capacitores cilíndricos antiexplosivos contruidos con film de polipropileno total autorregenerable (MKP) y/o film de polipropileno mas papel metalizado (MPP) con sistema de protección por sobre presión y resistores de descarga incorporados para cada uno de los pasos que integran el banco.
- Un reactor antirresonante trifásico por paso construido con chapa de acero magnético de bajas pérdidas, secado e impregnado con resina al vacío.
- Contactores para cada paso, equipados con relevo térmico.
- Fusibles de alta capacidad de ruptura para protección contra cortocircuitos en cada paso del equipo.
- Relévador controlador del factor de potencia microprocesado, con display indicador del $\cos \theta$ y otras magnitudes eléctricas, fácilmente programable desde el frente del equipo.



FIGURA VII.9 FILTRO ANTIRRESONANTE AUTOMÁTICO.

G. FILTROS DE RECHAZO.

El objetivo del filtro de rechazo es impedir la resonancia entre la impedancia inductiva que resulta de la línea y del transformador de alimentación y los condensadores para compensación del factor de potencia y evitar la sobrecarga de armónicos en la línea y en los propios condensadores. El filtro está compuesto de varias ramas L-C. El filtro completo puede formarse con tantas ramas como sean necesarias para compensar la energía reactiva de la instalación.

Los sistemas de transmisión y distribución están diseñados para trabajar con ondas de tensión e intensidad senoidales a frecuencia constante. Sin embargo, cuando se conectan a la red cargas no lineales como puentes de tiristores, convertidores y hornos de arco, se generan excesivas corrientes armónicas y esto da origen a distorsión armónica en tensión e intensidad. En sistemas afectados por armónicos no es posible la corrección del factor de potencia por medio de baterías de condensadores convencionales. Esto es debido a

que las corrientes armónicas sufren una amplificación en el circuito resonante paralelo formado por el condensador y la red exterior. Como resultado se produce una amplificación en la distorsión en tensión e intensidad (THD). Las baterías de condensadores con reactancias de rechazo de armónicos se emplean para la corrección del factor de potencia en sistemas con distorsión armónica.

Cada escalón de regulación está formado por un condensador con una reactancia de rechazo. Este conjunto forma un circuito serie resonante sintonizado a una frecuencia inferior a la del armónico más común: el 5^a armónico. La batería actúa también como filtro de absorción, eliminando parcialmente (10 a 30 %) las corrientes armónicas más bajas del sistema. Como en una batería convencional, los escalones se controlan por medio de un regulador de energía reactiva.

La frecuencia de sintonía mas utilizada es 189 Hz. ($p= 7\%$), otras frecuencias posibles son 130 y 204 Hz. Las reactancias para este tipo de filtros se especifican por el llamado factor de sobretensión, $p\%$, que da la relación entre la tensión de la reactancia y la del condensador y fija la frecuencia de resonancia del conjunto.

$$p\% = 100 \cdot \frac{U_L}{U_C}$$

Las principales ventajas de los filtros de rechazo sobre los filtros sintonizados son las siguientes:

- i. Su funcionamiento y carga es poco sensitivo a la variación de temperatura, la variación de la frecuencia, a la tolerancia de los materiales y a perdidas en los capacitores.
- ii. Esta provisto de una baja impedancia para los espectros de onda de las armónicas sin la necesidad de la subdivisión de circuitos en paralelo con el incremento en la interrupción y los problemas de mantenimiento.



- iii. El uso de filtros sintonizados pocas veces ofrece resonancia en paralelo entre el filtro y el sistema de admitancias en el orden de armónicas junto a un filtro sintonizado de baja frecuencia, o entre frecuencias en un filtro sintonizado. En estos casos el uso de uno o mas filtros de choque es una alternativa muy recomendable.

Las principales desventajas de los filtros de rechazo son:

- i. Para alcanzar un nivel similar en el funcionamiento del filtro, este necesita ser diseñado para niveles fundamentales de VA elevados, pensando en muchos casos, un buen diseño puede ser conocido con los limites requeridos para la corrección del factor de potencia.
- ii. Las perdidas en el resistor y en el inductor son generalmente altas.

Existen cuatro tipos de filtros de rechazo, los cuales se muestran a continuación: de primer orden, de segundo orden, de tercer orden y de tipo C.

