

63
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
ELECTRICA-ELECTRONICA

p r e s e n t a n

MERLOS DELGADO FRANCISCO
REYES CORDERO SERGIO

Asesor de Tesis: Ing. Guillermo López Monroy



México, D. F.

1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

279908



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Tener voluntad es:

Saber tomar decisiones

Actuar sin vacilación

Ser obstinado en el bien

Vencer los obstáculos

Nunca desanimarse.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios:

Por darme esta gran oportunidad y compartirla con mis seres más queridos.

- A mis padres Lucía y Eustacio:

Quienes me han dado su apoyo incondicional y han estado siempre conmigo en todas mis metas.

- A mis hermanos José Fidel y Octavio:

A mis dos grandes amigos, con los que he compartido grandes momentos.

- A los ingenieros:

Ing. Erick Estrada H.
Ing. Vicente Rodríguez V.

- A:

Marco Tovar R.
Manuel Ávila S.

Por su gran amistad.

- A mis familiares y demás amigos.

A todos gracias.

FRANCISCO MERLOS DELGADO.

A mis Padres:

Este es el fruto de entrega, dedicación, esfuerzo, tenacidad y estudio, esto no habría sido realidad sin su apoyo, cariño y comprensión.

Con todo el respeto y admiración que se merecen, les doy las gracias y les estaré eternamente agradecido.

A la memoria de mis amigos, que no culminaron sus estudios por causas del destino, entre ellos un gran compañero y amigo... Said Montes †.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería:

Gracias por su apoyo y motivación para llegar a ser un profesional, un " Goya ...! " para ustedes.

SERGIO REYES CORDERO.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
-------------------	---

CAPITULO I.

Sistemas de Distribución.

1. Antecedentes.....	13
2. Características generales de los sistemas de energía eléctrica.....	15
3. Sistemas de distribución.....	15
A. Definición.....	15
B. Clasificación.....	16
a. Sistemas de distribución industriales.....	16
b. Sistemas de distribución comerciales.....	16
c. Parques industriales.....	17
d. Distribución urbana y residencial.....	17
e. Distribución rural.....	17
C. Principales elementos.....	17
a. Líneas primarias.....	18
b. Transformadores.....	18
c. Líneas secundarias.....	18
d. Acometidas y equipos.....	19
4. Importancia de la calidad de la energía.....	21
A. Continuidad en el servicio.....	21
B. Regulación de voltaje.....	22
C. Control de frecuencia.....	22
5. Perturbaciones en la energía eléctrica en baja y mediana tensión.....	25

CAPÍTULO II

Sobretensiones

1. Antecedentes.....	31
2. Concepto de sobretensión.....	32
3. Tipos de sobretensiones.....	33
A. Sobretensiones de origen externo.....	33
a. Antecedentes.....	34
b. Avances.....	39
c. Recomendaciones.....	42
B. Sobretensiones de origen interno.....	44

4. Protección contra sobretensiones.....	46
5. Protección a líneas aéreas.....	49
A. Cuernos de arco.....	49
B. Hilo de guarda.....	50
C. Apartarrayos.....	52

CAPITULO III

Calidad de la energía.

1. Antecedentes.....	55
2. Perspectiva histórica.....	56
3. Conceptos de la calidad de la energía.....	60
A. Calidad del voltaje.....	61
B. La importancia de la calidad de la energía en equipo eléctrico y electrónico.....	62
C. Disturbios más comunes en sistemas eléctricos de distribución.....	63
4. La calidad de la energía y el efecto de la conexión a tierra.....	67
A. Conexión a tierra.....	67
B. Conexión a tierra efectiva.....	68
5. Armónicas.....	69
A. Fuentes de armónicas.....	70
B. Efectos de las armónicas en los equipos eléctricos.....	71
6. Ruido eléctrico.....	72
A. Efecto del ruido eléctrico en redes y equipos eléctricos y electrónicos.....	73
7. Dispositivos comúnmente utilizados para el mejoramiento de la calidad de la energía.....	73
A. Transformadores de aislamiento.....	73
B. Filtros contra ruido.....	75
C. Filtros de corrientes armónicas.....	76
D. Supresores de onda.....	77
E. Reguladores de voltaje.....	77
F. Cambiadores de taps.....	78
G. Buck-Boost.....	79
H. Transformadores de voltaje constante.....	80
I. Motor-generator.....	81
J. UPS.....	81

CAPITULO IV

Apartarrayos.

1. Antecedentes.....	83
2. Conceptos generales.....	84
3. Apartarrayos autovalvulares.....	85
A. Funcionamiento de los apartarrayos autovalvulares.....	85
B. Clasificación.....	92
C. Selección.....	93
4. Apartarrayos de óxido de zinc.....	94

CAPITULO V

Sistemas de Pararrayos.

1. Antecedentes.....	103
2. Las descargas atmosféricas.....	104
3. Dispositivos comúnmente utilizados en la protección de descargas atmosféricas.....	106
4. Especificaciones sobre materiales.....	109
A. Terminales aéreas.....	110
a. Punta tipo Franklin.....	110
b. Terminales aéreas ionizadas.....	111
B. Jaula de Faraday.....	112
C. Elementos en la construcción de sistemas de pararrayos.....	112
a. Conductores.....	112
b. Conectores.....	113
c. Abrazaderas.....	114
5. Instalación del sistema de pararrayos.....	114
A. Zonas de protección.....	114
6. Especificaciones sobre instalaciones.....	116
A. Recursos humanos.....	116
B. Instalación.....	117
a. Cable.....	117
b. Puntas pararrayo.....	118
c. Conductores de bajada.....	120
7. Mantenimiento.....	121

CAPÍTULO VI

Sistemas de tierra.

1. Antecedentes.....	129
2. Naturaleza del terreno.....	130
A. El suelo como conductor de la electricidad.....	131
B. Resistividad del suelo.....	131
C. Tipos de suelo.....	132
a. Roca.....	132
b. Tepetate.....	133
c. Arena.....	133
d. Relleno.....	133
D. Temperatura y humedad.....	134
E. Resistencia a tierra.....	134
F. Medición de resistencia a tierra.....	134
3. Importancia de los sistemas de tierra.....	136
A. Constitución de una instalación de tierra.....	136
B. Efectos sobre el cuerpo humano.....	136
C. Potenciales peligrosos.....	136
a. Toque.....	137
b. Paso.....	138
c. Transferido.....	138
4. Electrodo.....	138
A. Definición.....	138
B. Influencia entre electrodos.....	139
C. Electrodo múltiple.....	140
D. Electrodo horizontal.....	141
E. Electrodo profundo.....	142
F. Electrodo químico.....	142
5. Tipos de pozos.....	144
6. Importancia de la unión neutro-tierra.....	145
7. Diseño de sistemas de tierra en baja tensión.....	145
8. Diseño de sistemas de tierra en mediana tensión.....	148
Conclusiones.....	158
Bibliografía.....	161

Introducción.

Las líneas eléctricas sirven para la transferencia de ésta y, permiten el transporte rápido y económico, en grandes cantidades y sobre largas distancias. En la actualidad es de gran importancia y ha servido al hombre para su progreso y desarrollo.

Como elementos que enlazan productores y usuarios, cualquier interrupción en el suministro de ésta energía puede causar grandes pérdidas económicas a los consumidores.

Además, se presenta un problema de estabilidad cuando se trata de redes de alta tensión, ya que en cuanto mayor es el número de líneas en servicio (acopladas en paralelo), en caso de falla resulta menor la probabilidad de que las líneas o vías de la red queden fuera de servicio.

El objeto primordial de la explotación de las redes eléctricas en los sistemas de distribución es asegurar la energía a los consumidores, en todo tiempo y sin interrupción. Cualquier falla que afecte a las líneas aéreas así como a las de tipo subterráneo, perturba las exigencias normales del servicio y, por tanto, debe evitarse o, al menos, eliminarse tan rápidamente como sea posible.

Existen diversas causas que en ocasiones llegan a trastornar por así decirlo, el servicio en las redes de los sistemas de distribución las cuales son muy variadas tal es el caso de daño en los aisladores de los conductores, así como las influencias exteriores; tales como descargas atmosféricas, sobretensiones, corrosión de los cables que atraviesan suelos de naturaleza agresiva (es decir, que contienen ácidos o sales ácidas), etc.

Otras causas también pueden ser, aisladores que se encuentran deteriorados en las regiones donde abunda la humedad, regiones brumosas o costeras, destrucciones mecánicas de las líneas aéreas por la caída de árboles, o de los

cables subterráneos, por trabajos en la superficie por donde pasan estos, también las sobrecargas eléctricas, especialmente en cables subterráneos, otras causas también son: la ruptura de un conductor debido a factores humanos o naturales, otros pueden ser la apertura de interruptores o seccionadores bajo carga, tiempo demasiado largo de detección de la falla a cargo de los relevadores de protección, desconexión de líneas con demasiada carga.

Estas son algunas causas que pueden afectar a un sistema de distribución en sus distintas redes que lo conforman, estas causas indican la importancia que debe darse a una protección eficaz de las líneas y redes eléctricas.

La consecuencia directa de una puesta a tierra es un desplazamiento de la tensión que puede afectar a la tensión de fase. Frecuentemente, el aumento de la tensión respecto a tierra de las 2 fases en buenas condiciones, provoca una puesta a tierra de estas fases.

Si la puesta a tierra está originada por la rotura de una línea aérea, donde el conductor roto toca al suelo, pueden producirse peligrosos gradientes de tensión.

Algunos de los medios que pueden evitar las perturbaciones son, por ejemplo: aislantes y distancias de aislamiento apropiadas, montaje bien protegido de las líneas contra las influencias exteriores, armadura de los cables suficientemente resistentes, etc.

Los efectos de las perturbaciones pueden atenuarse reduciendo el valor de la corriente de cortocircuito (por seccionamiento en redes parciales) eliminando el desplazamiento de la tensión en las redes de alta tensión por puesta a tierra del punto neutro, eliminando rápidamente la perturbación por medio de relevadores e interruptores extrarrápidos, reconexión rápida de los interruptores para evitar los cortes no necesarias de las líneas, especialmente de las líneas de acoplamiento. Particularmente, pueden disminuirse las consecuencias de una desconexión, por

medio de una configuración apropiada de las líneas, así como mediante la rápida conmutación sobre un elemento de reserva.

En esta obra solamente nos dedicaremos al estudio de las sobretensiones siendo esta, una de las principales causas en la interrupción de la energía eléctrica en un sistema de distribución. Se analizará la clasificación de las sobretensiones, en donde trataremos a fondo las sobretensiones de origen externo y las sobretensiones de origen interno.

Hablar de sobretensiones de tipo de origen externo, implica hablar sobre los comúnmente llamados "rayos", los cuales son descargas atmosféricas, estas descargas afectan considerablemente las líneas de distribución aéreas, por lo que habrá de protegerlas de tales descargas, por tal motivo se estudiara la protección contra descargas atmosféricas.

Existen diversas teorías sobre la formación de las descargas atmosféricas, ya que estas pueden ser de nube a nube o de nube a tierra, y desde tiempos muy remotos han capturado la imaginación y el miedo de la raza humana.

Esto no fue hasta que Benjamin Franklin se convirtió en el primer científico en incurrir en el fenómeno de las descargas atmosféricas. Desde aquella época, los rayos han sido objeto de grandes estudios y muchas teorías que han sido desarrolladas las cuales explican de manera razonable el fenómeno.

Las causas principales de la formación de descargas atmosféricas es la separación y acumulación de cargas eléctricas en nubes, esta electrificación es resultado de bastante intensidad de un gran campo eléctrico, causando el rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire y en consecuencia la aparición de un rayo.

Las teorías más útiles son las teorías de precipitación y convección, y después mejoraron, la más notable la teoría de temperatura de carga-inversa. La

comprensión de estas teorías es de gran ayuda para el diseño en los sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Una breve explicación de las teorías de electrificación de las nubes será tratada en esta obra en el capítulo de sobretensiones.

Las descargas atmosféricas se encuentran como una de las principales causas de falla en circuitos de distribución en zonas con una incidencia elevada de rayos a tierra. La protección más convencional contra este tipo de sobretensiones son:

- a) Hilo de Guarda (Blindaje)
- b) Cuernos de Arqueo (Respaldo)
- c) Apartarrayos (Protege)

Desde los inicios de la electricidad en forma comercial se vio la necesidad de proteger los equipos contra sobretensiones, existiendo una gran variedad de métodos y formas de protección. La protección se puede lograr desviando la onda de sobretensión, absorbiéndola ó drenándola a tierra.

Debido al elevado índice de fallas de los apartarrayos, se ha adoptado una combinación con el hilo de guarda, para ofrecer una mayor protección y menor índice de falla.

El hilo de guarda consiste en un conductor desnudo que va por encima de la línea, teniendo dos funciones principales:

- 1) Desvía la corriente producida por la descarga en dos o más trayectorias.
- 2) Las descargas que llegan directas las intercepta y las lleva lejos del transformador.

Los Cuernos de Arqueo son dos electrodos generalmente esféricos conectados a la línea y tierra con una separación entre ellos donde solo existe aire, al presentarse una sobretensión lo suficientemente grande, como para romper el dieléctrico, éste rompe la rigidez del aire produciendo un arco entre ellos, evitando así el daño a los aislamientos y equipo. Tienen el inconveniente, que al operar, la tensión de línea va a tierra, debido a esto se requiere una protección de respaldo que cuando opera interrumpe el servicio restándole confiabilidad al sistema, y en muchas ocasiones operan los fusibles , lo cual implica un costo adicional.

Desde hace algún tiempo los apartarrayos de óxidos metálicos, están implantándose en el campo de las protecciones contra las sobretensiones en redes eléctricas, desplazando cada vez más a los apartarrayos autovalvulares a base de resistencias de Carburo de Silicio, provistos de explosores. Los apartarrayos de óxidos metálicos tienen una base muy simple que son las propiedades de dichos óxidos , mediante los cuales se produce una transición del estado aislante al conductor al llegarse a una determinada tensión de operación. Esta transición es muy rápida y además reversible, es decir, la resistencia vuelve a su valor aislante cuando la tensión se hace inferior a la de operación. Su principio de funcionamiento está fundamentado en resistencias dependientes de la tensión y altamente no lineales.

Cuando, en una instalación eléctrica, se presenta una sobretensión transitoria que supere su nivel de aislamiento a los impulsos por descarga atmosférica, se provocaría la destrucción del correspondiente material , por lo que se hace necesario protegerlo contra esta sobretensión.

El primer dispositivo que se utilizó para ello, fueron los "explosores" que consistían fundamentalmente en un electrodo bajo tensión, separado por un espacio de aire do otro electrodo puesto a tierra. Este sistema, aunque muy económico, presentaba una serie de graves inconvenientes como:

- 1) Tensión de operación muy imprecisa.
- 2) Inservibles para proteger líneas, por producirse elevadas corrientes de descarga.
- 3) Mala protección a los transformadores.

Todos estos problemas se resolvieron cuando se asociaron en serie resistencias variables con explosores, que es el fundamento de los apartarrayos autovalvulares de resistencia variable, que constituyó un dispositivo de protección mucho más eficaz contra las sobretensiones.

Posteriormente se desarrollaron en Japón investigaciones dirigidas a aprovechar las propiedades físicas que poseen los discos varistores, a base de óxidos metálicos para la protección contra sobretensiones, obteniéndose los actuales apartarrayos de óxidos metálicos, y que están constituidos únicamente por varios discos, como elementos activos, habiéndose eliminado definitivamente los elementos explosores. Su uso se ha extendido, en la última década, en todos los niveles de tensión. Sus características hacen que sea el dispositivo actual más eficaz para la protección contra las sobretensiones de todos los aparatos y materiales que forman parte de las instalaciones eléctricas.

La ausencia de explosores, la no linealidad de la resistencia y la gran capacidad para absorber energía, hacen que estos apartarrayos presenten las siguientes ventajas sobre los otros dispositivos de protección:

- 1) Menor tamaño y más simplicidad de diseño.
- 2) Niveles de protección más amplios.
- 3) Mejor protección de los devanados secundarios de los transformadores al ser más suaves a las variaciones de tensión y de intensidad.
- 4) Soportar mejor las sobretensiones.
- 5) Mejor protección para todo tipo de aparatos y materiales al no existir fuertes variaciones de tensión e intensidad.

Los apartarrayos ayudan a proteger los equipos contra sobretensiones, ya sea por descargas atmosféricas ó sobretensiones producidos por maniobras de interruptores.

Entre los equipos que se deben proteger son los siguientes:

Transformadores.

Restauradores.

Interruptores

Seccionalizadores.

Los dispositivos anteriores también sirven para proteger tramos de línea de distribución instalando de 3 a 4 juegos por kilómetro, evitando así flameos en los aisladores y la operación del interruptor que deja fuera parte o todo el alimentador y por consecuencia el servicio.

La descarga atmosférica, no nada más puede afectar a un sistema de distribución, sino también puede descargarse sobre un edificio, un tejado de una casa o un árbol, a los cuales también se les brinda una protección contra estas descargas, ésta protección es el Sistema de Pararrayos. Este consiste en terminales aéreas y un blindaje conectados entre sí y dirigidos a tierra. Cuando cae un rayo, puede escoger entre el pararrayos, y el resto de la parte más alta de un edificio o de una casa. El rayo elige el primero, ya que este busca siempre los cuerpos metálicos con preferencia a los demás, y que en todas partes cae sobre los árboles y no sobre el terreno que los rodea. En todos estos casos la razón es la misma : la electricidad prefiere el camino más fácil, o, dicho de otra manera, el camino que ofrece menor resistencia. Esta protección es efectiva hasta un 95%, ya que un rayo es imprevisible tanto en su intensidad, como su lugar de descarga.

Un rayo está constituido , por lo general, por varias rapidísimas descargas sucesivas (hasta 30 o 40) que suceden a intervalos de centésimas o milésimas de

segundo. La intensidad de la corriente suele ser del orden de los 10kA, pero puede llegar hasta los 400 kA . La energía liberada se manifiesta en forma de luz, de sonido y de calor . Generalmente los rayos castigan los objetos más altos, en especial si son conductores y están conectados a tierra.

Al no tener un buen sistema de pararrayos, se tiene el peligro inminente de que una descarga atmosférica, arremeta contra la parte desprotegida, viajando este por la estructura de la construcción, y buscando descargarse, este puede ser en una sala de cómputo, un conmutador o un quirófano. Por eso es de gran importancia que las estructuras más altas cuenten con este tipo de sistema, ya que ofrecen una seguridad principalmente del personal y del equipo a proteger.

No nada más se tienen problemas con las sobretensiones de origen externo que son las descargas atmosféricas, otro aspecto importante es la necesidad de que la compañía suministradora del servicio eléctrico, proporcione un servicio confiable con un voltaje y una frecuencia constante. Sin embargo, la realidad de la ingeniería de los grandes sistemas de potencia es que los disturbios son inevitables. Estos disturbios en la calidad del suministro de potencia ocurren durante la operación normal del sistema así como también durante condiciones anormales, dando como resultado equipos dañados o perturbaciones en la operación.

Los sistemas de potencia operan con un voltaje de línea constante, suministrando potencia a una amplia diversidad de equipos. Los niveles de potencia van en el rango de unos cuantos watts hasta los megawatts , y los voltajes a los cuales la energía se genera, transporta y distribuye anda desde los cientos de volts hasta los cientos de kilovolts .

La transmisión y distribución primaria de esta potencia se hacen en alto voltaje, para proporcionar un transporte eficiente y económico de la energía a través de grandes distancias. La utilización final es generalmente en el rango de 120 V

(típicamente residencial) a menos de mil (industrial), y a unos cuantos miles para cargas grandes.

A todos estos niveles de voltaje y potencia, no importa que tan altos, los equipos dependen de que se mantenga un voltaje de operación normal porque solo tienen una capacidad limitada para soportar voltajes en exceso del nivel normal. A voltajes por debajo del nivel normal, el comportamiento del equipo es generalmente no satisfactorio, o existe el riesgo de daño en el equipo. Estos dos disturbios, voltaje en exceso o insuficiente, se describen con nombres dependiendo de su duración.

Actualmente la mayoría de los procesos industrializados cuentan con equipos computarizados, los cuales requieren un alto grado de continuidad, por otro lado, se presentan deformaciones en la onda de voltaje, por el uso de cargas electrónicas, entre otros por: armónicas, ruido electromagnético, abatimiento de la onda de voltaje, operación de apartarrays, sobretensiones, electrostática, etc.