- a. El filtro de primer orden no es normalmente utilizado, ya que requiere de un gran capacitor y además tiene excesivas pérdidas a la frecuencia fundamental.
- b. El de segundo orden cuenta con el mejor sistema de filtrado, pero cuenta con elevadas perdidas a la frecuencia fundamental comparado con los de tercer orden.
- c. La principal ventaja de este filtro sobre los de segundo orden es que cuenta con una sustancial reducción de pérdidas a la frecuencia fundamental, debido al incremento de la impedancia en la frecuencia causado por la presencia del capacitor C_2 . Además, el valor de C_2 es muy pequeño comparado con C_1 .
- d. El proceso de filtrado del recién introducido tipo C se ubica entre el de segundo y el de tercer orden. Su principal ventaja es una considerable reducción en las

perdidas a la frecuencia fundamental debido a que el circuito serie entre C_2 y L esta sintonizado a la frecuencia fundamental. Este filtro es más susceptible a las variaciones en la frecuencia fundamental y a los valores derivados de los componentes.

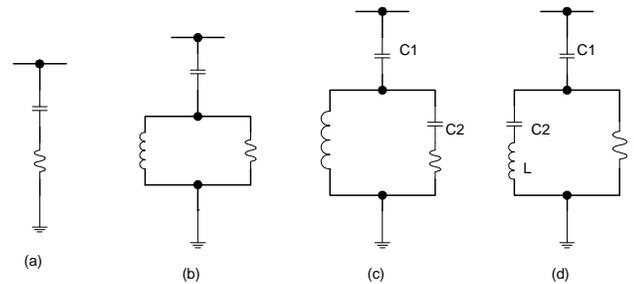


FIG FILTROS DE RECHAZO: A) PRIMER ORDEN; B) SEGUNDO ORDEN; C) TERCER ORDEN Y D) TIPO C.

7.4 BANCOS DE CAPACITORES.

Los bancos de capacitores son agrupamientos de unidades montadas sobre bastidores metálicos, que se instalan en un punto de la red de MT (en subestaciones o en alimentadores de distribución) con el objeto de suministrar potencia reactiva y regular la tensión del sistema. Cuando en una instalación eléctrica se tiene un bajo factor de potencia en presencia de cargas no lineales, resulta siempre muy arriesgado tratar de corregirlo sin antes hacer un análisis del sistema eléctrico. La forma menos costosa de obtener un valor cercano a la unidad es la aplicación de capacitores de corrección del factor de potencia. Los capacitores proporcionan una fuente estática de corriente reactiva en adelanto y pueden instalarse cerca de la carga. Con esta medida, puede obtenerse la eficiencia máxima reduciendo las necesidades de corriente en todo el sistema.

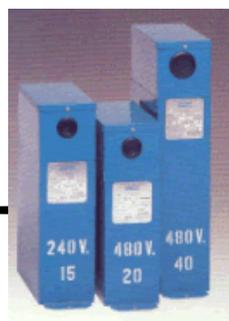




FIGURA VII.11 CAPACITOR DE POTENCIA.

Al corregir un bajo factor de potencia, los capacitores reducen la demanda de kVA debido a que liberan de carga a los transformadores, tableros de fuerza y otros equipos. La demanda reducida de kVA da como resultado que los recibos de la compañía suministradora sean libres de multa, la operación de equipo sea más fría y la vida útil del mismo sea más prolongada. Estas ventajas del empleo de bancos de capacitores se enlistan a continuación:

- Disminuyen pérdidas por calentamiento en cables, transformadores y motores.
- Liberan capacidad instalada en transformadores y cables.
- Mejoran la regulación de voltaje en toda la planta.
- Evitan desgaste prematuro del equipo por exceso de calentamiento causado por el bajo voltaje
- Disminuyen el consumo total de energía incluyendo el de demanda máxima e instalados correctamente, dan ahorros del 3 al 6% del consumo total.
- Reducen el monto del recibo al eliminar penalizaciones por bajo factor de potencia y dan bonificaciones que pueden llegar hasta el 2.5% del total del pago.

Una forma de calcular el banco de capacitores adecuado para corregir el factor de potencia, es utilizando la tabla VII.1, donde se necesita conocer la demanda en kw, para multiplicarla por el factor que resulte en el cruce del fp conocido con el deseado.

Factor de Potencia Actual	Factor de potencia Deseado				
	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96
0.70	0.54	0.59	0.66	0.69	0.73
0.75	0.40	0.46	0.52	0.55	0.59
0.80	0.27	0.32	0.39	0.42	0.46
0.85	0.14	0.19	0.26	0.29	0.33
0.86	0.11	0.17	0.23	0.26	0.30
0.87	0.08	0.14	0.20	0.24	0.28
0.88	0.06	0.11	0.18	0.21	0.25
0.89	0.03	0.09	0.15	0.18	0.22
0.90	0.00	0.06	0.12	0.16	0.19
0.92		0.00	0.06	0.10	0.13
0.94			0.00	0.03	0.07
0.96					0.00
0.98					
1.00					

TABLA RELACIÓN ENTRE FACTOR DE POTENCIA ACTUAL Y FACTOR DE POTENCIA DESEADO.

A. INSTALACIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES.

De particular importancia, no obstante, es la localización de los bancos de capacitores. Estos se conectan generalmente en derivación, transversalmente a las líneas de alimentación y funcionan continuamente o en conexión y desconexión durante los ciclos de carga.

Todos los capacitores son una trayectoria de baja impedancia para las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales como los drives de frecuencia variable, arrancadores suaves de motores, soldadoras, computadoras, PLC's, equipo robótico y otros equipos electrónicos. Estas corrientes armónicas pueden ser absorbidas por el capacitor causando que este se sobrecaliente, acortando su vida útil y posiblemente hasta evitando su correcta operación. Además, el circuito resonante formado por los capacitores acoplados en paralelo con la inductancia del sistema (transformadores y



motores) puede amplificar las corrientes y voltajes armónicas, lo cual puede causar la incorrecta operación del sistema eléctrico. Cuando están conectados eléctricamente en paralelo con una reactancia inductiva, el banco de capacitores produce una resonancia en paralelo, condición que tiende a amplificar los voltajes armónicos provocando una inyección de corrientes armónicas. Cuando se conecta eléctricamente en serie con la reactancia inductiva, el banco de capacitores produce una resonancia en serie, condición que tiende a amplificar las corrientes armónicas y provocar una distorsión de voltaje. En ambos casos, los niveles de armónicas exceden los valores que se esperaba podían ser producidos.

En la instalación de los capacitores, se consideran dos puntos claves: el punto primario o de alto voltaje y el punto secundario o de bajo voltaje. De los dos tipos el primario es el más común.

Los capacitores secundarios o de bajo voltaje, se fabrican por lo general en capacidades de voltaje de 20 hasta 600V para un intervalo de 2.5 A 100kvar en sistemas trifásicos. Cuando los capacitores de bajo voltaje se conectan a las líneas del secundario, se sitúan físicamente cerca de las cargas reactivas en retraso. Esto reduce las necesidades de KVA de las líneas inmediatas y los transformadores, a la inversa, permite tener una mayor carga en kilowatts con los mismos tamaños de líneas y transformadores.

Los capacitores primarios se conectan a las líneas de alto voltaje y se fabrican por lo general, en capacidades de voltaje de 2.4 a 25kV para un intervalo de 50 a 400kvar. Se pueden lograr mayores valores de voltaje y kVA al conectar las unidades capacitores en arreglos de serie y paralelo. El costo de los capacitores de alto voltaje es menor por kvar que el de los capacitores de bajo voltaje por razón de la diferencia básica en materiales dieléctricos que permite que los capacitores de alto voltaje puedan operar con mayor eficiencia. Por otra parte, los capacitores actuales de alto voltaje trabajan con pérdida en potencia activa, esto es, watts por kvar, mas baja que los capacitores de bajo voltaje. Por



ejemplo los capacitores que utilizan dieléctrico completo de película funcionan con pérdidas menores que 0.1W por kvar. Los capacitores que utilizan dieléctrico de polipropileno metalizado pueden experimentar perdidas de casi 0.5 W por kvar.

B. CONEXIONES DE LOS CAPACITORES.

La figura VII.12 muestra cuatro de las conexiones mas comunes de capacitares de potencia: trifásico, Y aterrizada; trifásico, Y no aterrizada; trifásico en delta y monofásico. Las conexiones en Y aterrizada o no aterrizada se hacen por lo general, en circuitos primarios, mientras que las conexiones en delta y en monofásico se aplican en los circuitos de bajo voltaje.

La mayoría de los capacitares de potencia que se instalan en alimentadores primarios de distribución, se conectan en Y aterrizada. Son varias las ventajas y beneficios que se derivan de este tipo de conexión. Con la conexión en Y aterrizada, los tanques y armazones de los interruptores están al potencial de tierra. Esto da lugar a mayor seguridad al personal. Las conexiones en Y aterrizada producen una operación mas rápida de los fusibles en serie en caso de falla de un capacitor. Los capacitares aterrizados pueden dejar pasar en desvío a tierra algunas fluctuaciones de la línea, y por tanto muestran un cierto grado de autoprotección contra los voltajes transitorios y las fluctuaciones causadas por rayo. La conexión Y aterrizada proporciona también una trayectoria de baja impedancia para las armónicas.

Si se conectan eléctricamente los capacitares en Y no aterrizada, la máxima corriente de falla queda limitada a tres veces la corriente de la línea. Si se tiene una corriente de falla demasiado grande, superior a 5000A, debe considerarse el uso de fusibles limitadores de corriente.