Por otro lado, está el problema de las interrupciones de servicio, las cuales, pueden ser del tipo instantáneo o del tipo de larga duración. Más recientemente, los disturbios asociados con voltajes transitorios, con cortocircuitos, descargas atmosféricas, apertura o cierre de interruptores, ondas de sobretensión, han hecho que la compañía suministradora de energía no solo se preocupe por la suministración, sino también por entregar al usuario una mejor calidad de la onda de tensión, así como de contar con dispositivos que mejoran la potencia, que aceptan potencia eléctrica en cualquier forma que esté disponible, y la modifican para mejorar la calidad y la confiabilidad requerida por los equipos electrónicos de CA sensibles.

Estos dispositivos llevan a cabo funciones tales como la eliminación de ruido, cambio o estabilización de voltaje, frecuencia y forma de onda. Los requerimientos para el manejo y comportamiento de la potencia varía dependiendo de cada

aplicación. Una amplia variedad de productos que mejoran la potencia están disponibles en el mercado, utilizan diversas tecnologías y proporcionan diferentes grados de protección a la carga conectada. Primero se deben entender los requerimientos de la aplicación, y luego aplicar una solución costo/efectiva utilizando uno o más de los productos disponibles.

El trabajo de seleccionar el dispositivo apropiado es realmente directo cuando alimenta a una sola carga. Solo se consideran los requerimientos de esa carga.

En sistemas más grandes que soportan muchas cargas, es necesario considerar los requerimientos de todas las cargas, así como también los potenciales entre ellas, antes de decidir el equipo más apropiado que mejore la potencia.

Es por esto que decidimos estudiar más a fondo este fenómeno, así como de las protecciones existentes y tratar de combinarlas para ofrecer una mejor protección contra este, ya que en la actualidad existe muy poca información sobre el tema.

CAPÍTULO I

Sistemas de distribución.

1. ANTECEDENTES.

Con el invento del transformador por Gaulard y Gibbs en 1883 se hizo posible la elevación eficiente y económica de la tensión utilizando sistemas de corriente alterna. Por esta razón el sistema de corriente alterna para la generación y la transmisión desplazó al de corriente continua, permitiendo la transmisión de grandes cantidades de energía eléctrica a grandes distancias.

Los primeros sistemas de corriente alterna fueron monofásicos. En 1884 Gaulard realizó una transmisión de corriente alterna monofásica de 40 Km. de longitud en la región de Turín (Italia). En 1886 se puso en servicio en Estados Unidos un sistema de corriente monofásica, usando transformadores con tensión primaria de 500 volts y tensión secundaria de 100 volts. En 1887 entró en servicio un sistema de transmisión y distribución con corriente alterna en la ciudad de Lucerna (Suiza) y en 1888 en Londres.

En 1883 Tesla inventó las corrientes polifásicas, en 1886 desarrolló un motor polifásico de inducción y en 1887 patentó en Estados Unidos un sistema de transmisión trifásico.

La primera línea de transmisión trifásica se construyó en 1891 en Alemania, con una longitud de 180 Km. y una tensión de 12 KV.

El sistema de corriente alterna trifásico se desarrolló rápidamente y es actualmente el de empleo general, ya que se presenta la ventaja de que la potencia total suministrada es constante, siempre y cuando el sistema sea equilibrado.

A partir de la introducción de la transmisión con corriente alterna trifásica a fines del siglo pasado, la cantidad de energía transmitida, la longitud de las líneas y la tensión de transmisión han aumentado constantemente.

En 1886 se instaló una línea de 25 KV en Estados Unidos.

En 1905 entró en servicio una línea de 60 KV entre la planta hidroeléctrica de Necaxa y la Ciudad de México.

Para 1913 las tensiones de transmisión subieron a 150 KV, en 1923 a 220 KV y en 1935 a 287 KV, en Estados Unidos. En 1952 entró en servicio en Suecia un sistema de 440 KV, en 1958 en la Unión Soviética de 500 KV y en 1965 en Canadá una línea de 735 KV. Las tensiones más altas actualmente en servicio son del orden de 1000 KV.

Uno de los componentes de los Sistemas Eléctricos de Energía, es el Sistema de Distribución, este sistema puede variar desde una simple línea aérea que conecte un generador con un solo consumidor, hasta un sistema de malla o de red automática que alimente la zona más importante de una ciudad.

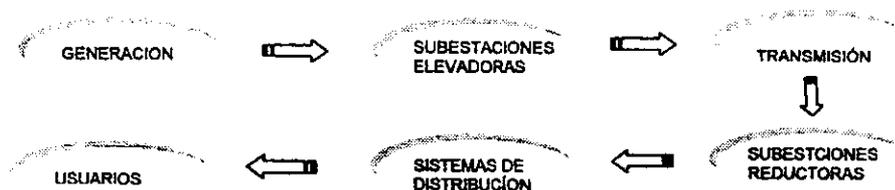
Cualquier país, independientemente de que sea industrializado o en desarrollo, utiliza el 50% o más de su consumo de energía eléctrica en su industria o en procesos productivos, los cuales tienen en si mismos sistemas de distribución de importancia considerables , como empresas petroquímicas, automovilísticas, textiles, etc.

En México existen dos grandes corporaciones que tienen a su cargo la Distribución de la energía , una de ellas es La Compañía de Luz y Fuerza del Centro, que tiene a su cargo las ciudades de Cuernavaca, Toluca, Pachuca , el Distrito Federal así como de el área Metropolitana, y la otra en el resto del país, La Comisión Federal de Electricidad, que han ido creciendo dependiendo de la demanda exigida.

Aunado con este crecimiento, el desarrollo de los Sistemas de Distribución han evolucionando, de tal manera que han sido cada vez más complejos, pero con el mismo propósito: el de llevar la energía a los usuarios.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Un sistema de energía eléctrica consiste en una gran diversidad de cargas eléctricas repartidas en una región, este sistema está compuesto por: las plantas generadoras, para producir la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas generadoras a los puntos de consumo y todo el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con una excelente calidad. En conjunto forman un Sistema de Energía Eléctrica.



Representación esquemática de un Sistema de Energía Eléctrica.

3. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.

A. Definición

Un sistema de distribución eléctrica es el conjunto de elementos encargados de suministrar la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario. La función de la Red de Distribución es tomar de la fuente la energía eléctrica en bloque y distribuirla a los usuarios en los niveles de tensión normalizados y en las condiciones de seguridad exigidas por los reglamentos. En México el reglamento que se utiliza es "La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999, Instalaciones Eléctricas (Utilización).

La red de Distribución debe proyectarse de modo que pueda ser ampliada progresivamente, con el fin de asegurar un servicio adecuado y continuo para la carga presente y futura, al mínimo costo de operación.

Otra definición que se acepta que es "el conjunto de instalaciones desde 120 volts hasta tensiones de 34.5 KV encargadas de entregar la energía eléctrica a los usuarios".

B. Clasificación.

Los Sistemas de Distribución dependiendo de los métodos de operación, las estructuras de las redes y el equipo se clasifican en 5 campos principales de desarrollo:

Sistemas de Distribución Industriales.

Sistemas de Distribución Comerciales.

Parques Industriales.

Distribución Urbana y Residencial.

Distribución Rural.

a. Sistemas de Distribución Industriales.

Estos sistemas representan grandes consumidores de energía eléctrica, como: plantas petroquímicas, de acero, de papel y de otros procesos industriales similares. Estos sistemas, aunque son de distribución, deben ser alimentados a tensiones más elevadas que las usuales. Con frecuencia el consumo de energía de estas industrias equivale al de una pequeña ciudad, generando ellas mismas, en algunas ocasiones, parte de la energía que consumen por medio de procesos de vapor, gas o diesel.

b. Sistemas de Distribución Comerciales.

Estos sistemas son los que se desarrollan para grandes complejos comerciales o municipales como rascacielos, bancos, supermercados, escuelas, aeropuertos,

hospitales, puertos marítimos, etc. Este tipo de sistema posee sus propias características por el tipo de demanda de energía que tiene con respecto a la seguridad tanto de las personas, inmueble y del equipo. En estos casos se cuenta con generación local, en forma de plantas de emergencia.

c. Parques Industriales.

Ésta área se refiere a la alimentación, en zonas definidas, denominadas parques industriales localizadas por lo general en las afueras de las ciudades o centros urbanos. Por lo general la tensión de alimentación en estas zonas es mediana por lo que el desarrollo de las redes de baja tensión es mínimo.

d. Sistemas de Distribución Urbanos y Residenciales.

Consisten en la mayoría de los casos en grandes redes de cables subterráneos o aéreos desarrollados en zonas densamente pobladas. En grandes centros urbanos las cargas con frecuencia son considerables. Por otra parte, en zonas residenciales las cargas son ligeras y sus curvas de carga muy diferentes a la de las zonas urbanas comerciales o mixtas.

e. Distribución Rural.

Esta área de distribución es la que tiene la densidad de carga más baja que las anteriores mencionadas y por ello requiere soluciones especiales que incluyan tanto las estructuras como los equipos. Las grandes distancias y las cargas tan pequeñas representan un costo muy elevado, por lo que en muchas zonas es preferible generar la energía localmente.

C. Principales Elementos.

Líneas primarias.

Transformadores de Distribución.

Líneas Secundarias.

Acometidas y Equipos de Medición.

a. Líneas Primarias.

Son las encargadas de llevar la energía desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución. Los conductores van apoyados en poste cuando se trata de instalaciones aéreas, y en ductos o directamente enterrados cuando se trata de instalaciones subterráneas.

Los componentes de una línea primaria son:

1. Troncal
2. Ramal

1. Troncal. Es el tramo de mayor capacidad del alimentador que transmite la energía desde la subestación de potencia a los ramales.
2. Ramal. Es la parte del alimentador primario energizado a través de un troncal, en el cual van conectados los transformadores de distribución y servicios particulares suministrados en mediana tensión.

Los alimentadores primarios normalmente se estructuran en forma radial, en un sistema de este tipo, la forma geométrica del alimentador semeja a la de un árbol, en el que el grueso de la energía se transmite a lo largo de una troncal, derivándose la carga a lo largo de los ramales.

b. Transformadores de Distribución.

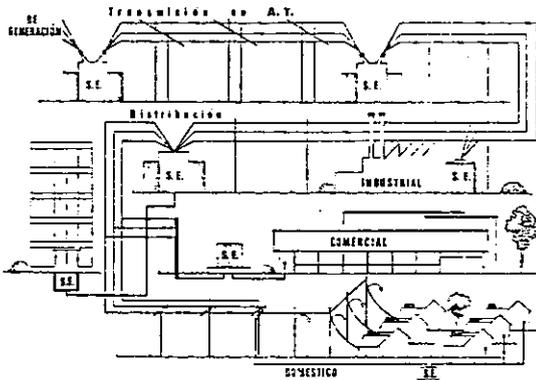
Los transformadores de distribución son los encargados de cambiar la tensión primaria a un valor menor, de tal manera que el usuario pueda utilizarla. En sí el transformador de distribución es la liga entre la red primaria y la red secundaria (usuarios).

c. Líneas secundarias.

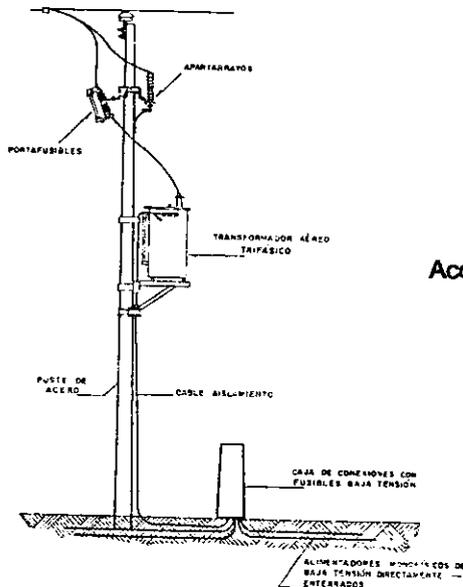
Las líneas secundarias distribuyen la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas de los usuarios.

d. Acometidas y Equipos de Medición.

Las acometidas, junto con el equipo de medición, son las partes que ligan al sistema eléctrico de la empresa suministradora con el usuario. Las acometidas se pueden proporcionar a la tensión primaria o a la tensión secundaria; esto depende de la magnitud de la carga del cliente.

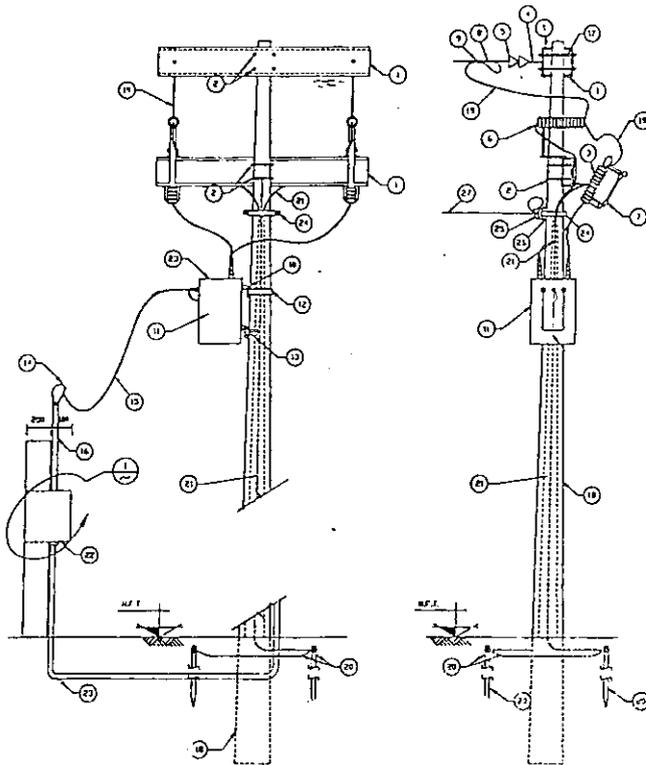


Sistema Eléctrico de Energía



Acometida

Elementos de una Acometida Eléctrica.



- 1 Cruceta.
- 2 Abrazadera.
- 3 Cortacircuito fusible.
- 4 Conductor de cobre desnudo o ASCR.
- 5 Aislador de suspensión.
- 6 Apartarrayos.
- 7 Elemento fusible.
- 8 Remate prefabricado o grapa de remate.
- 9 Conector de compresión o mecánico estañado de aluminio.
- 10 Abrazadera UL.
- 11 Transformador de distribución.
- 12 Soporte.
- 13 Separador.
- 14 Mufa de aluminio.
- 15 Conductor de cobre aislado.
- 16 Tubo pared gruesa galvanizado.
- 17 Perno.
- 18 Poste de concreto.
- 19 Conductor de cobre desnudo ó ASCR.
- 20 Vanillas copper-weld.
- 21 Bajada de tierra
- 22 Gabinete para equipo de medición.
- 23 Tubo conduit.
- 24 Abrazadera.
- 25 Aislador carrete.
- 26 Bastidor
- 27 Conductor de cobre.

4. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Un buen suministro de energía eléctrica está caracterizado por la continuidad y la calidad de la energía eléctrica que se suministra. Se dice que el suministro eléctrico es bueno si se reduce a un mínimo posible la cantidad de interrupciones. Adicionalmente el buen suministro requiere que las diferentes características de la energía eléctrica suministrada esté dentro de los márgenes recomendados por las Guías y Normas aplicables.

El suministro de energía eléctrica debe realizarse con una calidad adecuada, de manera que los aparatos que utilizan la energía eléctrica funcionen correctamente. La calidad del suministro de energía eléctrica queda definida por los siguientes parámetros:

Continuidad en el servicio.

Regulación en el voltaje.

Control de la frecuencia.

En los últimos años, se han diseñado equipos altamente sensibles, siendo aceptados ampliamente por los usuarios finales, algunos de estos equipos son más susceptibles a algunos disturbios del sistema, que otros equipos convencionales que no lo eran.

A. Continuidad del servicio.

La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna, que una interrupción de su suministro causa trastornos y pérdidas económicas.

Para asegurar la continuidad del suministro deben tomarse las disposiciones necesarias para hacer frente a una falla en algún elemento del sistema, entre las principales disposiciones tenemos:

- ↳ Disponer de reserva de generación adecuada para hacer frente a la posible salida de servicio.

- ↳ Disponer de un sistema de protección automático que permita eliminar con rapidez necesaria cualquier elemento del sistema que ha sufrido una avería.
- ↳ Diseñar el sistema de manera que la falla y desconexión de un elemento tenga la menor repercusión posible sobre el resto del sistema.
- ↳ Disponer de los circuitos de alimentación de emergencia para hacer frente a una falla en la alimentación normal.
- ↳ Disponer de los medios para un restablecimiento rápido del servicio, disminuyendo así la duración de la interrupciones, cuando estas no han podido ser evitadas.

B. Regulación de voltaje.

Los aparatos que funcionan con energía eléctrica están diseñados para operar con un voltaje determinado y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe más allá de ciertos límites.

Una variación de $\pm 5\%$ del voltaje se considera tolerable.

C. Control de frecuencia.

Los sistemas de energía eléctrica funcionan a una frecuencia determinada, dentro de cierta tolerancia.

Las cargas resistivas son, evidentemente, insensibles a las variaciones de frecuencia.

En cambio las cargas constituidas por motores eléctricos que mueven distintos tipos de máquinas giratorias son afectadas en mayor o en menor grado por las variaciones de frecuencia.

La variación de la frecuencia causa una variación del mismo signo de la potencia consumida, que para algunas aplicaciones como ventiladores y bombas centrífugas, puede significar una variación del uno por ciento de la potencia

consumida, para una variación de la frecuencia del 1% con respecto a su valor nominal.

En algunas aplicaciones, como, por ejemplo, la industria de fabricación del papel, la variación de velocidad debida a la variación de frecuencia puede afectar el buen funcionamiento del proceso de fabricación.

Tomando en cuenta todos estos factores puede decirse que desde el punto de vista del buen funcionamiento de los aparatos de utilización es suficiente controlar la frecuencia con una precisión menor al 1%.

Una de las características que debe cumplir la frecuencia de un sistema, puede incluirse su pureza o sea que el porcentaje de armónicas sea despreciable. Esto requiere, en primer lugar, que los generadores proporcionen una tensión lo más aproximada posible a una tensión sinusoidal. En segundo lugar hay que limitar a valores tolerables la aparición de armónicas en otros puntos del sistema.

La presencia de armónicas causa pérdidas adicionales y pueden afectar el funcionamiento de ciertos tipos de aparatos; puede producir también fenómenos de resonancia que pueden dañar el equipo. Cuando estas se presentan se deben casi siempre a la producción de armónicas en algún aparato de un consumidor.

5. PERTURBACIONES EN LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MEDIANA Y BAJA TENSIÓN.

Hasta hace algunos años el único problema que se presentaba a los usuarios en el suministro de energía se debía a la interrupción del servicio, las fallas instantáneas o momentáneas a la gran mayoría de usuarios poco les afectaba, solo aquellos servicios, donde los servicios requieren continuidad permanente.

Actualmente la mayoría de los procesos industrializados cuentan con equipos computarizados, los cuales requieren un alto grado de continuidad, por otro lado, se presentan deformaciones en la onda de voltaje, por el uso de cargas electrónicas, entre otros por: armónicas, ruido electromagnético, abatimiento de la onda de voltaje, sobretensiones, electrostática, etc.

Algunas industrias o empresas tienen problemas con este tipo de fenómenos ya que poseen equipos que son muy sensibles e interrumpen su ciclo de trabajo, produciendo pérdidas económicas.

Más recientemente, los disturbios asociados con voltajes transitorios, descargas atmosféricas, cierre de interruptores y por último los problemas asociados con las interrupciones del servicio se une a estos un problema aún más grave la distorsión de la forma de onda por armónica.