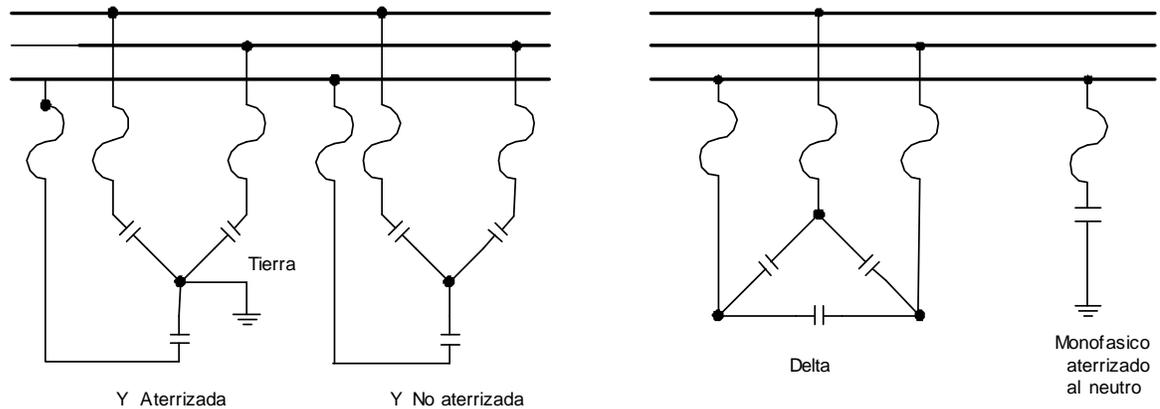


FIGURA VII.12 CONEXIONES COMUNES DE LOS BANCOS DE CAPACITORES.

C. TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES.

Estos bancos pueden ser fijos o automáticos y ejecutarse para uso interior o intemperie con el grado de protección que la instalación requiera.

BANCOS FIJOS.

Generalmente disponen de protección externa por medio de fusibles de alta capacidad de ruptura. Pueden emplearse para compensación individual de grandes motores de MT, o compensación fija de barras empleando fusibles con seccionamiento.





FIG BANCO FIJO DE CAPACITORES.

BANCOS AUTOMÁTICOS.

Los bancos de capacitores automáticos están integrados con componentes de alta calidad, los cuales ofrecen una amplia gama de capacidades y pasos, para la adecuada corrección del factor de potencia con la variación de la carga instalada, evitando así el envejecimiento paulatino de los aislamientos, y pudiendo ocasionar fallas de grandes consecuencias. Los bancos de capacitores automáticos cuentan con un regulador de energía reactiva, al que solamente es necesario conectar una de las corrientes y las tres tensiones trifásicas. Cuando se presentan ambientes ricos en armónicas, se debe considerar un banco de capacitores automático y antirresonante en lugar de uno convencional. Los pasos de estos bancos están compuestos por los siguientes elementos:

- Fusibles de alta capacidad de ruptura, separados o incorporados en el propio equipo de maniobra.
- Contactores de vacío.
- Reactores de inserción (para más de un paso de compensación).
- Capacitores o banco de capacitores de MT

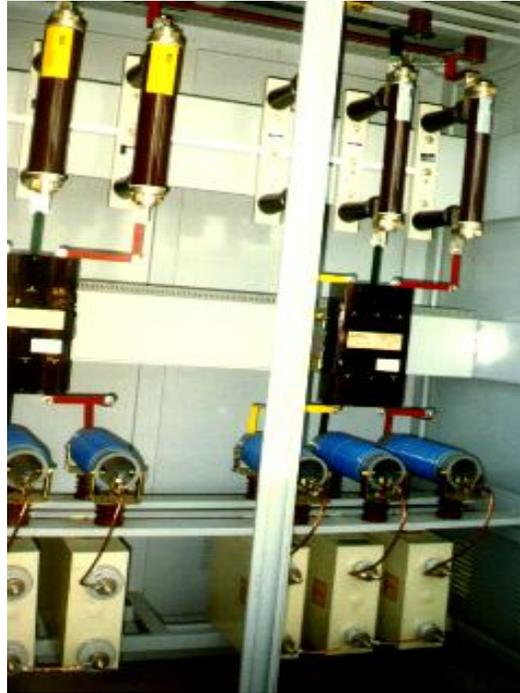


FIG. BANCO AUTOMATICO DE CAPACITORES .

Estas construcciones tienen una gran multiplicidad de alternativas, que se emplean para cada aplicación especial, por ejemplo podemos mencionar solo algunas como ejemplo:

Temporización de conexión del banco: Retarda la entrada del banco una vez finalizada la actuación del arrancador sea convencional o del tipo "soft starter", mediante una señal de un contacto de mando de éste. Aplicable a todo tipo de industria en la compensación individual de motores.

Temporización de reconexión: Impide la entrada del banco si no ha transcurrido el tiempo suficiente como para que la tensión en borne de los capacitores se reduzca a menos del 10% del valor nominal.