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN URBANA



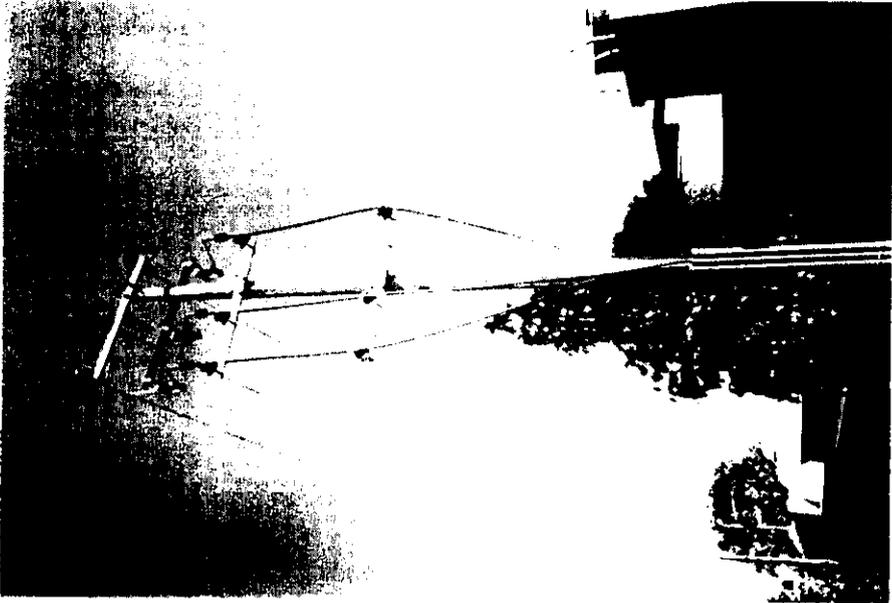
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

SUBESTACION ELÉCTRICA

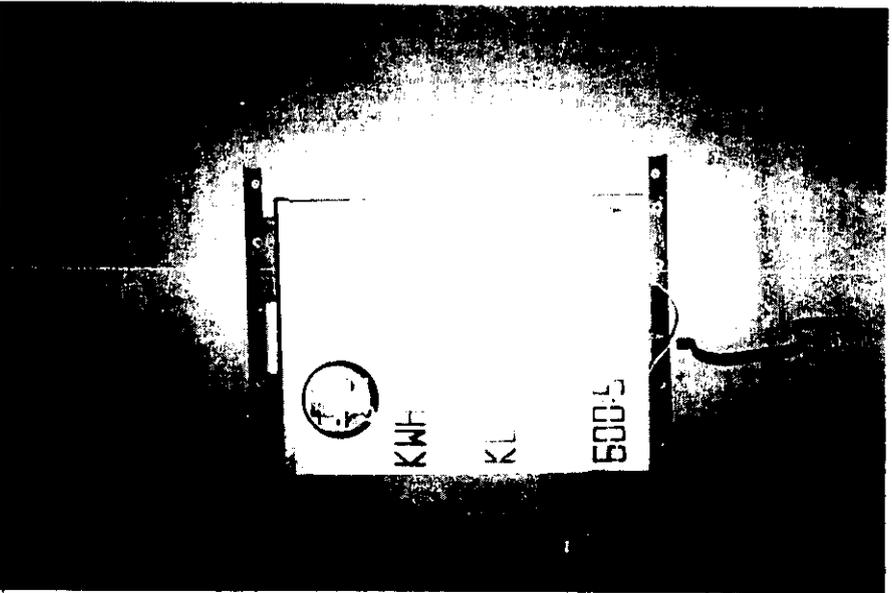


TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN

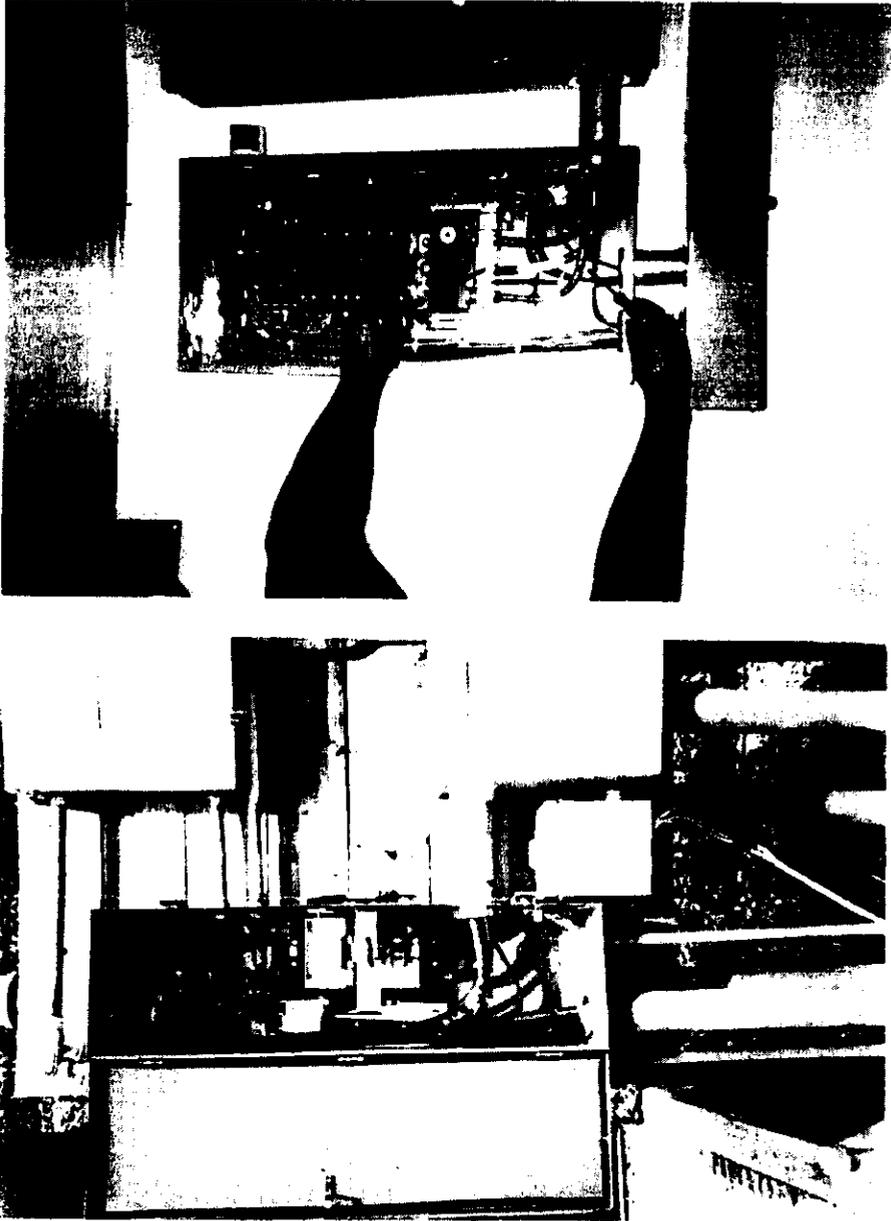
ACOMETIDA



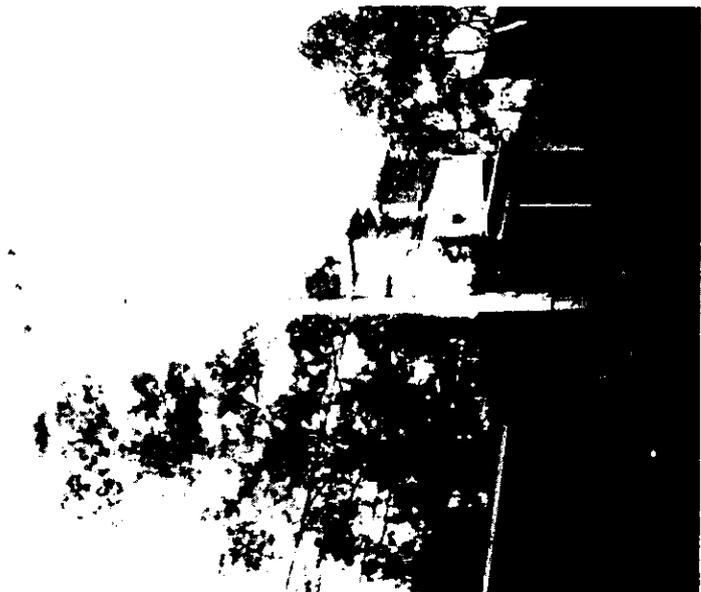
EQUIPO DE MEDICIÓN



TABLEROS DE DISTRIBUCIÓN



ACOMETIDAS



CAPÍTULO II

Sobretensiones.

1. ANTECEDENTES.

En las instalaciones eléctricas, por causas unas veces intrínsecas y otras debidas a fenómenos externos, la diferencia de potencial entre conductores o entre éstos y tierra pueden alcanzar, durante un tiempo generalmente reducido, valores superiores a la diferencia de potencial que existe normalmente. Tales diferencias de potencial anormales se conocen con el nombre de *sobretensiones*, éstas pueden manifestarse entre la tierra y los conductores de instalación, y por consiguiente entre la tierra y los arrollamientos de las máquinas o de los aparatos y también entre dos conductores de diversa polaridad o de fases diferentes, pudiendo asimismo elevarse anormalmente la diferencia de potencial entre dos puntos poco distantes de un mismo conductor.

Quando en una parte de la instalación o de las máquinas el aumento de tensión sobrepasa los valores para los cuales están dispuestos los aisladores de la línea, o los aislantes de los cables subterráneos y de los arrollamientos, y además dura un tiempo apreciable yendo acompañada de suficiente intensidad de corriente, puede dar lugar a la producción de averías. Estas se manifiestan generalmente por el deterioro lento o rápido, o con perforación de los aislantes, que en un tiempo más o menos breve puede poner fuera de servicio los cables, las máquinas o los aparatos en los que se haya manifestado la sobretensión.

En la construcción de las máquinas y de los aparatos eléctricos, los dieléctricos empleados como aislantes se eligen y dimensionan de modo que presenten un cierto coeficiente de seguridad, de forma análoga al que se fija en la construcción para la resistencia de los materiales y que pueden soportar una tensión de prueba más elevada que la normal de servicio. Los valores de estos coeficientes vienen preescritos en las normas redactadas por las asociaciones electrotécnicas.

Las sobretensiones son peligrosas para la integridad de las máquinas, aparatos y conductores, cuando alcanzan valores superiores a las tensiones de prueba. Así pues, es preciso prevenirse empleando protecciones que si no evitan la formación

de sobretensiones impidan al menos que al producirse sobrepasen los límites convenientes.

2. CONCEPTO DE SOBRETENSION.

Se denomina sobretensión a todo aumento de tensión capaz de poner en peligro al personal, equipo y servicio de una instalación eléctrica.

Las sobretensiones pueden producir descargas que además de destruir, averiar y poner en peligro el personal, también pueden ser las causas de nuevas sobretensiones. Muchas veces, los peligros de las sobretensiones no se deben solamente a su magnitud, sino también a la forma de onda.

Si a pesar de todas las precauciones, en una instalación se producen sobretensiones deben procurarse que se descarguen a tierra lo más pronto posible, por medio de los correspondientes dispositivos de protección.

Las causas que afectan el servicio en un sistema de distribución son muy variadas, se enunciarán algunas de ellas, las cuales consideramos más importantes:

- a) Descargas Eléctricas.
- b) Envejecimiento de los aisladores.
- c) Destrucción por parte de animales.
- d) Corrosión de los cables que atraviesan suelos de naturaleza agresiva.
- e) Deterioro de aisladores debido a regiones húmedas, brumosas ó costeras.
- f) Destrucción por fenómenos naturales.
- g) Sobrecargas eléctricas.
- h) Factores humanos.
- i) Mal funcionamiento de los dispositivos de protección.
- j) Desconexión de líneas con carga excesiva.

De las anteriores consideramos que son las más comunes, y las que más dañan en un Sistema de Distribución.

Las descargas atmosféricas son las causas más frecuentes de sobretensiones en Sistemas de Distribución. Básicamente un rayo es una chispa gigante, consecuencia de millones de volts entre una nube y la tierra, es decir, hasta que se rompe la rigidez dieléctrica entre ambos.

La cantidad de corriente en el golpe del rayo es una cantidad estática, dependiendo de la energía de la nube y la diferencia de voltaje entre la nube y la tierra cuando comienza el rayo.

En suma, las descargas atmosféricas, pueden producir voltajes peligrosos en Sistemas de Distribución así como afectar al personal o equipo que labora ya sea en una instalación eléctrica, edificio, hospital, etc.

3. TIPOS DE SOBRETENSIONES.

Las sobretensiones pueden ser clasificadas en dos clases:

1. Sobretensiones de origen atmosférico o externo
2. Sobretensiones de origen interno.

A. Sobretensiones de origen externo.

La necesidad de protección contra descargas atmosféricas se ha reconocido desde hace varios siglos.

La protección contra rayos en edificios, fábricas, hospitales, escuelas, torres de comunicación, etc., es una parte de las instalaciones eléctricas que ésta relacionadas con la seguridad pública.

En este inciso del capítulo 2 se hace una revisión del tema considerando primero la evolución histórica, después los avances recientes obtenidos tanto en los

laboratorios como en las mediciones en campo para posteriormente emitir una serie de recomendaciones prácticas y finalmente concluir sobre el tema.

Antes de continuar con lo arriba dicho, consideramos necesario plantear el problema de los proyectos que se realizan en este campo y la carencia de Normas Técnicas en el Reglamento de Instalaciones Eléctricas en nuestro país.

Al hacer una revisión de la situación en México, encontramos que en la mayoría de los casos, los proyectos que se presentan se basan en normas de códigos extranjeros, principalmente el NFPA debido a que en el Reglamento de Instalaciones Eléctricas no se considera. Por otra parte, se encontró que los proyectistas (Ingenieros Eléctricos en el mejor de los casos) no están actualizados.

El ingeniero comerciante ofrece pararrayos radiactivos o multipuntas como argumento de un mejor producto. Generalmente, el proyecto es un plano donde se indica la instalación y no se suministra memoria de cálculo en donde se indiquen las consideraciones del proyecto ¿Quién evalúa el proyecto? ¿Qué criterios se evalúan? ¿Se vende seguridad al cliente?

a. Antecedentes.

A partir del descubrimiento de la descarga en puntas, Benjamin Franklin inventó el pararrayo en 1750. En el curso de sus experimentos eléctricos encontró que una esfera metálica cargada se podía descargar al aproximar a ésta una aguja de hierro puntiaguda.

Esto lo llevó a pensar que una nube cargada podía descargarse de la misma manera con varillas puntiagudas a cierta altura y conectadas a tierra por un alambre. Después de los primeros ensayos de esta idea, avanzó a otra; si la varilla no descarga la nube electrificada, debe interceptar el rayo y conducir la descarga a tierra, blindando por lo tanto los edificios vecinos a ésta.

Franklin propuso dos modos diferentes, por lo que las varillas a cierta altura del suelo debían proporcionar protección contra los rayos, uno, actuando para descargar la nube y evitar el rayo, el otro, interceptando el rayo selectivamente y

drenando la descarga a tierra.

Franklin no exploró las implicaciones de su segunda idea, permaneció cautivado con el poder ionizante de las puntas en intensos campos eléctricos y recomendó que el pararrayo tuviera la punta afilada para evitar las descargas.

Al mismo tiempo en Inglaterra se desarrolló un punto de vista opuesto, Jorge III rechazó las ideas americanas argumentando que las varillas puntiagudas atraían los rayos en lugar de evitarlos y protegió su castillo con varillas con punta achatada. Franklin dijo que las varillas puntiagudas atraen rayos a gran distancia de manera silenciosa y gradual, pero que las varillas achatadas atraen las descargas a mucho mayor distancia.

Los méritos relativos de ambos han continuado siendo controversiales.

En 1878 las prácticas de protección contra las descargas atmosféricas eran tan variadas que la Sociedad Meteorológica Británica organizó una Conferencia entre científicos e ingenieros para formalizar el conocimiento existente y preparar un código de reglas para la protección contra descargas atmosféricas. El reporte cubría prácticas inglesas y americanas. Los fabricantes ingleses de pararrayos proporcionaban varias formas de conos afilados o puntas en la terminal superior del pararrayo. Otros usaban bandas de cobre, rodeando los extremos superiores, los americanos especificaban que el extremo superior del pararrayo debía terminar en una sola punta, el cono del cual debía cubrirse con platino.

Otras recomendaciones importantes fueron que la distancia a tierra debía ser lo más corta y directa posible, que debían evitarse dobleces muy cerrados o ángulos agudos en el conductor de bajada.

En 1880 se recomendó el uso de pararrayos sin puntas platinadas y el uso de chapas de hierro en la parte superior de las chimeneas y en protuberancias o salientes.

Maxwell recomendó la Jaula de Faraday para almacenes de pólvora considerando como la mejor manera de blindar.

La posición formal de la conferencia de 1881 con relación a la forma del extremo superior del pararrayo fue que la decisión en cuanto a la mejor forma de las puntas

era complicada por dos requisitos opuestos:

- 1º. Entre más afilada es la punta más efectiva pero
- 2º. Las puntas más afiladas más fácilmente se destruyen por fusión y oxidación.

Para evitar la fusión se recomendó el oro, plata y platino para obtener puntas afiladas que fueran durables y resistentes pero el costo era elevado. Aún así hubo evidencias de fusión, achatándose las puntas.

Considerando lo anterior, se recomendó dejar la punta achatada y un pie abajo, poniendo un anillo de cobre con agujas de cobre y cubrirlas con níquel.

Estas recomendaciones no terminaron la divergencia de puntos de vista en relación a los mejores métodos de protección contra descargas atmosféricas.

En 1901 un comité dió poca atención a la forma de las puntas, y a las recomendaciones de Maxwell. Se aceptaron puntas múltiples y el platinado se consideró innecesario. Se dió más atención al conductor de bajada y a los problemas de hacer buenas conexiones a tierra. Se consideró el efecto de la inductancia del conductor y los medios para reducirla.

Algunos de los conceptos que se manejaban eran los siguientes:

" En la protección de edificios debe tenerse en mente que esta no sigue la ley de corrientes eléctricas como en caso de líneas de transmisión".

" La descarga muestra una gran tendencia a distribuirse así misma en conductores tales como los que pueden estar presentes en los edificios, hace poco caso la resistencia ohmica ".

" No encuentra dificultad en hacer su camino a menudo a considerable distancia a través del aire, prefiere moverse en línea recta y por lo tanto, los cambios bruscos de dirección del conductor producen descargas laterales ".

Otro concepto tratado en 1905 fue el área de protección ofrecido por el pararrayo. Franklin no mencionó el efecto del blindaje de pararrayo, es probable que la Academia de Ciencias haya desarrollado el concepto de " espacio protegido ". El cono de protección varió a través del tiempo "el radio de protección es igual al doble de la altura del pararrayo"

Algunos investigadores lo consideraron sin significado; otros opinaron que aunque podía ser correcto no siempre se podía confiar plenamente debido a que se había experimentado descargas dentro del cono de protección.

Otros opinaron que los edificios protegidos con este principio requerían pararrayos muy elevados.

En este tiempo, consideraron que un número de pequeñas varillas bien conectadas por conductores a lo largo del perímetro del edificio y en salientes proporcionarían una mejor protección que igual cantidad de material en varillas más altas y separadas a gran distancia y este sistema es el que se ha adoptado.

A pesar de las críticas y de las descargas dentro de la zona de protección el concepto de cono de protección ha continuado y se usa ampliamente como una guía para definir el alcance necesario de un sistema de protección.

Las configuraciones de la terminal superior permanecen diversas.

La Norma británica define la terminación aérea como parte de un sistema de protección contra descargas atmosféricas diseñadas para interceptar las descargas.

Acepta los conductores horizontales en el perímetro de los edificios y no le da importancia a las puntas. Los sistemas modernos siguen los principios recomendados por Maxwell (blindar el edificio con conductores y no puntas) en cambio, las normas americanas especifican pararrayos con terminales verticales y puntiagudas.

No hay datos confiables y aceptados acerca de las ventajas o méritos de las varillas puntiagudas o achatadas, aunque ahora es bien reconocido que las varillas puntiagudas en la superficie del suelo no pueden ni disipan cargas eléctricas en nubes de tormenta activas. De hecho hay emisión de cargas en los árboles, plantas y objetos aterrizados que limitan las intensidades de campo eléctrico en la superficie sin debilitar significativamente la actividad eléctrica en la nube. Por esta razón, parece que la primera idea de Franklin no es trabajable y su segunda idea, la intercepción selectiva de un rayo es la manera por la que los pararrayos proporcionan protección a las estructuras en su vecindad.

El valor de la varilla puntiaguda para atraer o interceptar la guía de la descarga no se ha establecido, sin embargo, la tecnología americana de pararrayos sigue manteniendo el punto de vista de Franklin acerca de la configuración deseable para las varillas.

A pesar de los temores enunciados por el crítico de Franklin, Benjamin Watson ; que el uso de varillas puntiagudas aumentan la incidencia de rayos no hay evidencia que el uso de varillas con cualquier configuración haya incrementado la frecuencia de las descargas.

El inicio de la descarga (nube a tierra) no se ve influenciado por objetos en la superficie de la tierra, esto se verá más adelante.