D. DISEÑO.

Los capacitores han sido especialmente diseñados para la corrección del factor de potencia usando siempre las materias primas de la más alta calidad de acuerdo a la norma EN 60831-1-2. Las bobinas son introducidas en un bote de aluminio y encapsuladas con resina de poliuretano no toxica y ecológica, con gran capacidad de dispersión de calor (figura 2). Los capacitores fabricados con papel de polipropileno autoregenerable y de bajas perdidas, son los que nos ofrecen mayor calidad y prestaciones.

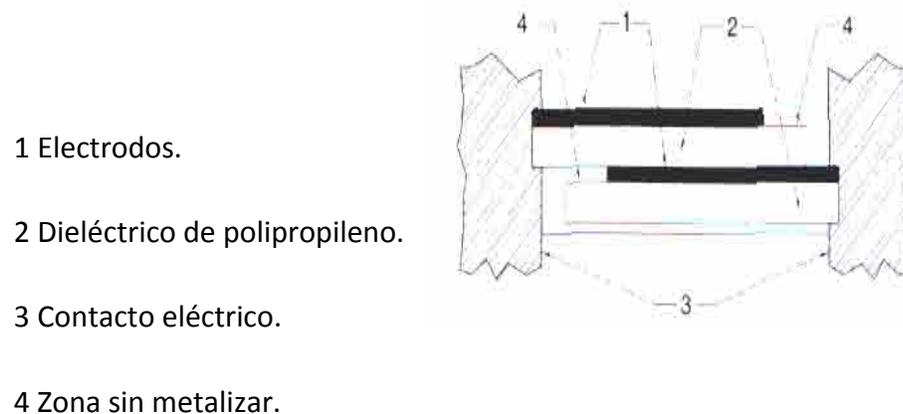


FIG. COMPOSICIÓN DE UN CAPACITOR.

Debido a condiciones eléctricas y térmicas extremas, se pueden producir perforaciones en el papel, por lo que la zona metalizada próxima a la perforación se regenera, aislando la zona perforada-después de la autoregeneracion, el condensador puede seguir trabajando en condiciones normales.

Los capacitores cuentan con un sistema antiexplosión por sobrepresión (figura VII.16) que permite desconectar el condensador en caso de ser utilizado en condiciones eléctricas y térmicas extremas inadmisibles. Dicho sistema actúa expandiendo la tapa de las terminales interrumpiendo la conexión del terminal con el elemento capacitivo.

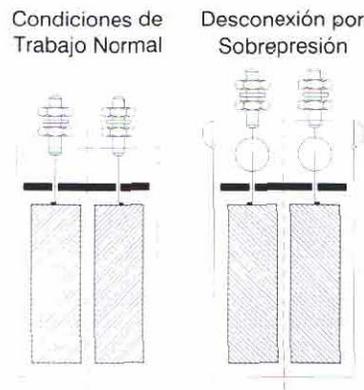


FIG DESCONEXIÓN POR SOBREPRESIÓN DE UN CAPACITOR.

El diseño de los bancos de los bancos debe atender a los siguientes criterios:

- Lograr la potencia reactiva deseada en un punto del sistema, dividiendo este valor en una determinada cantidad de capacitores monofásicos de una potencia unitaria normalizada.
- Conectar las unidades en una conexión definida generalmente en estrella o doble estrella con neutro flotante. De este modo normalmente los capacitores tienen una tensión nominal igual a la tensión de fase del sistema.
- Efectuar la conexión de modo tal que permita el uso de un esquema de protección seguro, sencillo y económico.
- Si fuera conveniente, dividir la potencia total del banco en escalones, de modo de insertarlos progresivamente en función de las necesidades de potencia reactiva del sistema en cada momento.
- Instalar el banco en un sitio que satisfaga condiciones de seguridad, comodidad, facilidad para su operación, control y mantenimiento, y que esté protegido contra intervenciones no autorizadas o vandalismo.



- Además de las unidades capacitivas (con o sin fusibles internos), los bancos pueden incluir elementos de protección, maniobra y control tales como seccionadores fusibles, llaves de maniobra en vacío o en aceite, sistemas de protección por desequilibrio, controladores automáticos, reactancias de inserción, etc.

7.5 REACTORES DE LÍNEA.

Núcleo de hierro de 240 hasta 13800V o de aire hasta 115KV. Compactos de bajas pérdidas para: protección de inversores, rechazo de corrientes armónicas, filtros de absorción de corrientes armónicas y limitadores de corriente.