Se han realizado estudios de las siguientes tres configuraciones:

- ⚡ Varilla metálica vertical con su parte superior puntiaguda y aterrizada.
- ⚡ Varilla vertical con punta redondeada y aterrizada.
- ⚡ Cable horizontal elevado y conectado a tierra.

El estudio concluye que la punta afilada falla frecuentemente para proteger estructuras abajo de ellas y con frecuencia no proporcionan una trayectoria preferencial a tierra ; las puntiagudas tienden a protegerse a si mismas por las descargas en las puntas.

Las varillas con punta redondeada son más efectivas que las afiladas para interceptar los rayos y el conductor horizontal sin puntas también es muy efectivo.

El cono de protección depende de la altura, exposición y curvatura de la terminal aérea no obstante lo anterior, no hay total seguridad ya que los problemas fundamentales no están resueltos, es decir se requiere un mayor avance en el conocimiento de la física de la descarga para mejorar los modelos hasta ahora empleados.

b. Avances.

En el pasado, se han usado varios métodos para diseñar los sistemas de protección sin embargo, el método de la "esfera rodante" es generalmente aceptado hasta ahora.

Las bases experimentales, el modelado matemático, digital y los trabajos experimentales de ingeniería se ha mejorado considerablemente. No obstante lo anterior, hay evidencias de fallas de blindaje que no han podido explicarse hasta ahora, por lo que se considera que nuestro entendimiento del fenómeno de intercepción no es adecuado y el modelado matemático y computacional no toman en cuenta todos los parámetros en la manera apropiada.

Horvath hace una evaluación crítica de los últimos trabajos en este campo enfatiza seis puntos importantes que necesitan consideración adicional para un modelado apropiado del mecanismo de intercepción:

- ⚡ La distribución de carga en el canal de la guía descendente.
- ⚡ Relación entre la carga del líder y el valor máximo de la corriente en la primera descarga.
- ⚡ Evaluación apropiada de la propagación del canal líder o guía.
- ⚡ Condiciones para iniciación de la guía ascendente.

- ↳ Evaluación de las diferentes velocidades de propagación para la guía ascendente y del canal descendente.
- ↳ Conexión entre el canal descendente y la guía ascendente.

Con el fin de clarificar, un poco, se hace una descripción breve del mecanismo de la descarga.

Cuando una nube tormenta (nube fuertemente cargada) está sobre una superficie dada, se produce un aumento importante del campo eléctrico, observando éste a nivel de tierra, con valores típicos que van desde unos cuantos KV/m a 40 KV/m y aún del orden de cientos de KV/m en algunas estructuras.

Estos niveles pueden crear efecto corona en la mayor parte de los objetos elevados sobre esa superficie. Bajo estas condiciones es muy factible la ionización del aire alrededor de objetos principalmente de aquellos en forma de punta.

Este proceso llega finalmente a influir en la formación de guías ionizadas ascendentes cuando se llega a alcanzar un gradiente crítico entre la guía ionizada que desciende desde la base de la nube y el plano de tierra. Finalmente cuando una de las guías ascendentes se conecta con la guía descendente se completa el fenómeno de transferencia de carga de nube a tierra.

La guía descendente se inicia independientemente de cualquier objeto a nivel del plano de tierra, y su propagación hacia tierra es muy errática y se produce en forma de escalones. El punto de contacto con tierra si está influido por la naturaleza y ubicación de los puntos aterrizados, los cuales "compiten" en formar las guías ascendentes, una de las cuales sobrevivirá como punto de contacto para interceptar a la guía o canal descendente.

En ese momento, se produce el colapso de todas las demás guías ascendentes que no participan en el proceso de intercepción.

En el momento que se establece el proceso de transferencia de carga de la nube a tierra debe proporcionarse un camino de baja resistencia por lo que la punta u objeto aterrizado debe tener una conexión efectiva a tierra de baja impedancia.

Un trabajo relativamente reciente analiza los posibles efectos relacionados con la iniciación de las guías ascendentes en presencia de carga espacial y en la velocidad de propagación de la guía ascendente cuando la resistencia a tierra no es despreciablemente baja. Aunque esta investigación es a nivel de laboratorio donde hubo escalamiento de espacio y tiempo y que plantea ciertos problemas para hacer la transferencia de resultados a la condición natural el resultado es muy importante porque proporciona una explicación de la dependencia observada del punto de incidencia con la resistencia de tierra.

Por lo tanto, la impedancia del circuito eléctrico de cada guía ascendente generado en una terminal aérea (punta) en combinación con las propiedades transitorias del sistema de electrodos de tierra pueden tener un efecto significativo en la probabilidad de intercepción de la descarga.

Se han logrado avances también, en el modelado de la respuesta transitoria de los sistemas a tierra que permiten mejorar dichos diseños. Estos trabajos también se han realizado en laboratorio permitiéndonos entender los fenómenos de la descarga atmosférica en tierra.

Como puede verse, se han logrado avances sobre el tema que permitirán mejorar el diseño de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas tanto de edificios como de los sistemas de potencia. Trabajos de laboratorio, de campo y de modelado digital han permitido este avance.

c. Recomendaciones.

Recomendaciones prácticas

- ↳ Determinar si la instalación bajo estudio requiere protección para lo cual habrá que consultar el mapa de densidad de rayos a tierra elaborado por la IIE. A mayor densidad de rayos a tierra mayor probabilidad de descargas a la instalación.
- ↳ Determinar el área de incidencia teniendo en cuenta la altura, la probabilidad de incidencia y el factor de riesgo considerando el uso e importancia del inmueble.
- ↳ Aplicar el método de "esfera rodante" para evaluar la protección.
- ↳ La forma de la terminal aérea (varilla) no es importante o fundamental. Es más importante reducir el valor de la resistencia de puesta a tierra.
- ↳ No bajar los conductores juntos para evitar esfuerzos electrodinámicos y eléctricos
- ↳ Coordinarse con el arquitecto o el ingeniero civil para analizar tuberías de agua, gas, electricidad, etc., para evitar la descarga lateral y para analizar cuando convendrá aislar el sistema de protección de otros sistemas o conectarlos entre sí. La descarga lateral es muy importante.
- ↳ Debe evitarse cambios de dirección en los conductores de bajada porque pueden producir descarga lateral.
- ↳ Verificar que el sistema de tierras es apropiado para drenar la corriente de la descarga y que además ofrezca seguridad.
- ↳ Realizar una memoria de cálculo donde se indiquen todas las consideraciones hechas en el proyecto.
- ↳ Consultar especialistas en los casos especiales.
- ↳ La selección del material y calibres de conductores puede consultarse con los fabricantes o en los códigos.
- ↳ Deben cuidarse los aspectos de corrosión dependiendo del ambiente.
- ↳ No es necesario usar pararrayos sofisticados como los de intensificación radioactiva o con electrodos activos que son más costosos. Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente en la evolución histórica, se puede usar la práctica de los conductores horizontales que son efectivos.

No es posible proporcionar todas las recomendaciones para todos los casos, pero es importante tener en cuenta los conceptos antes expresados, y que existe información sobre el tema así como herramientas digitales.

- Recomendaciones para Instalaciones de comunicación.

Las estaciones de comunicaciones consisten generalmente de antenas aéreas que captan o envían información y que por razones obvias se encuentran instaladas sobre puntos elevados, frecuentemente sobre torres metálicas de alturas que algunas veces llegan a sobrepasar los 50 metros.

Los equipos donde se conectan las antenas generalmente se encuentran albergados por una pequeña caseta construida junto a la torre y en cualquier caso de una altura considerablemente menor. Bajo estas circunstancias las descargas atmosféricas serán invariablemente captadas por la terminal de tierra o pararrayos instalada sobre la punta de la torre metálica.

Si ésta es una sola, no existe la posibilidad de disminuir el efecto de corriente máxima ya que toda la corriente tiene que ser conducida a tierra por una sola trayectoria. Si existen varias torres adyacentes en el mismo sitio, es conveniente adoptar, si no existe inconveniente alguno en la operación esperada del sistema de comunicación, la medida de interconectar las terminales aéreas en la punta de la torre, de tal forma que al incidir una descarga sobre cualquiera de ellas, la trayectoria a tierra sea compartida a través de diferentes caminos. De este modo se reduce la corriente máxima, al disminuir la corriente con respecto al caso de que se tuviera una trayectoria única a tierra.

En relación con el aterrizamiento de este tipo de instalaciones, el mejor esquema es disponer de una malla o red de tierras alrededor del conjunto torre - caseta de equipo. Una forma de asegurar que la distribución de potencial durante la conducción de corriente de rayo a tierra sea uniforme en esta área, evitando así caídas de tensión severas por corrientes circulantes a través de los elementos

metálicos de los cables de señales, es formar un lazo cerrado de conductor de cobre enterrado alrededor de esa superficie. Es importante que adicionalmente todos los elementos metálicos tales como neutros o tierra del sistema eléctrico, pantallas de cables coaxiales para señales de comunicación o de control se encuentran conectados entre si.

De esta manera, la caída de tensión que se forma a través de la impedancia de conexión a tierra durante una descarga se levanta a valores que si bien pueden ser elevados, no se produce ninguna tensión que no pueda ser tolerada por el equipo ya que no existen diferencias de potencial entre los diferentes elementos metálicos.

Es importante observar que si bien es cierto que la caseta donde se alberga el equipo se encuentra prácticamente blindada por la torre metálica adyacente, la referencia a tierra para el equipo, a su vez teniendo el área equipotencial descrita, no debe ser otra que la misma referencia a tierra que la utilizada por la terminal aérea de protección.

Finalmente, es importante subrayar que la protección tanto de los cables de alimentación de energía eléctrica de las luces de obstrucción como de los cables coaxiales que provienen de la antena o conjunto de antenas, debe proporcionarse a la entrada de éstos los dispositivos de protección como son los apartarrayos de baja tensión.

B. Sobretensiones de tipo interno.

Las variaciones de carga en una red, producen a su vez variaciones de tensión.

Entre las causas de este tipo de sobretensiones son:

- ↳ Sobretensiones producidas por la fuente de suministro. Estas son originadas en las centrales productoras de la energía, resultado de fallas de equipo o por causas externas (colisión de vehículos, tormentas, errores humanos). Estos disturbios van desde una reducción momentánea de voltaje hasta la pérdida

completa de la energía durante unos minutos, horas o incluso días. Su origen accidental los hace impredecibles.

- ⌘ **Sobretensiones transitorias.** Estas se presentan en forma de impulsos de voltaje de corta duración, superpuestos en la señal de alimentación y frecuentemente intermitentes con una duración menor a 2 ms. Los impulsos pueden tener su origen en las descargas atmosféricas, en maniobras de interruptores y al conectar o desconectar capacitores para la corrección del factor de potencia. Estos constituyen los llamados picos de voltaje. Su valor puede llegar a alcanzar valores de cinco veces o más el voltaje nominal, su efecto consiste en aplicar esfuerzos excesivos al aislamiento de diversos equipos, o disturbios en los componentes electrónicos sensibles. Esto último puede traer como consecuencia la interrupción de programas en proceso de computadoras, pérdida de información almacenada en memoria o daño de los elementos mismos (hardware). Otros factores transitorios, dentro de esta clasificación, los constituyen las operaciones de conexión y desconexión de motores eléctricos en elevadores, equipos de aire acondicionado, refrigeradores, etc.

- ⌘ **Sobretensiones producidas por fluctuaciones de voltaje.** Significa una disminución momentánea en la magnitud de voltaje rms con una duración que va desde 10 ms (0.6 ciclos) hasta 2.5 seg (150 ciclos) causado por una falla remota en algún lugar del sistema de potencia. Las condiciones de alto o bajo voltaje pueden presentarse en circuitos durante la desconexión de cargas de gran tamaño o durante periodos de sobrecargas, respectivamente. Si este tipo de sobretensiones se presentan con frecuencia durante periodos prologados pueden dar lugar a envejecimientos de los componentes electrónicos en sistemas digitales y errores durante el almacenamiento o lectura de la información. Su presencia puede algunas veces detectarse visualmente al presentarse parpadeo o disminución del nivel de iluminación en lámparas, o reducción del área de despliegue en monitores de televisión o computadoras.

- ↳ Sobretensiones producidas por: la conexión y desconexión de cargas es una causa importante de disturbios. Siempre que un circuito formado por inductancias y capacitancias se conecta o se desconecta, ocurre un disturbio porque las corrientes y voltajes no alcanzan su valor final instantáneamente. Este tipo de disturbio es inevitable y su severidad depende del nivel de potencia real de la carga que se está conmutando y de la corriente de corto circuito disponible en el punto donde se lleva a cabo la conmutación. La conexión y desconexión de cargas puede producir cambios en el voltaje de larga duración, más allá de la respuesta transitoria inmediata del circuito.
- ↳ Otros tipos de sobretensiones. La descarga de cargas electrostáticas formadas sobre el cuerpo humano y diversos objetos, también pueden inyectar voltajes o corrientes indeseables hacia dentro de los circuitos. Este fenómeno está asociado con el contacto del operador con el equipo más que con la calidad de la potencia de alimentación.

EJEMPLO DE MARGEN
DE PROTECCIÓN.

4. PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES.

La protección contra sobretensiones tiene por objeto preservar los elementos que constituyen los sistemas eléctricos de la acción perjudicial de las sobretensiones que pueden aparecer durante el servicio.

Cuando se produce una sobretensión, hay que rebajarla hasta un valor no peligroso para los elementos de la instalación. Este valor podrá alcanzar, como máximo, el valor de la tensión de prueba.

Cuando hay aparatos con distintas tensiones de prueba, debe adoptarse como punto de referencia el valor de la tensión de prueba más baja.

Por lo tanto, y de acuerdo con lo dicho, un dispositivo protector contra sobretensiones es tanto mejor cuanto menor es la *tensión límite* que provoca su actuación. Además del valor de la tensión límite, también es importante la denominación *tensión de respuesta* que es la tensión bajo la cual comienza a actuar la protección.

El funcionamiento del dispositivo protector ha de establecer una eficaz derivación con tierra. La subsiguiente corriente alterna de servicio debe quedar interrumpida a su primer paso por cero de lo que resulta que los dispositivos de protección más adecuados son aquéllos en los cuales esta subsiguiente corriente es pequeña, de forma que no pueda influir sobre el funcionamiento conjunto de la red.

Finalmente, y como consecuencia de la anterior condición, para que un dispositivo de protección cumpla su misión adecuadamente es necesario que la resistencia a tierra sea lo menor posible, para evitar que la caída de tensión en ella no resulte excesiva, provocando nuevas perturbaciones tales como descargas de retroceso y otras.

En resumen, un dispositivo de protección contra sobretensiones ha de cumplir las siguientes condiciones:

- ↳ Una tensión de respuesta inferior a la menor tensión de prueba de los elementos que ha de proteger.
- ↳ Una buena puesta a tierra.
- ↳ Una resistencia a tierra lo más pequeña posible.

Para obtener una seguridad en el servicio y desplazar la sobretensión a un lugar no peligroso, en las instalaciones eléctricas se ha recurrido a un escalonamiento de las tensiones de descarga superficial que se denomina coordinación de las protecciones.

El concepto de protección implica la confrontación de un medio hostil y un equipo susceptible.

A continuación se mencionan las perturbaciones más comunes y sus posibles soluciones:

- ✧ Para cortes o interrupciones de la energía se recomienda un mantenimiento a las líneas y a equipos. Instalar equipos que mantengan la energía cuando exista este tipo de interrupciones, este tipo de equipos se les conoce con el nombre de "no break".
- ✧ Para sobretensiones de tipo atmosférico, proteger mejor las líneas con apartarrayos con una buena conexión a tierra, evitando así la apertura y cierre de interruptores en forma innecesaria. Para edificios y casa-habitación instalar sistema de pararrayos.
- ✧ En caídas de tensión, que es un fenómeno que se debe al aumento de carga y a la impedancia del sistema, la solución más viable es la de colocar reguladores de voltaje.
- ✧ Las descargas electrostáticas, se generan con la fricción y generalmente se producen entre el operador y las máquinas, este tipo de sobretensiones puede provocar errores de datos o bien dañar los circuitos. La protección se logra con el uso de ropa de algodón y hasta con la instalación de piso semiconductor.
- ✧ Otro tipo de sobretensión, son aquellas producidas por armónicas, cuando existen cargas no lineales como son las de los equipos electrónicos, rectificadores, transformadores, etc., se da lugar a la creación de armónicas que deforman la onda de tensión. Para evitar este tipo de sobretensiones, que causa calentamiento en conductores, transformadores, etc., se debe contar con un buen sistema de tierras o filtros.

5. PROTECCION A LÍNEAS AÉREAS.

Los sistemas de potencia se ven sujetos periódicamente a sobretensiones, que pueden ser de origen interno (maniobras ó fallas) o externo (descargas atmosféricas). La magnitud de las sobretensiones externas recae esencialmente en el diseño del sistema, mientras que para las internas, la magnitud de la sobretensión incrementa el voltaje de operación del sistema. Al aumentar el voltaje de operación, se llega a un punto donde el factor determinante para el diseño del aislamiento son las sobretensiones por maniobra. Hasta 300 kV (aproximadamente), el aislamiento del sistema debe diseñarse para soportar principalmente los transitorios por descargas atmosféricas. Para voltajes mayores, deben de considerarse transitorios tanto por rayos como por maniobras. Para voltajes de 765 kV y mayores, las sobretensiones por maniobra y la contaminación de los aisladores, se convierten en el factor principal en el diseño de aislamiento.

Las descargas atmosféricas son una fuente importante de fallas (transitorias o permanentes) en los sistemas de transmisión y distribución. En México, representan en alto porcentaje del total de fallas reportadas.

Estos disturbios generan consecuencias a los consumidores con diferentes grados de severidad. Los consumidores industriales que utilizan dispositivos estáticos para controlar sus procesos, pueden atravesar por graves problemas si se presentan caídas de voltaje, o interrupciones en el suministro de energía. Debido a lo anterior, es justificable realizar esfuerzos para eliminar, o al menos reducir, la frecuencia de tales fallas.

A. Cuernos de Arqueo.

Son dos electrodos generalmente esféricos conectados a la línea y a tierra, con una separación entre ellos donde solo existe aire, al presentarse una sobretensión lo suficientemente grande, como para romper el dieléctrico, este rompe la rigidez

dieléctrica del aire produciendo un arco entre ellos, evitando así el daño a los aislamientos y equipo. Tienen el inconveniente, que al operar, la sobretensión producida que va a tierra, requiere de una protección de respaldo que cuando opera interrumpe el servicio restándole confiabilidad al sistema y en muchas ocasiones operan los fusibles, lo cual implica un costo adicional.

B. Hilos de Guarda.

El nivel de protección de un sistema eléctrico de distribución contra las descargas atmosféricas cuando se establecen hilos de guarda cobra gran interés para el servicio que preste. Estos hilos pueden ser de acero, o de cobre con alma de acero y se conectan a las puntas mas altas de las torres o postes, de la línea sobre los conductores activos o fase de línea, es decir son hilos soportados paralelamente a los conductores de la línea, con una colocación a un nivel superior de ellos que sirve como pantalla protectora impidiendo que los rayos caigan directamente sobre los conductores activos. Además, en la parte alta de las torres o postes se conecta a los hilos de guarda un cable de tierra que sirve para derivar a tierra las ondas de sobretensión producidas por la descarga y que viajan por los hilos de protección.

Cuando el hilo de guarda recibe el impacto del rayo se propaga a través de el en cada sentido ondas de sobrevoltaje que inducen en los conductores de fase ondas de menor amplitud cuyo valor depende del Factor de Acoplamiento que se puede determinar conociendo las distancias entre los hilos de referencia y los conductores de distribución.

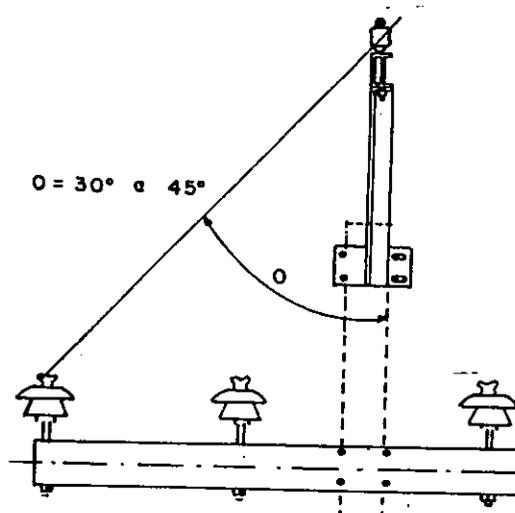
Este factor esta también afectado por el efecto corona que se produce en los conductores.