Los reactores de línea ayudan al equipo a trabajar correctamente mediante la absorción de los distintos tipos de disturbios que se presentan en las líneas de alimentación que en otras circunstancias dañan a los equipos sensibles a los disturbios como los inversores, los variadores, los PLC'S, etc. Estos son la tecnología más moderna para la solución de problemas en los inversores y los variadores. Los reactores de línea son compensadores de armónicas, además de asegurar un óptimo desempeño en la presencia de armónicas. Son muy efectivos en la reducción de armónicas producidas por las cargas no lineales. El empleo de los reactores de línea para compensar la presencia de armónicas en cualquiera de los casos, se pueden colocar ya sea a la entrada o a la salida de la red. Las principales ventajas del empleo de los reactores de línea son las siguientes:

- Proteger a los motores de los efectos de las cargas grandes.
- Reducir la salida de voltaje.
- Aumentar la vida de los semiconductores.
- Reducir la distorsión armónica.



- Reducir los picos de corriente.
- Reducir la temperatura de los motores.
- Reducir el ruido audible del motor
- Mejorar el factor de potencia
- Los reactores de línea trifásicos incrementan la confiabilidad de los sistemas para motores de velocidad variable.
- Protegen al equipo electrónico contra transitorios de tensión y al mismo tiempo reducen la entrada de armónicas.
- Utilícelos a la entrada de sus sistemas de frecuencia variable para proteger a los motores contra los efectos negativos que se producen por transitorios de voltaje dv/dt causados por líneas de alimentación largas.
- Reducen la intensidad de corriente que demandan los sistemas para motores de velocidad variable a valores inferiores que los valores de placa de corriente a plena carga.
- Aunque los valores de corriente fundamental permanecen sin cambio, las corrientes armónicas se reducen significativamente, con lo cual se obtiene una disminución del valor verdadero de la raíz cuadrática media.

7.6 TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO.

Un transformador es un dispositivo utilizado para modificar voltajes o corrientes, ya sea para aumentarlos o para disminuirlos, generalmente los transformadores son utilizados para disminuir voltajes. Los transformadores de aislamiento son equipos recomendados para aislar eléctricamente y reducir los disturbios eléctricos hacia las cargas sensibles.

Los transformadores de aislamiento con protección electrostática se utilizan para proteger el equipo eléctrico sensible a señales indeseables de alta frecuencia, comúnmente generados por los rayos, las ondas inducidas por el encendido de interruptores, los motores, los variadores de velocidad, que inducen ruido en las líneas. El escudo electroestático consiste en una hoja de metal colocada entre los devanados primario y secundario, para proveer una atenuación entre 30 y 70 db de ruido de banda ancha, de línea a tierra (modo común).



FIGU. TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO.

Las aplicaciones típicas de los transformadores de aislamiento con protección de pantalla electrostática incluyen:

- Supresión de oscilaciones momentáneas y ruido que viaja de la fuente de las cargas sensibles.
- Supresión de oscilaciones momentáneas y ruido en el punto donde se originan, previendo su inducción de la fuente a los alimentadores.
- Proveer aislamiento de un circuito a otro.



En nuestros días, la instalación de componentes y sistemas electrónicos en la industria crece aceleradamente. Los circuitos electrónicos que operan con bajo voltaje en corriente directa son muy sensibles. Para todas las aplicaciones “sensibles” la pantalla electrostática se encarga de reducir y controlar la capacitancia, los ruidos, transitorios y armónicas en línea de voltaje, creados por switcheo en arranque y paro de motores, capacitores ó circuitos con “SCR’s”

Estos bancos cubren con los estándares para ser utilizados en motores de corriente alterna con frecuencia variable o con motores de corriente directa con inversor. Las principales características de los transformadores de aislamiento son:

- Rango completo en kVA’s para cubrir todos los sistemas estándar de “Drives”
- Pantalla electrostática que reduce el ruido y picos de armónicas presentadas en la línea permitiendo un suministro limpio de poder.
- Núcleos de acero eléctrico de alta calidad que incrementan la eficiencia y bajan los costos de operación.
- Aislamiento clase 220°C. Prolonga la vida útil de la unidad
- Internamente balanceado , protegiendo la unidad en esfuerzos de corto circuito
- Baja impedancia para mejor regulación de voltaje.
- Flujo magnético de baja densidad que minimiza la saturación del núcleo causado por los circuitos electrónicos
- Gabinete metálico de gran durabilidad en aplicaciones industriales color gris ANSI-61
- Satisfacen y exceden los requerimientos de Norma NOM-I, ANSI y NEMA



7.7 ELECCIÓN DEL EQUIPO MÁS ADECUADO.

El primer aspecto a tener en cuenta, es cual es objetivo que se pretende mediante la incorporación de un equipo de corrección del factor de potencia y/o filtrado de armónicas, teniendo en cuenta las características del tipo de carga a compensar, habiendo efectuado previamente las tareas de medición de parámetros eléctricos y armónicas tanto de tensión como de corriente. Para mejorar el factor de potencia, en instalaciones donde existen cargas no lineales en un porcentaje inferior al 20% del total de cargas presentes, se pueden utilizar capacitores para uso interior, o para intemperie de servicios liviano y pesado y bancos de capacitores del tipo convencional, tanto fijos como automáticos.

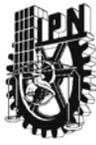
En el caso que se supere el 20% de cargas no lineales, pero inferior al 50%, generalmente los filtros antirresonantes cumplen satisfactoriamente su función de compensadores del factor de potencia y al mismo tiempo reducen a niveles aceptables la distorsión armónica total THD, quedando a cargo del proyectista la evaluación del: grado de desintonía adecuado, la potencia del equipo de filtrado fijo, y la potencia del equipo de filtrado automático y el dimensionamiento de los escalones y pasos con que dispondrá.

Cuando las cargas no lineales superan el 50%, en la mayor parte de los casos se recurre a filtros sintonizados en los cuales el proyectista deberá efectuar un dimensionamiento "a medida", teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Ordenes de armónicas, contando el filtro con tantas ramas de filtrado como armónicas se quiera filtrar.
- Valor máximo de corrientes armónicas a filtrar, sin importar el orden de estas.



- Valor de THD requerido, el cual no deberá superarse, recurriendo a un análisis mediante simulación de cargas, teniendo en cuenta las mediciones efectuadas, que en este caso serán objeto de un tratamiento mas exhaustivo.



CONCLUSIONES

LA CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA DEPENDE EN AL MENOS UNA DOCENA DE CARACTERISTICAS CLAVE DE LAS FUENTES DE ELECTRICIDAD, INCLUYENDO LA FRECUENCIA, LA TENSION, PERO LAS CARACTERISTICAS MAS CRITICAS SON EL CONTENIDO ARMONICO Y LOS TRANSITORIOS POR SOBRETENSION

HAY UN NUMERO DE SOLUCIONES QUE, INDIVIDUALES O COMBINADAS, PUEDEN REDUCIR, SIGNIFICATIVAMENTE EL RIESGO DE PROBLEMAS CON ARMONICAS Y OTRAS PERTURBACIONES QUE DEGRADAN LA CALIDAD DE LA ENERGIA COMO SON:

- LOS SUPRESORES DE IMPULSO DE TENSION
- FUENTES ININTERRUMPIBLES DE ENERGIA (UPS)
- FILTROS PASIVOS Y ACTIVOS

TAMBIEN SE PUEDEN DISEÑAR Y CONSTRUIR FUENTES ELECTRONICAS DE ALIMENTACION QUE EMITAN UN MUY BAJO NIVEL DE ARMONICAS. A LARGO PLAZO ESTAS FUENTES DE ALIMENTACION PARA EQUIPO ELECTRONICO CON BAJO NIVEL ARMONICO ESTARAN AMPLIAMENTE DISPONIBLES Y SERA DE USO COMUN, PERO TODAVIA EL COSTO ES UNA BARRERA EXTRA PARA UN EQUIPO QUE GENERE UN BAJO NIVEL DE TENSION Y DE CORRIENTE ARMONICA

LO QUE SI ES MUY CLARO ES QUE CUANDO LAS NORMAS SE CONVIERTAN EN OBLIGATORIAS EXISTIRAN MENOS PROBLEMAS CON LA CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA Y POR TANTO SE CONTARA CON UNA SEÑAL LIMPIA, EXTENDIENDOSE ASI EL USO DE EQUIPO ELECTRONICO CON BAJOS NIVELES DE ARMONICOS, LO CUAL OBVIAMENTE BENEFICIA A TODOS