Se debe evitar que la descarga o el arco salte de los hilos de guarda a los conductores de fase, por lo que en general se adopta la distancia entre conductores de fase e hilos de guarda, una altura de por lo menos la distancia entre conductores de fase.

Los circuitos de distribución deben ser protegidos contra las sobretensiones debidas ya sea a descargas atmosféricas o de operaciones de maniobra de interruptores. De las dos, la protección contra las descargas atmosféricas es de mayor importancia puesto que los niveles de aislamiento normalmente usados en los circuitos de baja tensión pueden soportar sobretensiones por operaciones de maniobra de varias veces el voltaje normal de operación.

Básicamente, entonces, una vez que se ha colocado el apartarrayos para la protección contra descargas atmosféricas, el equipo y los circuitos están también protegidos contra operaciones de maniobra con un margen bastante adecuado.

La protección contra sobretensiones en los circuitos de distribución aéreos así como de los equipos de distribución montados en postes usualmente no requieren de un análisis de ingeniería muy detallado. Sin embargo la protección de los sistemas de distribución subterráneos y en general de los equipos conectados por medio del cable, representan una situación mas compleja.



Línea de 23 kV con hilo de guarda.

A. Apartarrayos.

El empleo de apartarrayos para la protección contra sobretensiones en un sistema de distribución es sin duda el método que más se ha desarrollado a la fecha. Se inició en Estados Unidos en 1897. En 1912 se introdujo el primer apartarrayos de cámara de compresión, en el que se conectó una resistencia en serie con varios discos de bronce separados por roldanas de porcelana que permitían limitar la frecuencia normal 50 ó 60 Hz que sucedía a las corrientes transitorias. Durante una descarga los gases generados por el arco se comprimían, ayudando de esta manera a extinguirlo.

En la década de los treinta apareció en el mercado el primer apartarrayos tipo expulsión, que aún está en funcionamiento en algunas partes del mundo. Este dependía fundamentalmente del gas producido por la erosión de la fibra para interrumpir la corriente de 60 Hz que sucede a la corriente transitoria; esto limitaba su aplicación y su vida de servicio.

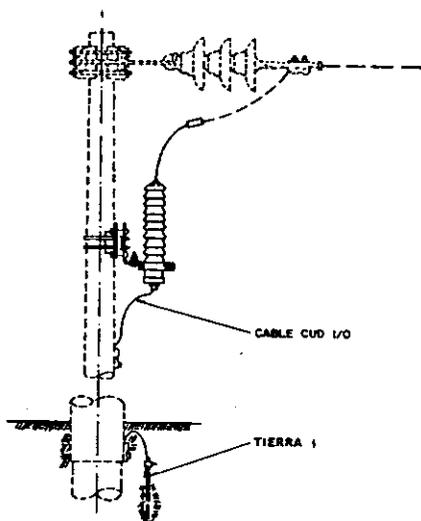
En 1953 se introdujo el primer apartarrayos que operaba con un principio magnético; este apartarrayos permitió el uso de elementos de menor resistencia. El apartarrayos tenía físicamente un peso de casi la mitad que uno de esferas de similar tensión y capacidad de descarga. La principal característica de este apartarrayos es su resistencia no lineal, hecho con una mezcla de silicio y arcilla calentada y compactada.

En 1971 la compañía General Electric lanzó al mercado un nuevo tipo de apartarrayos. Consta fundamentalmente de un elemento resistivo similar al anterior y un conjunto de entrehierros diseñados de tal manera que la tensión de chispeo del apartarrayos es menor que en los otros tipos y la corriente de 60 ciclos se extingue por acción magnética.

En la década de los setentas la industria eléctrica japonesa desarrolló los primeros apartarrayos sin entrehierro, conocidos como apartarrayos de óxido de zinc y

cuyas características lo acercan a una válvula eléctrica no lineal ideal.

Ya que la tendencia mundial y en nuestro país es el uso de apartarrayos tipo autovalvular y de óxido de zinc para la protección contra sobretensiones en sistemas de distribución y su equipo se desarrollarán con más detalle sus características y aplicaciones.



Montaje de pararrayos.

CAPÍTULO III

Calidad de la energía.

1. ANTECEDENTES

Un buen servicio eléctrico está caracterizado por la continuidad y la calidad de la energía eléctrica que se suministra. Se dice que el suministro eléctrico es bueno si se reduce a un mínimo posible la cantidad de interrupciones del servicio. Adicionalmente el buen suministro requiere que las diferentes características de la energía estén dentro de los márgenes recomendados por las Guías y normas aplicables.

Desde que la electricidad se empezó a utilizar en forma masiva con fines domésticos e industriales, se han venido desarrollando equipos cada vez más sofisticados.

Debido a que los equipos electrónicos utilizados actualmente, tales como computadoras, conmutadores, etc., son muy sensibles a las variaciones de frecuencia, tensiones transitorias y otras desviaciones de la tensión senoidal así como interrupciones momentáneas en el suministro de la energía, la calidad en el servicio debe ser más eficiente, por parte de las compañías suministradoras de la energía eléctrica en México, normalmente reciben quejas de clientes los cuales han cambiado su maquinaria ó equipo dentro de su empresa y comienzan a tener problemas, su equipo se sale de servicio ó se dañan tarjetas las cuales son muy costosas o no existen comúnmente en el mercado y que originan serias pérdidas al cliente por la falta de los mismos, que en ocasiones ponen en riesgo su producción.

Derivado de lo anterior se realiza conjuntamente entre las compañías suministradoras y el usuario una inspección a sus instalaciones en donde el cliente da a conocer los equipos que se ven afectados con parpadeos, variaciones de voltaje, interrupciones instantáneas e interrupciones permanentes, tomando nota de todos los comentarios del cliente, así como datos de placa de

los equipos, parámetros que debe tener el servicio, ajustes del equipo, etc., así mismo el usuario proporciona información de las características técnicas que le fueron entregadas cuando adquirió sus equipos, en las cuales normalmente indican parámetros y desviaciones aceptables así como ajustes mínimos y máximos.

Este problema ha tomado un interés cada vez más importante debido al aumento de equipos electrónicos dentro del ámbito residencial, comercial e industrial, ya que dichos equipos distorsionan la señal eléctrica, pero también requieren ser alimentados con una energía eléctrica de muy alta calidad.

En diversas ocasiones dicha energía no cumple con los parámetros especificados y entonces es necesario aplicar diversas acciones correctivas para llevar la calidad de la energía eléctrica dentro los rangos específicos para las variaciones de voltaje, la distorsión, las armónicas, el ruido eléctrico, etc.

2. PERSPECTIVA HISTORICA.

Con la esperanza pública de una uniforme e intensa iluminación y, como más fabricantes empezaron a utilizar motores para impulsar sus líneas de producción, las compañías suministradoras adoptaron estándares estrictos para la regulación de voltaje.

Durante la década de los 30's, las compañías suministradoras también encontraron que tenían que poner más atención a los disturbios en el voltaje provocados por los equipos de los clientes en sus líneas de distribución. Una investigación mostró que el parpadeo en las lámparas incandescentes causado por fluctuaciones de voltaje podía ser percibido aún si la pulsación en la línea de potencia era solo de un tercio de volt en un sistema de 120 V. Este tipo de problema condujo a un número creciente de estándares industriales para el equipo de los usuarios, que apuntaban a la reducción de las fluctuaciones de voltaje enviadas de regreso por la línea de fuerza.

Un problema de alguna forma diferente se presentó durante la década de los 50's a medida que los acondicionadores de aire se popularizaron. Cuando los primeros modelos fueron encendidos, se usaba tanta energía para arrancar sus compresores, que los voltajes en la línea de alimentación se reducían temporalmente y los motores con frecuencia no llegaban a su velocidad de operación, rodaban lentamente o se paraban. Afortunadamente, en este caso, se tuvo el remedio disponible: se agregaron capacitores para la corrección del factor de potencia en el sistema.

La razón por la cuál las quejas acerca de la calidad del servicio no pueden ser manejadas con facilidad hoy en día, es simplemente que parece reflejar tanto una multitud de causas diferentes y una diversidad de sensibilidades específicas de los consumidores más afectados. Justo como los problemas de los acondicionadores de aire fueron eventualmente resueltos mediante un esfuerzo coordinado entre las partes afectadas, así también nuevos estándares en equipo y en niveles permisibles de distorsión en el voltaje ayudan al diseño y aplicación tanto de equipos electrónicos sensibles como aparatos de uso rudo.

Sin embargo, tales estándares tendrán que ser aplicados en una forma mucho más selectiva que en el pasado, y tratar con un conjunto de problemas mucho más complejos.

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

se ha tenido en la utilización de equipo basado en electrónica de potencia ha creado un problema para el suministrador.

En primer lugar, este equipo, en común con cualquier dispositivo que incorpora electrónica de potencia, es sensible a las variaciones rápidas de voltaje, como son los abatimientos de voltaje.

En segundo lugar, este tipo de equipo genera distorsión armónica, y bajo ciertas condiciones puede deteriorar la magnitud y forma de onda del voltaje suministrado a grado tal que sea inadecuado para la mayoría de los usuarios que comparten esa misma fuente de suministro.

La sociedad actual es dependiente del comportamiento de sus dispositivos motorizados y computarizados. Cuando suceden anomalías en el suministro de la energía, el comportamiento de estos sistemas se ve afectado, los beneficios económicos y de bienestar que proporciona la tecnología se eliminan y se desprenden numerosos problemas tanto para la empresa suministradora como para sus usuarios. El suministrador usualmente atribuye los problemas a anomalías en la instalación del usuario, mientras que el usuario normalmente asocia los problemas a deficiencias en las redes de suministro

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

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

energía menores, reduciendo el consumo de potencia

2. La electrónica de potencia ha producido una nueva generación de dispositivos de alta capacidad y bajo costo, lo que ha extendido su utilización. Sin embargo, estos mismos dispositivos producen perturbaciones en la calidad de la energía, a los cuales la microelectrónica es sensible. Se estima que la porción de la energía eléctrica total generada por aquellas cargas procesadas por electrónica de potencia se incrementarán de un nivel actual de 10-20 %, al 50-60 % en el año 2010.
3. Mientras que estos cambios dramáticos se están dando en las cargas, las empresas eléctricas y los clientes industriales continúan aplicando capacitores para la corrección de factor de potencia para controlar el voltaje y reducir el flujo de reactivos.

En la literatura técnica aparecen con mayor frecuencia, estadísticas que se han llevado a cabo en industrias u otro tipo de cargas, con objeto de caracterizar los problemas de la calidad de la energía. Por ejemplo, el porcentaje de los disturbios que se presentan como depresiones de voltaje "sags", como sobretensiones, como impulsos, por distorsiones de la onda senoidal, etc. También es preocupación actual cuantificar las magnitudes y duraciones de estos disturbios, que afecten a los diferentes tipos de cargas, principalmente aquellas que hacen uso intensivo de la electrónica de potencia.

La importancia de abordar con urgencia este tema de la calidad del suministro de energía eléctrica deriva de las estimaciones que indican, que para el año 2000 el número de cargas sensibles conectadas a los sistemas eléctricos será muy grande. Y esto no será exclusivo de consumidores domésticos o comerciales. Por el contrario también se verán inmersos en este problema los consumidores industriales y las propias compañías generadoras y distribuidoras de energía

eléctrica, debido principalmente a la aplicación y utilización de los avances tecnológicos que ofrece la electrónica de potencia.

3. CONCEPTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Se dice que una energía eléctrica suministrada es de alta calidad si el voltaje que entrega la fuente es estable y no sufre distorsiones, adicionalmente se requiere que la conexión a tierra de dicha fuente sea adecuada.

El voltaje de suministro es de buena calidad si su valor rms se mantiene dentro el rango de variación específica y no presenta variaciones lentas, rápidas y transitorios que estén fuera de los rangos recomendados respectivos.

A los diferentes niveles de voltaje y de potencia que se manejan, los equipos dependen de que se mantenga un voltaje de operación normal porque solo tienen una capacidad limitada para soportar voltajes en exceso de un nivel normal. A voltajes por abajo del nivel normal, el comportamiento del equipo es generalmente no satisfactorio, o existe el riesgo de daño en el equipo.

Estos dos disturbios, voltaje en exceso o insuficiente, se describen con nombres diferentes dependiendo de su duración. También hay diferentes tipos de disturbio, que involucran la distorsión de la forma de onda y otras desviaciones de la onda senoidal esperada.

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 de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales, por sí solas resultan ser una causa de degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Podemos decir, que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario, y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado

del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad.

A. Calidad del Voltaje.

Hoy en día la energía eléctrica que se nos suministra, es una energía alterna caracterizada por una forma de onda senoidal y periódica en el voltaje de acometida. Dicho voltaje tiene una frecuencia de 60 Hz y una magnitud que puede ser definida tanto en valor máximo como en valor eficaz ó rms, normalmente los equipos e instalaciones se especifican en valor rms.

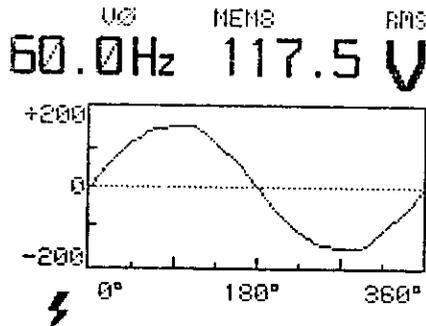
Cabe mencionar que el valor máximo que alcance la señal senoidal de voltaje se puede obtener multiplicando el valor rms por raíz de dos. Es importante aclarar que dicha relación, solamente es válida si la señal de voltaje se conserva con una forma de onda puramente senoidal.

Cuando la forma de onda cambia o se distorsiona con respecto a la forma de onda senoidal, el valor eficaz cambia y debe ser calculado tomando en cuenta las amplitudes de las diferentes señales periódicas, normalmente con frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental. A este valor se le conoce como valor eficaz verdadero o "True RMS Value".

Desafortunadamente en la práctica el voltaje se mantiene constante y tiende a variar con el tiempo y muchas veces pierde su forma de onda senoidal presentando un cierto nivel de distorsión. Dichas variaciones pueden provenir directamente de la Red eléctrica o bien de la fuente que lo suministra. Las variaciones pueden ser lentas o transitorias.

Para toda instalación eléctrica se definirá un valor máximo y un valor mínimo, dentro de los cuales el voltaje rms en un punto dado podrá variar. Cualquier valor que sobrepase el límite máximo producirá una condición de sobrevoltaje .

Cualquier voltaje que llegue a un valor más bajo que el límite inferior especificado producirá una condición de bajo voltaje.



B. La importancia de la calidad de la energía en equipo eléctrico y electrónico

Con el desarrollo tecnológico y el advenimiento de la electrónica de potencia, los equipos especifican un suministro eléctrico de alta calidad. Curiosamente la misma electrónica de potencia ha ocasionado la distorsión, tanto del voltaje como de la corriente que los alimenta.

El arribo de la conversión electrónica de potencia ha sido bienvenido ampliamente por los usuarios, pero los inconvenientes desde el punto de vista de calidad de la energía no han sido siempre reconocidas. Las grandes ventajas de los dispositivos de estado sólido que han hecho posible la moderna conmutación de las fuentes de suministro, inversores-rectificadores, controladores de velocidad variable, convertidores de potencia, etc., así que, además de los disturbios generados por la operación normal del suministro de energía y equipo de carga, los disturbios que resultan de estas nuevas cargas electrónicas deben ser tomados en cuenta.

Las corrientes armónicas causadas por muchos tipos de cargas del consumidor y del equipo de la compañía suministradora proporcionan un ejemplo de esta complejidad. Por muchos años, las corrientes armónicas se originaron principalmente en unas cuantas fuentes importantes, tales como hornos de arco y terminales de corriente directa en alto voltaje. En estos casos, se podían remover con facilidad, instalando un filtro grande, pero costoso entre la fuente la línea de potencia principal.

Hoy en día, sin embargo, importantes corrientes armónicas circulan en las líneas de potencia y son causadas por una multitud de pequeñas y muy dispersas cargas, tales como rectificadores y controles de estado sólido para motores de velocidad ajustable. Al mismo tiempo, un creciente número de otros consumidores está utilizando equipos sensibles, como las computadoras, cuya operación puede verse adversamente afectada por las armónicas.

Podría no ser económicamente factible detectar y filtrar cada una de las pequeñas fuentes de armónicas o aislar cada carga sensible de todos los disturbios en la línea de alimentación. Un método más práctico es controlar las armónicas de acuerdo a ciertos límites en los niveles de emisión con filtros instalados en las más importantes y ofensivas cargas, a la vez que se definen niveles de susceptibilidad aceptables para los equipos. Los equipos electrónicos inusualmente sensibles se pueden alimentar desde una interfaz especial acondicionadora de potencia, externa o integrada con el equipo. Tal método requiere la colaboración entre las compañías suministradoras, fabricantes de equipos, usuarios, y cuerpos que proponen normalización.

Debido a la importancia que representa entonces la energía eléctrica en nuestra vida, para su uso en iluminación, la operación de diversos equipos, video, aire acondicionado y sistemas de cómputo. La energía eléctrica se ha empleado en la fabricación de la mayoría de las cosas que utilizamos. Los disturbios y

variaciones de voltaje que se producen, por consiguiente tienden a afectarnos de alguna u otra manera.

C. Disturbios más comunes en los sistemas eléctricos de distribución.

Hasta hace algunos años el único problema que se presentaba a los usuarios en el suministro de energía se debía a las interrupciones del servicio, las fallas instantáneas o momentáneas, a la gran mayoría de usuarios poco les afectaba, solo en aquellos servicios, donde los procesos requerían continuidad permanente, como: vidrio, hilados, cómputo, etc., presentaban pérdidas por la falta de energía.

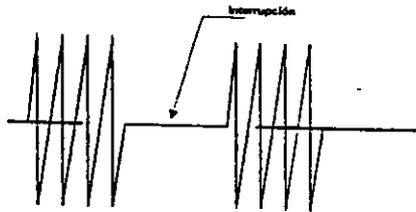
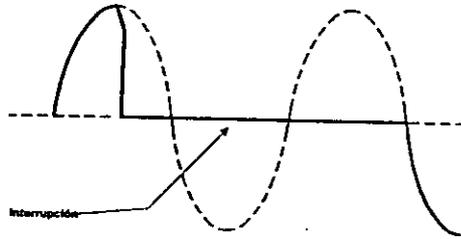
Actualmente la mayoría de los procesos industrializados cuentan con equipos computarizados, los cuales requieren un alto grado de continuidad, por otro lado, se presentan deformaciones en la onda de voltaje, por el uso de cargas electrónicas, entre otros como: armónicas, ruido, abatimiento de la onda de voltaje, sobretensiones, etc.

Algunas industrias o empresas tienen problemas con este tipo de fenómenos, ya que poseen equipos muy sensibles e interrumpen su ciclo de trabajo, produciendo pérdidas económicas.

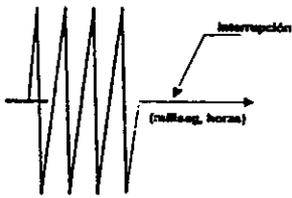
Por otro lado, está el problema de las interrupciones del servicio, las cuales, pueden ser del tipo instantáneo o de una larga duración. Se tienen algunos parámetros para medir la calidad del servicio con respecto a este tipo de fallas.

En resumen los disturbios más comunes en un sistema de distribución son:

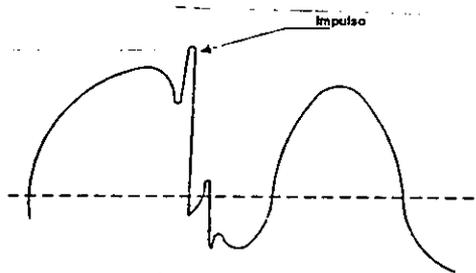
1. - *Fluctuaciones de Voltaje.*
2. - *Sobretensiones transitorias*
3. - *Interrupciones de energía*
4. - *Ruido eléctrico.*
5. - *Armónicas.*



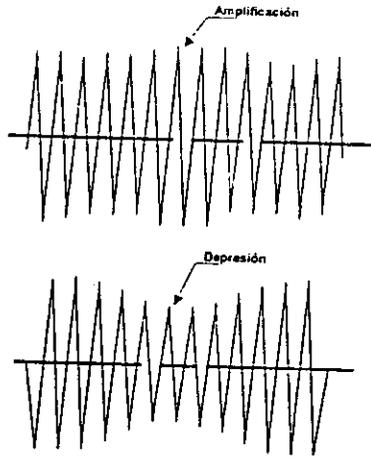
Interrupciones instantáneas



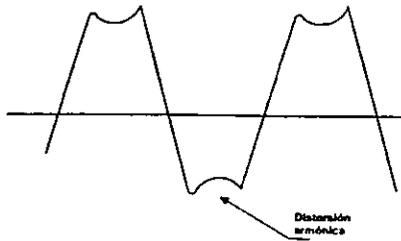
Interrupciones temporales



Sobretensiones transitorias



Fluctuaciones de voltaje causadas por condiciones de fallas remotas y conexión o desconexión de grandes cargas



Distorsión armónica

4. LA CALIDAD DE LA ENERGÍA Y EL EFECTO DE LA CONEXIÓN A TIERRA.

De acuerdo a investigaciones recientes, la mayoría de los problemas de calidad de la energía se deben a una inapropiada o inefectiva forma de distribución de la energía eléctrica y la conexión a tierra dentro de las instalaciones del usuario. Los problemas típicos por la conexión a tierra y distribución resultan de los siguientes aspectos:

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

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

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

A. Conexión a tierra.

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

En México, la Comisión Federal de Electricidad y la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, establecen los códigos legales para las instalaciones eléctricas en los sistemas y la NOM-001-SEDE-1999 para las instalaciones eléctricas en general.

La conexión a tierra se ha establecido de una manera eficiente y sirve para los siguientes propósitos:

- ↳ Protege la vida de un shock eléctrico en casos de falla a tierra
- ↳ Limitar el voltaje de un circuito cuando es expuesto a voltajes más altos de los que fue diseñado.
- ↳ En general, limitar el voltaje de un circuito de CA a 150 volts o menos en circuitos de alambrado interior.
- ↳ Facilitar la operación de aparatos y sistemas eléctricos.
- ↳ Limitar el voltaje en un circuito en el que de otra forma se puede exponer a una descarga.

A fin de tener lo anterior, se requiere una tierra efectiva y una conexión a tierra del equipo apropiado.

B. Conexión a tierra efectiva.

- ↳ Conexión a tierra efectiva, establece el voltaje cero como referencia para un sistema de distribución eléctrico y provee protección para el sistema eléctrico y el equipo de voltajes superpuestos por descarga y contacto con sistemas de alto voltaje. La conexión a tierra previene la aparición de voltajes de tipo estático y potencialmente peligrosos .
- ↳ El electrodo de tierra más común es una varilla de acero recubierta de cobre.
- ↳ La resistencia a tierra debe de ser tan baja como sea posible, lo que dará un buen funcionamiento al sistema de distribución y una buena protección al personal.
- ↳ La conexión del sistema de distribución eléctrico a tierra se hace en la entrada de servicio lo más cercano a la fuente (transformador o medidor).
- ↳ El neutro del sistema de distribución se conecta a tierra en la entrada del servicio.

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

5. ARMONICAS

Las cargas eléctricas que son alimentadas pueden ser de dos tipos: cargas lineales o cargas no lineales. Se llaman cargas lineales aquellas cargas cuyo valor de corriente consumido es directamente proporcional a la tensión, es decir existe una relación lineal entre el voltaje que se suministra a la carga y la corriente eléctrica que ésta consume. Las cargas no lineales no presentan esta relación de proporcionalidad lineal, es decir que no se puede establecer una relación proporcional o directamente proporcional entre el voltaje, carga y corriente que se consumen.

El comportamiento de las cargas no lineales, es tal que normalmente presentan una deformación de onda de la corriente eléctrica, la cual deja de ser una señal puramente senoidal, sin embargo, las cargas lineales presentan una señal senoidal pura.

Esta señal no senoidal que se presenta en caso de la corriente para las cargas no lineales, es el resultado de la superposición en el tiempo de una señal senoidal de 60 ciclos, más otras señales de frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental, en general múltiplos impares de estas frecuencias. La combinación de la señal fundamental de 60 ciclos más las otras señales de frecuencias múltiples de la fundamental, dan como resultado la señal cuya forma de onda corresponde a la corriente en este caso de una carga no lineal.

Estas señales de frecuencias diferentes de la frecuencia fundamental son conocidas como señales armónicas, en resumen una carga no lineal se comporta como generador de corrientes armónicas, éstas corrientes pueden interactuar con la impedancia de la red eléctrica en la que se encuentran y producir una deformación en la señal de tensión, es decir que el voltaje deje de ser un señal puramente senoidal, de esta forma puede tener señales armónicas en corriente y señales armónicas en voltaje en una red. Es importante mencionar que para limitar las señales armónicas en voltaje, es necesario reducir las señales armónicas en corriente, dado que estas últimas son las que generan la distorsión armónica en voltaje.

Cuando los niveles de distorsión son importantes se llegan a producir diversas manifestaciones en el resto del sistema eléctrico, así podemos hablar de sobrecalentamiento de transformadores y motores, disparos involuntarios de protecciones como son interruptores o relevadores, zumbidos y vibraciones en las máquinas eléctricas, pérdida de información en los equipos de cómputo, ruido y altos niveles de distorsión en los sistemas de telecomunicaciones, etc., todos estos problemas producen pérdidas, tanto en tiempo como en dinero.

A. Fuentes de Armónicas.

Los equipos que a continuación se mencionan generan armónicas, de diferentes niveles y composición, en la red eléctrica que los alimenta:

↳ Máquinas Eléctricas.

Generadores.

Motores.

↳ Transmisión y distribución.

Transformadores.

Convertidores HVDC.

Compensadores estáticos de VARs.

- ↳ **Equipo industrial.**
 - Convertidores estáticos de potencia AC/DC.
 - Controles electrónicos de velocidad variable.
 - Hornos de arco, soldadoras de punto, etc.

- ↳ **Equipo residencial y comercial.**
 - Circuitos rectificadores a base de diodos.
 - Equipo de computo.
 - Fuentes conmutadas.
 - Controladores de carga a base de tiristores.

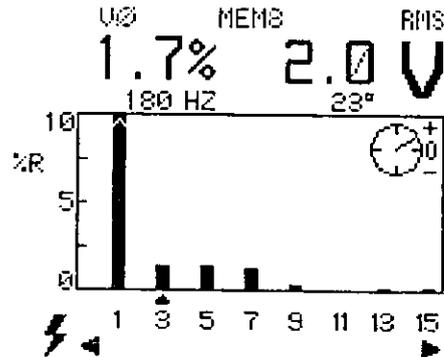
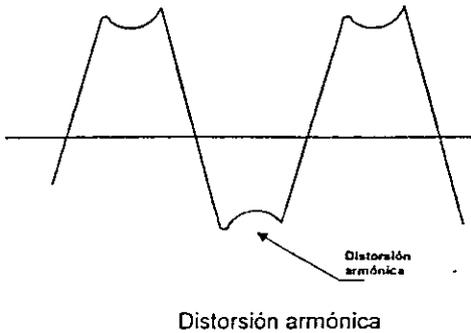
B. Efectos de las Armónicas en los equipos Eléctricos.

La presencia de corrientes y voltajes armónicos, degradan el funcionamiento del sistema eléctrico y sus componentes en varias formas.

- ↳ **Efectos a Largo Plazo**
 - ❖ **Efectos electromagnéticos**
 - Pérdidas por histéresis y corrientes de Eddy.
 - Efecto piel (skin)
 - Interferencia inductiva
 - ❖ **Interferencia con la operación de control, protección, equipo electrónico y de comunicación.**
 - ❖ **Degradación dieléctrica prematura.**
 - Efectos de alta frecuencia
 - Incremento en la tensión pico.
 - ❖ **Incremento en las pérdidas de cobre y calentamiento.**

- ↳ **Efectos a corto plazo**
 - ❖ **Contribuyen a la caída de Tensión en sistemas débiles.**

- ❖ Mediciones incorrectas
- ❖ Condiciones de resonancia que pueden causar fallas, malfuncionamiento o pueden forzar una operación ineficiente.



6. RUIDO ELECTRICO.

El ruido eléctrico, son señales eléctricas adicionales de alta frecuencia, que producen efectos no deseables en los circuitos de control en que se presentan. Existe ruido eléctrico de diferentes tipos como son los siguientes:

⚡ Ruido en modo común.

Es un ruido en voltaje que aparece balanceado y en fase con la corriente de los conductores a tierra.

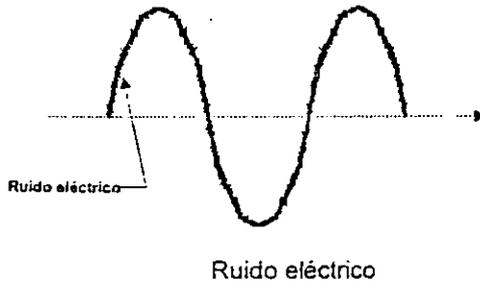
⚡ Ruido en modo transversal.

Señales de ruido múltiples entre los conductores de potencia activa que alimentan a una carga pero no entre los conductores de tierra o de referencia que existan en el circuito.

A. Efecto del ruido eléctrico en redes y equipo eléctrico y electrónico.

Produce mal funcionamiento de equipos electrónicos debido a cambios en los voltajes de referencia, errores en la electrónica digital, errores en datos.

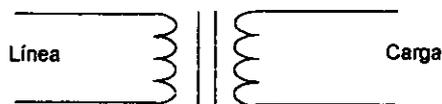
También puede producir interferencia telefónica si tienen valores por arriba de los niveles máximos sugeridos.



7. DISPOSITIVOS COMUNMENTE UTILIZADOS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

A. Transformadores de Aislamiento

Los transformadores de aislamiento son uno de los dispositivos más ampliamente utilizados para mejorar la potencia. Esquemáticamente



Tiene dos devanados separados: el primario (entrada) y el secundario (salida).

Este tipo de transformador proporciona diferentes funciones:

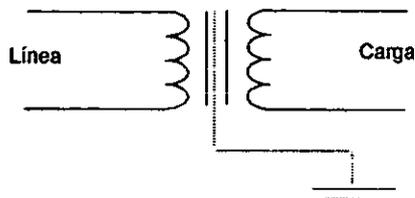
- ↳ Una es la habilidad para transformar o cambiar el nivel de voltaje entrada-salida y/o compensar por alto o bajo el voltaje en el sitio.

- ↳ Otra función de los devanados separados es proporcionar un lugar para establecer la referencia a tierra de la potencia cerca del punto de utilización. Esto reduce enormemente el ruido en modo común inducido a través de los "lazos de tierra".

Reduciendo así las corrientes armónicas alimentadas hacia la fuente por las cargas trifásicas no lineales.

Cuando se usa un transformador de aislamiento con el primario en delta y el secundario en estrella para alimentar una carga, las corrientes armónicas triples circulan en el delta del primario, de tal suerte, que no son vistas por la fuente de potencia.

Para el propósito del acondicionamiento de la potencia, los transformadores de aislamiento deben equiparse con escudos electrostáticos (Faraday) entre los devanados del primario y secundario como se usa en la siguiente figura:



Un escudo electrostático es una hoja conductora de material no magnético (cobre o aluminio) conectada a tierra, que reduce el efecto del acoplamiento capacitivo entre los devanados primario y secundario y mejora la habilidad del transformador para aislar su carga del ruido de modo común presente en la fuente de potencia de entrada.

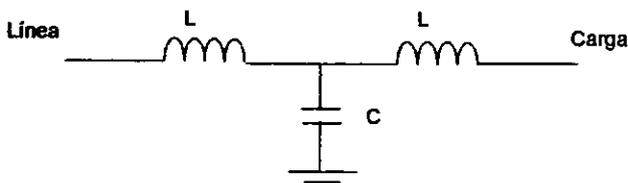
Existen transformadores especialmente acondicionados, conocidos como "super aislantes" o "ultra aislantes", que están equipados con escudos adicionales alrededor de cada devanado para reducir aún más el ruido de modo común.

Los transformadores de aislamiento no proporcionan ninguna regulación de voltaje y, de hecho, causarán una degradación adicional de la regulación de voltaje debido a su impedancia en serie. Los transformadores de aislamiento tienden a ser muy eficientes (95-98 %) así que generan poco calor y son relativamente silenciosos.

Los transformadores de aislamiento se pueden instalar en forma separada o con transformadores de distribución de potencia. Al ubicarlos con interruptores de distribución tienen la ventaja de poder ubicarse muy cerca de la carga crítica. Otras ventajas adicionales de estas unidades son supresión extra de ondas y ruido, distribución integrada, monitoreo. Estos tipos de transformadores por su eficiencia y características, son muy utilizados en centros de cómputo así como en hospitales.

B. Filtros contra ruido.

Tienen la función de reducir la interferencia electromagnética y la interferencia por radio frecuencia. La siguiente figura muestra un filtro LC.



Los filtros se pueden usar para prevenir interferencia de ondas viajeras hacia el equipo que vienen de la fuente de potencia así como también previene al equipo que genera interferencia hacia la línea de potencia. La mayoría de los equipos

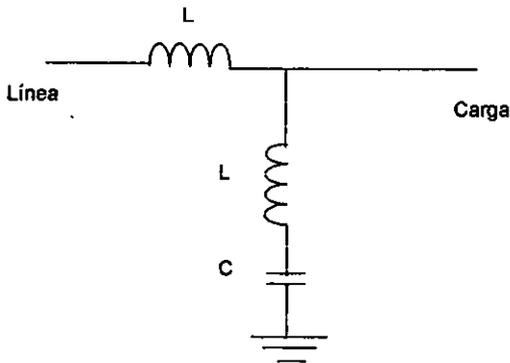
electrónicos sensibles tienen alguna forma de filtros para limitar el ruido de alta frecuencia.

La forma más simple de un filtro es un "pasa baja" diseñado para dejar pasar el voltaje de 60 Hz y bloquear las frecuencias muy altas o las ondas con frentes escarpados. Estos dispositivos contienen inductores en serie seguidos de capacitores a tierra. El inductor forma una trayectoria de baja impedancia para la potencia de la fuente de 60 Hz, pero una trayectoria de muy alta impedancia para el ruido de alta frecuencia. El capacitor conduce el ruido de alta frecuencia restante antes de alcance la carga.

Los filtros pueden conectarse entre fases o de fase a neutro para el rechazo de ruido en modo transverso. También se pueden conectar entre fase y tierra para reducir el ruido en modo común. Los filtros cuando no se usan en forma apropiada pueden producir un efecto resonante que puede ser peor que el ruido que se intentaba filtrar con ellos.

C. Filtros de corrientes armónicas.

Los filtros de corrientes armónicas se usan para prevenir que las armónicas que provienen de las cargas electrónicas no lineales se introduzcan de regreso en el servicio, donde causan calentamiento de conductores y transformadores y las correspondientes distorsiones de voltaje. Una variante de este tipo de filtro se muestra en la siguiente figura:



El filtro se coloca en serie con la carga y la "trampa" se sintoniza para la armónica predominante. Estos filtros pueden ser muy efectivos para reducir las corrientes armónicas en su fuente y eliminando la necesidad de otros cambios para compensar los problemas causados por las armónicas.

D. Supresores de Onda.

Los supresores de onda abarcan una amplia categoría de dispositivos, desde los apartarrayos hasta los pequeños supresores para proteger dispositivos enchufables. La protección de ondas efectiva requiere el uso coordinado de dispositivos divisores de corriente de gran capacidad en la entrada del servicio seguidos de dispositivos progresivamente más pequeños que atrapan el voltaje. Los dispositivos a la entrada están pensados para bajar el nivel de energía de una onda muy grande a un valor tal que pueda ser manejada por otros dispositivos más cerca de las cargas. Si no se tiene una coordinación bien hecha, el exceso de energía puede destruir los supresores instalados y dañar el equipo instalado.

Los supresores de onda son dispositivos generalmente simples, y relativamente de bajo costo. Usualmente contienen varistores de óxido de metal, diodos de avalancha u otros dispositivos que atrapan el voltaje y que se conectan a través de la línea de potencia, de la terminal del voltaje de una fase a otra o a tierra. Los supresores absorben o desvían la energía de sus fuentes que excede el voltaje frontera (típicamente 100% arriba del voltaje nominal).

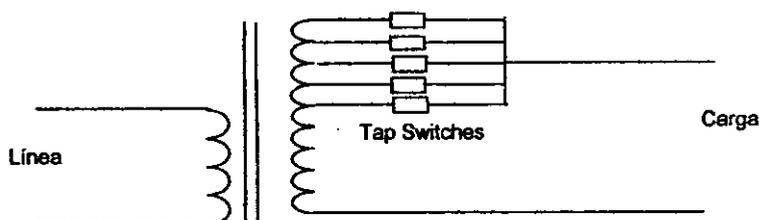
E. Reguladores de voltaje.

La mayoría de las perturbaciones de baja frecuencia, se pueden manejar con una aplicación adecuada de un regulador de voltaje. En la actualidad existen varios tipos de reguladores de voltaje como los transformadores de voltaje constante y los cambiadores de taps.

Los primeros reguladores electromecánicos generalmente tienen un motor operador que mueve un tap deslizante en el transformador. Estos reguladores son lo suficientemente rápidos para seguir los cambios de voltaje que se presentan durante el día o en forma estacional debido a la conexión y desconexión de cargas. Estas unidades no son adecuadas para proteger cargas electrónicas sensibles contra las variaciones rápidas de voltaje.

A. Cambiadores de Taps.

Los reguladores de respuesta rápida se dividen en dos clases genéricas, cambiadores de taps y de carga e incremento (buck-boost). El primero es el regulador cambiador que se muestra en la siguiente figura:

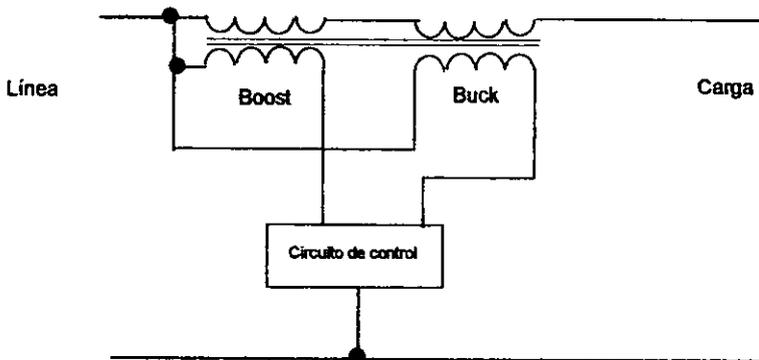


Los cambiadores de taps se diseñan para ajustar los voltajes variables de entrada. Algunos modelos hacen el cambio de tap cuando el voltaje pasa por cero, lo que causa que se genere un transitorio excepto cuando la carga tiene un factor de potencia uno. El número de taps determina la magnitud de los pasos y el rango de regulación posible. Un regulador de buena calidad tendrá cuando menos 4 taps abajo del normal y 2 taps arriba del normal para un total de 7 pasos. Los taps son generalmente pasos entre 4 y 10%, dependiendo de los diseños específicos. El tiempo de respuesta es usualmente de 1 a 2 ciclos y está limitado a esa velocidad debido al criterio de hacer la conmutación con corriente cero. Un tiempo de sensado práctico y la estabilidad del sistema de control limitan típicamente el tiempo de corrección de 3-5 ciclos.

Este tipo de transformador introduce poca distorsión armónica cuando opera en estado estable y minimiza los disturbios inducidos en la carga en comparación con los reguladores de voltaje.

G. Buck-Boost

La segunda clase de reguladores de respuesta rápida es el tipo electrónico buck-boost, como se muestra en la siguiente figura:



**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Utiliza un control tiristorizado de transformadores en combinación con filtros paramétricos para proporcionar una salida digital aún con cargas no lineales típicas en sistemas de cómputo.

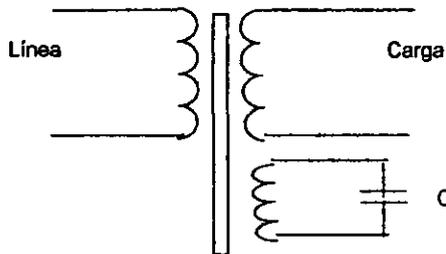
Esto se hace de manera suave y continua, eliminando los pasos inherentes en el cambiador de taps. Las unidades pueden estar equipadas a la entrada, con un transformador de aislamiento con escudos electrostáticos que proporcionan la reducción del voltaje y atenuación del ruido de modo común.