FIGURAS

Figura No.	1	IMPULSOS Y DIMINUCIONES DE VOLTAJE	Pág.....	7
Figura No.	2	CURVA ESTANDAR DE CBEMA	Pág....	15
Figura No.	3	DATOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA EN FASE A	Pág....	16
Figura No.	4	AFECTACIONES AL SISTEMA	Pág....	21
Figura No.	5	AFECTACIONES AL SISTEMA	Pág....	22
Figura No.	6	CARGAS ALINEALES SON CONTAMINANTES DE LA RED	Pág....	23
Figura No.	7	CTOS TIPICOS DE DISTRIBUCION	Pág....	31
Figura No.	8	SOBREVOLTAJE REGISTRADO EN LA SEÑAL RMS DE VOLTAJE	Pág....	33
Figura No.	9	IMPULSO TRANSITORIO EN UNA SEÑAL DE VOLTAJE	Pág.....	35
Figura No.	10	DISTURBIOS OSCILATORIOS	Pág....	36
Figura No.	11	EL COMPORTAMIENTO	Pág....	37
Figura No.	12	DEFORMACION DE LAS SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIETE	Pág....	38
Figura No.	13	SEÑAL DE VOLAJE	Pág....	39
Figura No.	14	TRIANGULO DE POTENCIA	Pág....	40
Figura No.	15	EJEMPLO DE UNA SOBRETENSION	Pág....	46
Figura No.	16	EJEMPLO DE UNA SOBRETENSION ADECUADA	Pág....	47
Figura No.	17	AUMENTO DE POTENCIAL EN REFENCIA A TIERRA	Pág....	47
Figura No.	18	TRANSITORIO EN UNA ONDA SENOIDAL	Pág....	49
Figura No.	19	SAG REGISTRADO EN UNA SEÑAL DE VOLTAJE	Pág.....	49
Figura No.	20	SWELL REGISTRADO EN UNA SEÑAL DE VOLTAJE	Pág....	50
Figura No.	21	ONDA DE VOLTAJE CON NOTCHES	Pág....	50
Figura No.	22	FORMA DE ONDA DE V Y I DE UN HORNO ELECTRICO	Pág....	52
Figura No.	23	MODELIZACION DE UNA INSTALACION TIPO	Pág....	70
Figura No.	24	ESQUEMA EQUIVALENTE DE LA INSTALACION	Pág....	70
Figura No.	25	RESONANCIA PARALELA Y FACTOR DE AMPLIFICACION	Pág....	71
Figura No.	26	RESPUESTA DEL NODO 4 Y AL FINAL DE LA LINEA	Pág....	81
Figura No.	27	GRAFICA DE VOLTAJE Y CONTENIDO ARMONICO	Pág.....	82
Figura No.	28	EL FACTOR DE POTENCIA DE UN COSUMIDOR	Pág....	85
Figura No.	29	DIAGRAMA DE CORRIENTE NOMINAL	Pág....	86
Figura No.	30	COMBIANACION DE LOS 3 TIPOS DE CARGA	Pág....	88
Figura No.	31	INSTALACION EN LOS BANCOS DE CAPACITORES	Pág....	90
Figura No.	32	PERDIDAS EN CONDUCTORES ELECTRICOS	Pág....	95
Figura No.	33	LA IMPEDANCIA DEL SUPRESOR TIENDE A CERO	Pág....	124
Figura No.	34	NIVELES DE EXPOSICION DE LOS SUPRESORES	Pág....	125
Figura No.	35	DIAGRAMA A BLOQUES DE LA CONFIGURACION	Pág....	128
Figura No.	36	DIAGRAMA DE UN FILTRO ACTIVO	Pág....	139
Figura No.	37	DISEÑO TIPICO DE UN FILTRO PASIVO	Pág.....	139
Figura No.	38	TIPO DE TRANSFORMACION	Pág....	141



Figura No.	39	REPRESENTACION DE UN FILTRO	Pág....	143
Figura No.	40	FILTRO ANTIRRESONANTE FIJO	Pág....	144
Figura No.	41	FILTRO ANTIRRESONANTE AUTOMATICO	Pág....	146
Figura No.	42	FILTROS DE RECHAZO	Pág....	149
Figura No.	43	CAPACITOR DE POTENCIA	Pág....	149
Figura No.	44	CONEXIONES COMUNES	Pág....	154
Figura No.	45	BANCO FIJO DE CAPACITORES	Pág....	154
Figura No.	46	BANCO AUTOMATICO DE CAPACITORES	Pág....	156
Figura No.	47	COMPOSICION DE UN CAPACITOR	Pág.....	157
Figura No.	48	DESCONEXION POR SOBREPRESION DE UN CAPACITOR	Pág....	158
Figura No.	49	TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO	Pág....	161

V. Bibliografía

- ⤴ Electrical System Design & Specification handbook for industrial facilities.
Steven J. Marrano, CEM and Craig Di Lovie
The Fairmont Press.
- ⤴ Elemens of Power System Analysis.
Stevenson 4ª edición.
Mc graw Hill.
- ⤴ Electric Power Systems.
Syed A. Nasar
F.C. Trutt
CRC Press
- ⤴ Power capacitor Handbook
T. Longland
T.W. Hunt
W.A. Brecknell
General editor C. A. Worth
- ⤴ Power Quality
S.M. Halpin
Mississippi State University
- ⤴ Power System Harmonic
J. Arrillaga
D.A. Bradley
P.S. Bodget
By John Wiley & sons
- ⤴ Fundamentos de instalaciones electricas de mediana y alta tension
Gilberto Enriquez Harper
Limusa
- ⤴ ANSI/IEEE 18.
- ⤴ NEMA CPI-1988.
- ⤴ NOM-001-SEDE-1999 Utilización.
- ⤴ Manuales de Fabricante Tecnica Salgar.
- ⤴ Manuales de Fabricante Schneider-Electric
- ⤴ www.secovi.com
- ⤴ www.inelap.com.mx
- ⤴ www.fervisa.com
- ⤴ Tesis: El capacitor y su aplicacion en sistemas electricos.
Jorge Garcia Reyes