La potencia se alimenta al regulador que agrega o resta del voltaje de llegada de tal manera que el voltaje de salida se mantiene constante para variaciones del

15 al 20% del voltaje de entrada. Esto se hace comparando el voltaje de salida con el nivel deseado y usando una retroalimentación para modificar el nivel de incremento o de resta de tal manera que se mantiene el nivel deseado.

H. Transformadores de Voltaje Constante.

Un tipo común de regulador es el transformador de voltaje constante (CVT). El siguiente esquema representa una topología de diseño de un transformador de este tipo:



Esta clase de reguladores usa transformadores saturables con circuitos resonantes formados con la inductancia del transformador y del inductor.

El regulador mantiene un voltaje casi constante en la salida para un voltaje de entrada que oscila entre un 20 y 40%. Estas unidades son confiables porque no contienen partes electrónicas móviles o activas. Si estas unidades se construyen con aislamiento, pueden proporcionar una reducción para el ruido en modo común y proporcionar una fuente derivada por separado para una conexión local a tierra de la potencia. Los transformadores de voltaje constante drenan corriente todo el tiempo, esta corriente se debe al circuito resonante y causa que estas unidades sean menos eficientes con cargas bajas, en comparación con otros tipos de reguladores. Algunas de estas

unidades son muy ruidosas y requieren empacarse en contenedores antes de que sean instaladas.

I. Motor - Generador.

Los grupos motor generador, proporcionan la función de un acondicionador de línea y también pueden proporcionar la conversión de la frecuencia de entrada a una diferente frecuencia requerida por la carga. El siguiente esquema representa una configuración de motor-generador:



Estas unidades consisten de un motor eléctrico energizado desde la fuente que impulsa un generador que suministra voltaje a la carga. El motor y el generador están acoplados por una flecha o por bandas. Este acoplamiento totalmente mecánico entre la entrada y la salida permite que el grupo M-G proporcione un aislamiento total al ruido entre la fuente de potencia y la carga.

Los grupos M-G aislados por una flecha o por bandas se usan ampliamente como una fuente de potencia de 415 Hz para alimentar computadoras grandes que requieren esta frecuencia. Los grupos M-G protegen a la carga de las sags, swells y ondas de voltaje. Para cambios en el voltaje de línea de más o menos 20 a 50%, el voltaje en la carga se mantiene aún en el valor nominal.

J. Fuentes de Poder Ininterrumpibles (UPS).

Las UPS's están pensadas para proporcionar a la salida una potencia regulada independientemente de la condición de la fuente de poder a la entrada, incluyendo todas las salidas de potencia.

CAPÍTULO IV

Apart arrayos.

1. ANTECEDENTES.

En la protección de sistemas de Distribución Aéreas y Subterráneas, una práctica comúnmente utilizada ha sido la de instalar apartarrayos autovalvulares o de óxido de zinc, conectados entre las terminales del equipo a proteger y tierra. Este método de Protección ha demostrado ser efectivo cuando existe un aterrizamiento de baja resistencia en el sistema de distribución.

Para los apartarrayos Autovalvulares existen criterios bien definidos, mientras que en los apartarrayos de Óxido de Zinc se ha presentado la necesidad de actualizar la metodología de pruebas debido principalmente a las características intrínsecas del material involucrado. Por lo anterior, se presenta la necesidad de establecer un análisis comparativo entre los dos tipos de apartarrayos, desde el punto de vista de operación, principio de funcionamiento y niveles de protección para obtener un nivel adecuado de aislamiento del sistema.

Los apartarrayos son dispositivos de protección, que proveen un camino a tierra a casi toda la corriente de impulso, originada por una sobretensión que puede ser una descarga atmosférica en el sistema, de tal manera que las sobretensiones son disminuidas, y no penetran al equipo protegido.

Los apartarrayos dentro del sistema eléctrico realizan dos funciones:

- 1.- Actúan como aisladores en condiciones normales
- 2.- Como conductores cuando existe una sobretensión.

Para cumplir eficientemente los dos comportamientos, es necesario que cuenten con un elemento de características no-lineales. Este elemento ya sea de Carburo de silicio o de óxido de zinc, se encargará de efectuar las siguientes funciones:

- 1.- Conducir a tierra la corriente producida por una sobretensión generada.

2.-Soportar la sobretensión con el mínimo cambio posible en su tensión nominal.

3.- Suprimir la conducción y volver a su estado original.

Las sobretensiones en la línea y en los equipos eléctricos son fenómenos indeseables ya que al presentarse dañan y envejecen a los aislamientos provocando grandes pérdidas económicas.

En estudios realizados en la Ciudad de México en lo referente al fenómeno de las sobretensiones de origen externo se encontró que el nivel de descargas atmosféricas para las diferentes zonas va desde 8 kA en el norte, 14 kA en el centro y 20 kA para la zona sur, la longitud promedio del rayo es de 3.5 km, induciendo potenciales en la línea hasta 10 km.

Por esto es necesario conocer a fondo los apartarrayos, para darles un buen uso y que nos den una protección adecuada contra las sobretensiones de origen atmosférico.

2. CONCEPTOS GENERALES

Se denominan, en general, apartarrayos a los dispositivos destinados a descargar las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, por maniobras, o por otras causas que, en otro caso se descargarían sobre los aisladores o perforando el aislamiento, ocasionando interrupciones en el sistema eléctrico y, en muchos casos, desperfectos en los generadores, transformadores, etc....

Para que su funcionamiento sea eficaz, los apartarrayos han de estar permanentemente conectados a las líneas, pero solamente han de entrar en funcionamiento cuando la tensión alcance un valor conveniente y superior, a la de la tensión de servicio, es decir que un apartarrayos actúa a la manera de una válvula de seguridad.

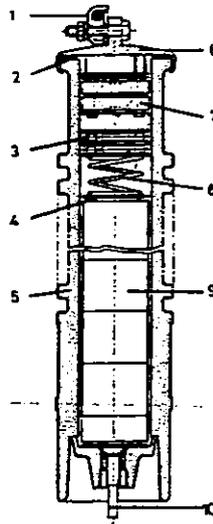
Como en las primeras instalaciones en que se emplearon estos dispositivos, su misión fundamental era limitar las sobretensiones de origen atmosférico, recibieron el nombre de apartarrayos. Posteriormente se amplió su misión, utilizándose para proteger las instalaciones contra las sobretensiones de origen interno.

3. APARTARRAYOS AUTOVALVULARES.

El apartarrayos tipo autovalvular consiste básicamente en un entrehierro y una resistencia no lineal. El entrehierro aísla la línea de tierra en condiciones normales de operación y es capaz de descargar corrientes transitorias a tierra con una tensión de descarga baja; asimismo, la resistencia ofrece una alta impedancia a la corriente que sigue a la transitoria.

Una de las partes esenciales de los apartarrayos autovalvulares es el explosor, el cual tiene una doble misión: debe aislarse en caso de aparición de la sobretensión y, después debe suprimir la corriente de fuga, después del amortiguamiento de la onda de sobretensión. Esta doble misión está encomendada a dos explosores conectados en serie y denominados, respectivamente, explosor de aislamiento y explosor de extinción. En los primeros apartarrayos de este tipo el explosor de aislamiento estaba constituido por dos semiesferas, cuya distancia disruptiva era ajustable y dependía de la tensión de aislamiento; en estos primeros modelos se utilizaban electrodos planos, con interposición de discos aislantes. El gran inconveniente de este sistema era el valor relativamente pequeño de la capacidad de las dos semiesferas, con relación a la de los electrodos planos, de lo que resulta un defectuoso reparto de tensión, ya que el explosor de aislamiento recibía la mayor parte de la tensión. Por esta razón, esta disposición fue abandonada y sustituida por el sistema de electrodos planos apilados, sin dispositivo de aislamiento separado.

Como ejemplo de este tipo de apartarrayos, tenemos el siguiente modelo:



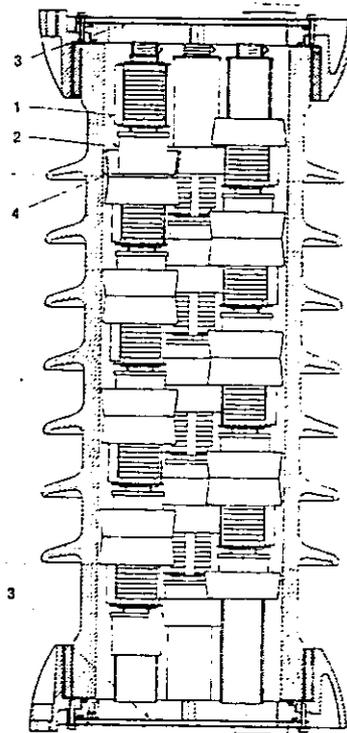
- 1 Borne de fijación.
- 2 Junta.
- 3 Explosor de extinción.
- 4 Placa de contacto.
- 5 Aislador de porcelana.
- 6 Cabeza.
- 7 Explosor de aislamiento.
- 8 Resorte.
- 9 Bloque autovalvular.
- 10 Borne de conexión a tierra.

Las partes principales que constituyen este apartarrayos son las siguientes:

- ✦ Explosor de aislamiento. Este explosor aísla de la línea los elementos del apartarrayos para las tensiones normales de servicio, pero se aísla cuando aparece una sobretensión que sobrepasa el voltaje nominal de operación.
- ✦ Explosor de extinción. Una serie de explosores, cuya separación entre electrodos está mantenida por anillos aislantes, tiene como misión interrumpir la corriente de fuga, cerrando el camino conductor abierto por la corriente de descarga.
- ✦ Bloque autovalvular. Este bloque tiene una característica de tensión-corriente, no lineal y se comporta como una resistencia de pequeño valor cuando es recorrido por corrientes elevadas, limitando de esta forma la caída de resistencia en los bornes del apartarrayos durante el curso de la descarga.
- ✦ Conexión de tierra. Una de las particularidades de este modelo de apartarrayos es el dispositivo de conexión a tierra. Cuando se avería un apartarrayos a causa de una sobrecarga eléctrica funciona el dispositivo de conexión a tierra,

desconectando el cable de conexión a tierra, y poniendo de esta forma el apartarrayos fuera de servicio, lo que evita un defecto línea-tierra en la red.

Otro tipo de apartarrayos autovalvular , utiliza el soplado magnético. Este dispositivo se ilustra a continuación:

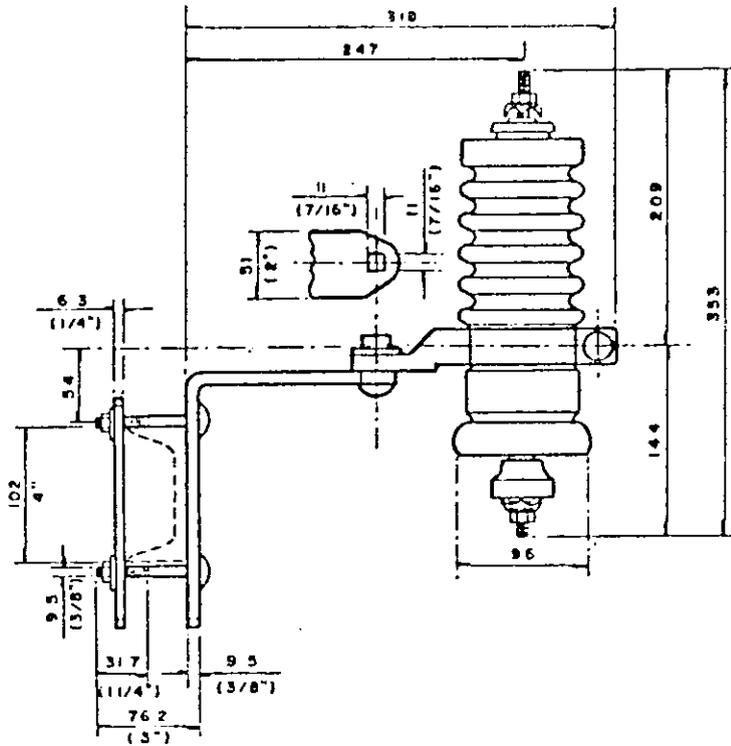


- 1 Explosor.
- 2 Resistencia de carga.
- 3 Membrana.
- 4 Capa aislante.

El principio de funcionamiento es el soplado del arco, por medio de un campo magnético propio o exterior. El desplazamiento del arco limita el calentamiento del explosor, de forma que los electrodos no se queman. Además, el medio ambiente refrigera al arco, lo que, por el forzado equilibrio de las temperaturas, eleva la tensión del arco.

El campo magnético de soplado es producido por bobinas dispuestas a una y otra parte de las placas de las cámaras de extinción; estas bobinas están protegidas por un explosor en paralelo.

A continuación se presenta la ilustración de un apartarrayo autovalvular que utiliza la Compañía de Luz y Fuerza del Centro en sistemas de distribución en el Distrito Federal.



Acotaciones en cm.

CARACTERISTICAS

- GENERALES

Clase	Distribución serie B.
Servicio	Intemperie.
Tensión.	6 kV.
Frecuencia Nominal.	60 Hz.
Altitud de operación.	2300 msnm.
Tipo.	Valvular
Corriente Nominal de Descarga	5 kA.
Indicador de Descarga	Dispositivo de desconexión automática, que indica que ha sido dañado.

- ELÉCTRICAS

NBA al impulso	60 kV, onda de 1.2x50 μ s.
Tensión de flameo en seco.	21 kV a 60 Hz, 1 minuto.
Tensión de flameo en húmedo.	20 kV a 60 Hz, 10 segundos.
Tensión Máxima de descarga, frente de onda.	44 kV cresta.
Tensión máxima de descarga, onda completa.	40 kV cresta.
Tensión de descarga a frecuencia nominal.	Mayor de 9 kV.
Tensión máxima residual para 5 kA.	31 kV cresta
Alta corriente al impulso.	65 kA.
Baja corriente al impulso.	74 A.
Ciclo de trabajo	20 operaciones con descarga de 5 kA.

- USO.

Fijado en cruceta 44 y conectado a línea de 6 kV y a tierra mediante cable 4 y 1/0 AWG, protege contra sobretensiones al equipo eléctrico conectado a líneas de 6 kV.

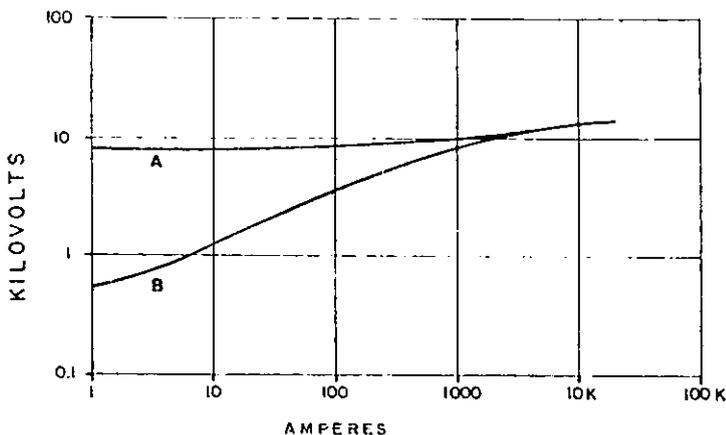
A. Funcionamiento de los apartarrayos autovalvulares.

Cuando ocurre una descarga atmosférica, las válvulas conducen una corriente aproximadamente igual a:

$$I = K V^n$$

donde n fluctúa entre 4 y 6 para el carburo de silicio y K es una constante que depende del diseño y especificación del apartarrayos. A medida que la tensión aumenta por arriba de la tensión nominal la corriente se incrementará rápidamente (en función de n) causando un calentamiento adicional y un aumento en el valor de la corriente. Por tanto, cualquier pequeño incremento en la tensión por arriba de la nominal puede resultar en una incapacidad entre los entrehierros en disipar corrientes mayores para las que están diseñadas. Esto a su vez causará reigniciones que podrían provocar fallas severas en el apartarrayos. Estas válvulas varían inversamente proporcional a la tensión aplicada y están fabricadas de carburo de silicio.

La siguiente ilustración muestra las características de operación en función de la tensión aplicada (Curva B).



Los bloques generalmente se fabrican en rangos entre 3 kV y 6 kV ; la clase de apartarrayos y diseño del diámetro dependerán de la energía de descarga requerida.

La corriente de descarga puede alcanzar niveles de miles de amperes durante una sobretensión debida a descargas atmosféricas, disminuyendo posteriormente a cientos de amperes una vez que la sobretensión se ha disipado. Los entrehierros del apartarrayo deben ser capaces de interrumpir esta "corriente posterior" y permanecer sellados contra cualquier sobretensión momentánea que persista en las terminales del apartarrayo.

Los apartarrayos están sometidos a dos tensiones:

- 1) La tensión de operación del sistema.
- 2) Las sobretensiones que producen las descargas atmosféricas.

En condiciones normales de operación, el entrehierro permite que pase una pequeñísima corriente a tierra; cuando se produce una sobretensión, el aire del entrehierro se ioniza, y, cuando finalmente se produce el arqueo, la resistencia del entrehierro se hace cero. Ante esta condición la resistencia presenta poca oposición y permita que la corriente transitoria fluya libremente. Después de que la corriente transitoria ha pasado, la tensión del elemento regresa a su valor normal, su valor de resistencia se eleva, quedando listo para iniciar otro ciclo de operación.

La tensión de chispeo se refiere a la iniciación del ciclo de protección del apartarrayos. El chispeo ocurre cuando la sobretensión alcanza el nivel al que se produce el arco en el entrehierro para complementar el circuito de descarga a tierra. El chispeo de un apartarrayos no se debe confundir con el flameo; este se

refiere al arqueo que se produce en la superficie exterior de la porcelana que forma el cuerpo del apartarrayos cuando esta superficie se encuentra muy contaminada.

El entrehierro lleva a cabo una función muy importante en la protección contra sobretensiones. Cuando se inicia la protección del apartarrayo no solamente fluye a tierra la corriente sino también una corriente de 60 Hz , conocida como "corriente posterior al transitorio". Dicha corriente se debe extinguir inmediatamente, siendo esto función de la capacidad del elemento resistivo para restringir el flujo de corriente a un nivel tal que el entrehierro pueda extinguirla por completo al siguiente cero de su variación senoidal. El entrehierro se puede comparar con un interruptor de velocidad extremadamente alta que inicia y termina el ciclo protector del apartarrayo, o sea que descarga a tierra la energía excedente del sistema, limitando la sobretensión a un nivel que no sea peligroso para el equipo. La operación de un apartarrayo se realiza en tres etapas:

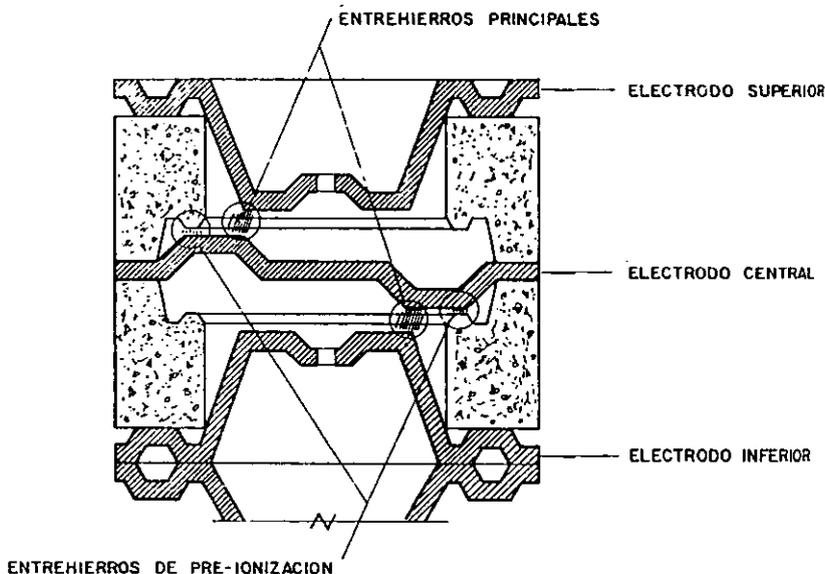
- 1) Chispeo
- 2) Descarga de la corriente transitoria.
- 3) Interrupción de la corriente de 60 Hz posterior al transitorio.

La descarga ocurre a través de una trayectoria de baja resistencia compuesta por el circuito serie de los entrehierros y elementos valvulares .

Los apartarrayos están expuestos a un amplio rango de corrientes transitorias de descarga, y con base a estudios en campo, se espera que el promedio de corrientes de descarga en los apartarrayos sea del orden de 1kA a 2kA, solamente el 5% de las descargas exceden 9 kA y 0.01% excede 20 kA.

La durabilidad de los apartarrayos se evalúa de acuerdo con su capacidad para soportar dos condiciones diferentes de descarga: ante corrientes producidas por sobretensiones atmosféricas y ante corrientes originadas por sobretensiones por operación de equipos de seccionamiento.

A continuación se muestra los entrehierros de un apartarrayos tipo autovalvular.



B. Clasificación de los apartarrayos autovalvulares.

Los apartarrayos autovalvulares se clasifican en tres clases:

- Estación.
- Intermedia.
- Distribución.

Los apartarrayos clase estación son los más costosos y presentan las mejores características para efectos de coordinación de aislamiento; tienen la menor tensión de descarga y capacidad para soportar las más altas corrientes de descarga. Se emplean principalmente para proteger subestaciones de alta tensión.

Los apartarrayos de clase intermedia se emplean en subestaciones de mediana tensión y para proteger algunos circuitos de distribución subterránea, y acometidas.

La clase distribución son los menos costosos y se emplea para la protección de equipos y líneas.

B. Selección de los apartarrayos autovalvulares.

El concepto que define el grado de protección que debe ofrecer un apartarrayos , se conoce como margen de protección (MP). Para sobretensiones causadas por descargas atmosféricas se recomienda un valor de 20 % mínimo.

A continuación se muestra gráfica y matemáticamente este concepto:

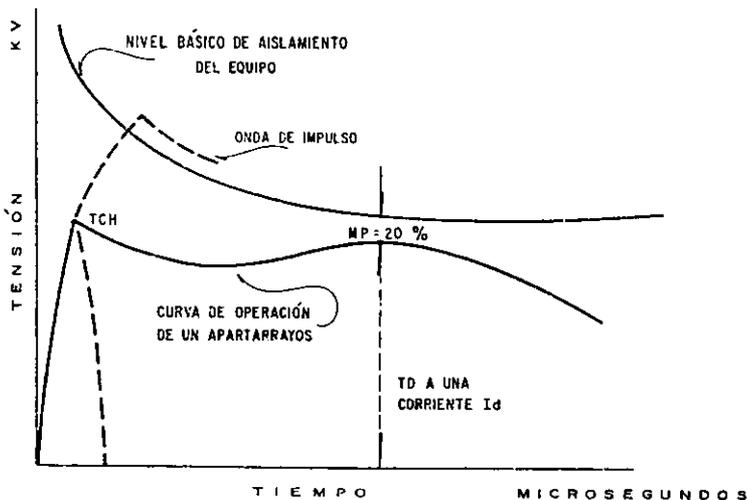
$$MP = \frac{NBAI}{TD + TCT} - 1 \quad (\%)$$

Donde:

NBAI = Nivel Básico de Aislamiento.

TD = Tensión de Descarga del Apartarrayos.

TCT = Tensión inducida en los cables de conexión del apartarrayos = 5.2 kV/m.



Margen de protección de un apartarrayos tipo autovalvular.

Existen dos criterios normalizados para calcular los márgenes de protección:

$$MP1 = \frac{1.15 \text{ NBA} - \text{TCH}}{\text{TCH}} \quad (\%)$$

$$MP2 = \frac{\text{NBA} - (\text{TD} + \text{TCT})}{\text{TD} + \text{TCT}} \quad (\%)$$

Para determinar si el aislamiento del equipo está protegido adecuadamente se deben realizar las siguientes comparaciones:

$$\begin{aligned} \text{TCH} + 0.2\text{TCH} &< 1.15 \text{ NBA} \\ \text{TD} + \text{TCT} + 0.2(\text{TD} + \text{TCT}) &< \text{NBA} \end{aligned}$$

donde TCH = tensión de chispeo.

4. APARTARRAYOS DE ÓXIDO DE ZINC.

En la actualidad este tipo de apartarrayos es uno de los últimos dispositivos desarrollados para la protección contra sobretensiones, este tipo de protección, presenta mejores características que los apartarrayos autovalvulares y ha ido desplazando a este tipo.

El material con que se fabrican este tipo de apartarrayos es de óxido de zinc (ZnO), el cual presenta mejores características de no-linealidad que los apartarrayos autovalvulares.

Debido a sus excelentes características de no-linealidad y sus bajas pérdidas a tensiones nominales de operación, ha sido factible no utilizar entrehierro, lo que

permite reducir de manera considerable el tamaño de estos equipos, y como consecuencia de esto también reducir su peso.

Sus características tensión-corriente permiten a este apartarrayos descargar únicamente a un valor de corriente predeterminado, lo que hace posible mantener a un nivel de protección al sistema.

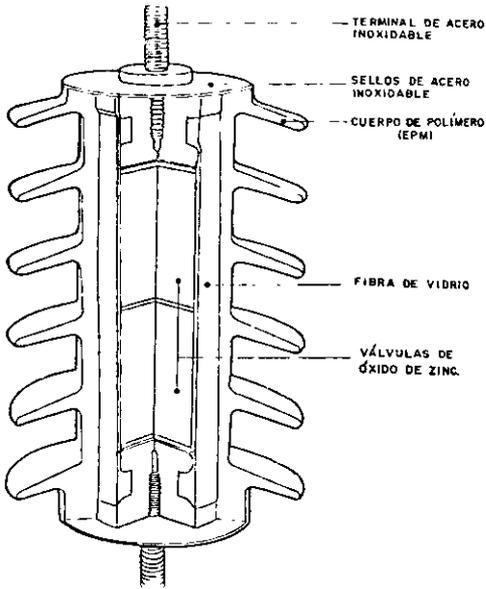
En forma general se pueden resumir las ventajas de este apartarrayos, con respecto a la de los apartarrayos autovalvulares, y son las siguientes:

1. Mejor operación en el ciclo de trabajo.
2. Mayor capacidad en la disipación de energía.
3. Capacidad de protección mejoradas.
4. Capacidad de resello a una sobretensión superior.
5. Mejor confiabilidad debido a su diseño simple.
6. Menor tamaño.
7. Menor peso.

El varistor de óxido de zinc presenta una microestructura muy compleja, está compuesta a base de granos de óxido de zinc moderadamente conductores, envueltos en una matriz altamente resistiva. Este material resistivo está hecho principalmente de pequeñas cantidades de óxidos metálicos, tales como:

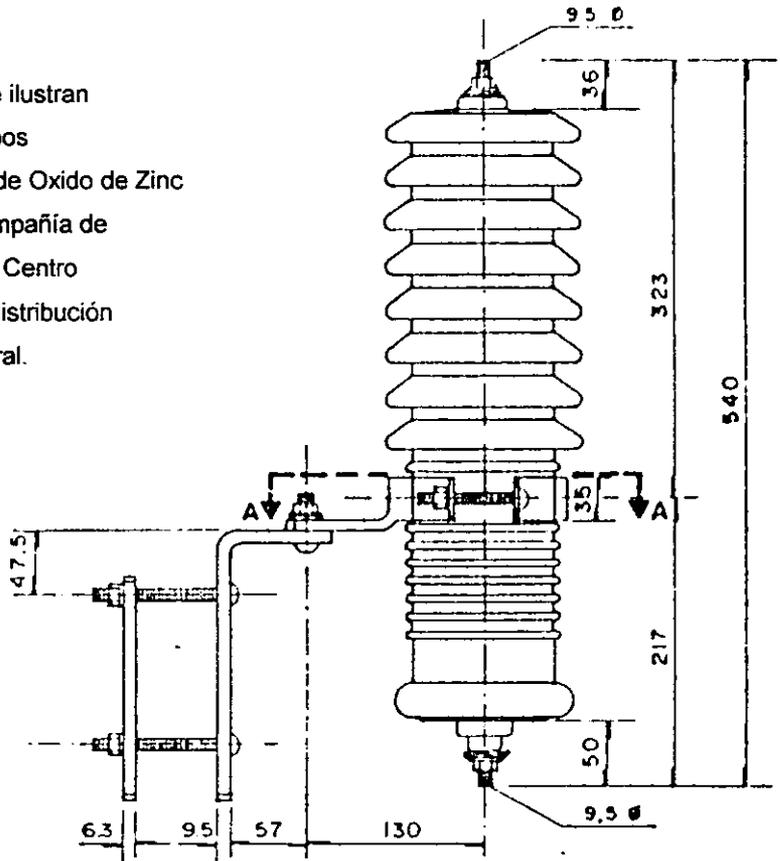
- Óxidos de Bismuto.
- Antimonio.
- Cobalto.
- Manganeso.

El comportamiento de no linealidad surge de la formación de un proceso de conducción que se desarrolla en los límites de los granos de zinc y la interfase con la matriz de los óxidos metálicos.



Corte de un apartarrayos de óxidos metálicos

A continuación se ilustran dos diferentes tipos de apartarrayos de Oxido de Zinc utilizados por Compañía de Luz y Fuerza del Centro en sistemas de distribución del Distrito Federal.



CARACTERÍSTICAS

- GENERALES

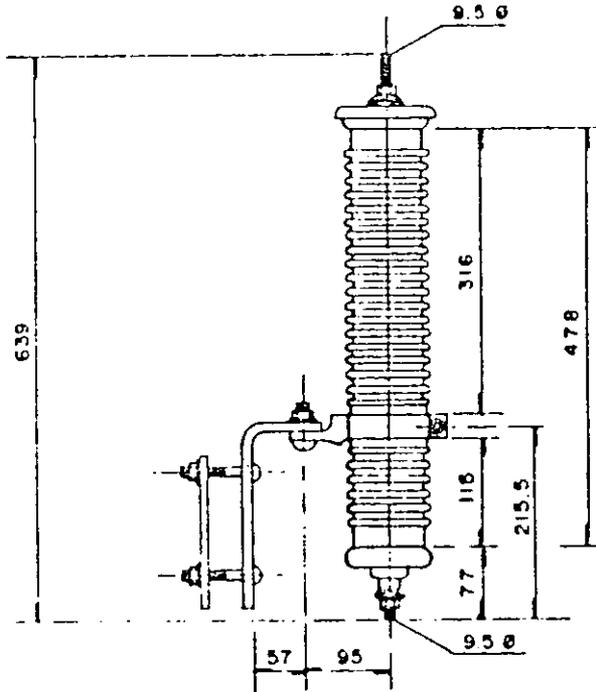
Clase	intermedia
Tipo	Varistor de óxido Metálico (Zinc).
Servicio	Intemperie.
Tensión Nominal	24 kV.
Frecuencia Nominal	60 Hz.
Altitud de operación	2300 msnm.
Tipo de Sistema	"C".
Temperatura Ambiente	Entre 0° C y 40° C.
Condición Ambiental.	Alto grado de contaminación.

- ELÉCTRICAS

CORRIENTE NOMINAL DE DESCARGA	5 KA EN FORMA DE ONDA DE 8X20 μ S
NBA al Impulso a 2300 msnm.	150 kV cresta, Onda de 1.2x50 μ s.
Tensión de flameo a frecuencia nominal	60 kV
Tensión de descarga al impulso equivalente a un rayo.	85 kV, Onda de 8x20 μ s.
Tensión máxima residual con corriente de descarga de 5 kA.	72.5 kV cresta, Onda de 8x20 μ s.
Alta corriente al impulso	65 kA
Baja corriente al impulso	300 A.
Ciclo de pruebas de operación con descarga al impulso de 5 kA cresta.	20 impulsos, Onda de 8x20 μ s.

- USO

Fijado en cruceta 40 ó 630 y conectado a la línea de 23 kV y a tierra con cable Cud 1/0 AWG, en el punto de transición de acometidas aéreo-subterráneas, protege contra sobretensiones al equipo eléctrico subterráneo conectado en la misma línea.



Acotaciones en mm

CARACTERISTICAS.

- GENERALES

Clase	Distribución
Tipo.	Varistor de Óxido Metálico (Zinc).
Servicio.	Intemperie.
Tensión Nominal.	24 kV.
Frecuencia Nominal.	60 Hz.
Altitud de Operación.	2300 msnm.
Tipo de Sistema.	"C".
Temperatura Ambiente.	Entre 0° C y 40° C.
Condición Ambiental.	Alto grado de Contaminación.

- ELÉCTRICAS

Corriente nominal de descarga	5 KA con forma de onda de 8x20 μ s.
NBA de aislamiento a 2300 msnm.	150 kV cresta. Onda de 1.2x50 μ s.
Tensión de flameo a frecuencia nominal.	58.7 kV.
Tensión de descarga al impulso equivalente a un rayo.	104.5 kV, Onda de 8x20 μ s.
Tensión máxima residual con corriente de descarga de 5 kA.	80.4 kV cresta, Onda de 8x20 μ s.
Alta corriente al impulso.	40 kA, Onda de 4x10 μ s.
Baja corriente al impulso.	75 A.
Ciclo de pruebas de operación con descarga al impulso de 5 kA.	20 impulsos, Onda de 8x20 μ s.

- USO

Fijado en cruceta 40 ó 630 y conectado a la línea de 23 kV y a tierra con cable Cud 1/0 AWG, protege contra sobretensiones al equipo eléctrico conectado a la misma línea.



APARTARRAYOS
MONTADO EN ACOMETIDA

CAPÍTULO V

Sistema de pararrayos.

1. ANTECEDENTES

El pararrayos fue inventado por Benjamín Franklin en 1752, el cual consiste en una varilla de metal, terminada en punta, que se coloca en la parte más alta de una construcción a la cual se desea proteger.

Dicha varilla se encuentra conectada a tierra convenientemente mediante un cable. Debido a una propiedad de las puntas eléctricas que las hace acumular las cargas eléctricas, el rayo que salta de una nube cercana tiende instantáneamente a dirigirse hacia la punta del pararrayos. Entonces el rayo es conducido a tierra, donde se disipa sin causar perjuicios.

La principal desventaja de este tipo de pararrayos es que, a menudo, su capacidad de conducción resulta demasiado pequeña. El sistema de pararrayos para que opere con una mayor eficacia es la que utiliza las propiedades combinadas de las puntas y de las pantallas eléctricas. Esta última consiste en una serie de conductores que, se disponen a lo largo de las aristas de la construcción a proteger, formando una red que lo deja resguardado en una especie de "jaula de Faraday".



2. LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Las descargas atmosféricas pueden ocurrir entre nubes o entre una nube y la tierra. La mayor parte de las descargas ocurren entre las nubes o en su interior, pero muchas caen a tierra.

Actualmente, se sabe - como resultado de ciertos procesos que tienen lugar entre las tormentas - que se acumulan las cargas en las nubes y que cargas iguales y opuestas originan los potenciales necesarios para formar un rayo. Cuando se incrementan las cargas, aumenta el potencial entre las nubes y la tierra y, en consecuencia, el gradiente de potencial en el aire (volts por centímetro). Cuando el gradiente excede la resistencia dieléctrica de la porción de aire contenida a través de donde se aplica, el aire se ioniza y se forma un cauce de la nube a la tierra. La guía se dirige a tierra. Mientras el centro de carga de la nube pueda proveer suficiente carga para mantener en el extremo del rayo un gradiente de potencial mayor que la resistencia dieléctrica del aire, la guía comienza su curso. En ocasiones, el gradiente no se mantiene y entonces la guía se disipa, pero la parte de las veces esta se propaga hasta que hace contacto con la tierra o con un objeto sobre ella. La corriente de la guía no es alta; probablemente sea menor que unos cientos de amperes. Su velocidad de propagación es de un 0.05% la velocidad de la luz.

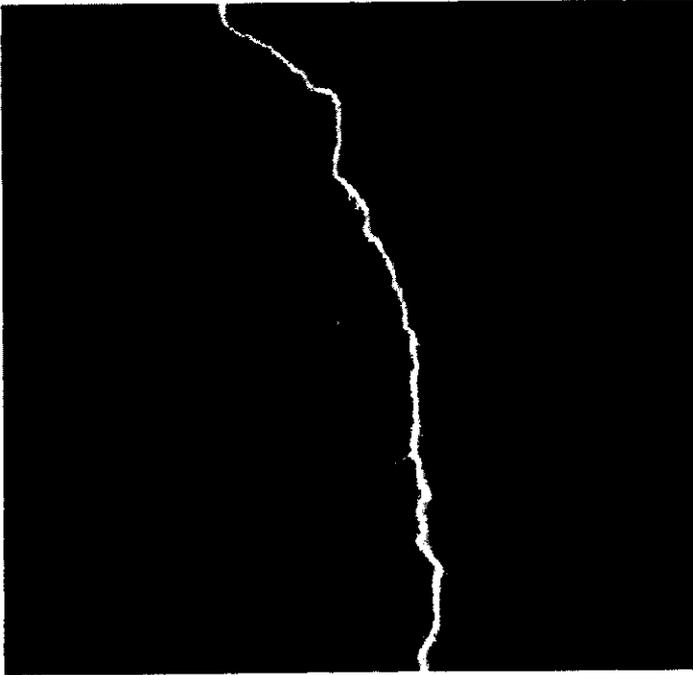
Cuando la guía se aproxima a la tierra se incrementa el campo electrostático y aumenta el gradiente en la superficie de la tierra. Finalmente, éste crece lo suficiente como para provocar una descarga ascendente que se eleva desde la tierra, permitiendo el contacto final en medio de una chispa. Es entonces cuando se produce la gran corriente de los rayos, que en general la siguen otras de menor intensidad pero de mayor duración, en tanto se neutraliza la carga que aún queda en la nube.

Mientras se neutraliza la carga de la nube, decrece su potencial; entonces pueden desarrollarse altos potenciales entre el lugar donde se encontraba originalmente la carga y los otros centros cargados. Como resultado, otros centros de carga pueden descargar en la región de la carga principal, en cuyo caso se presentan descargas subsecuentes a través del canal original, provocando picos de alta corriente. Muchos rayos tienen más de un pico de alta corriente y se conocen como múltiples.

Se ha observado que no hay rayos normalizados en la naturaleza, sino que las corrientes producidas después del contacto varían en gamas muy amplias en todos los aspectos. Lo más regular en la corriente de los rayos es su polaridad: las corrientes de las descargas no son oscilatorias sino unipolares. Considerando que el flujo de corriente es el que va del canal del rayo hacia la tierra, la mayor parte, entre un 80 y 85% de las corrientes son negativas.

Se ha observado también que los picos de alta corriente y corta duración son destructivos en tanto que comúnmente ocasionan daños materiales. Las porciones de baja corriente y relativa duración, en cambio, prenden materiales flamables. Los componentes de alta corriente son los más peligrosos para los sistemas eléctrico - electrónicos, pues producen mayores voltajes que los de baja corriente.

La frecuencia y ocurrencia de descargas varía en todo el mundo. Cambia también en un lugar, mes con mes y año con año. Por este motivo, es necesario estudiar las descargas como un fenómeno probabilístico. Diferentes rayos pueden variar considerablemente en sus magnitudes y formas de onda de las corrientes que inducen y en su duración. La frecuencia de las tormentas y su densidad es asimismo variable en distintos sitios e, incluso, en un área dada, el número de rayos y su severidad varía año con año. Debido a esto las descargas se consideran sobre base estadística.



3 DISPOSITIVOS COMUNMENTE UTILIZADOS EN LA PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Las descargas atmosféricas, pueden caer a tierra ya sea a través de un edificio, una casa habitación o un árbol, es necesario que cada uno de estos elementos posea un Sistema de Pararrayos confiable, para resguardar la seguridad del personal o del equipo.

El objetivo de un pararrayos es el de captar la descarga atmosférica y drenarla lo más rápido a tierra, para que no cause ningún daño tanto al personal o a equipo sensible a este tipo de fenómeno dentro de una instalación.

Para lograr tal objetivo es importante realizar un buen diseño, estos diseños se basan en la norma NFPA 780.

La NFPA (National Fire Protection Association) nace en 1904, y tiene en existencia la norma 780 que es el "Standard para la instalación de sistemas de protección contra rayos".

La forma más común de protección contra rayos es la varilla Franklin, pero en la práctica se le asocia con pantallas eléctricas conocidas como "jaula de Faraday", ofreciendo en conjunto alrededor de un 95% de protección, aunado a esto se debe complementar con un buen sistema de tierras. En el mercado han salido diferentes dispositivos para la protección como la terminal aérea ionizada, así como nueva tecnología francesa, que se rige por sus propias normas.

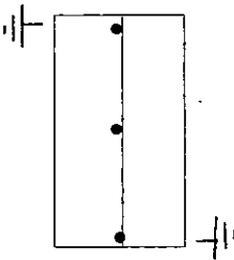
Siguiendo con las recomendaciones de la NFPA , se puede considerar que los edificios se dividen en dos categorías principales:

- 1. Basada en la altura de los edificios
 - Edificios Clase I (Menor a 23 m)
 - Edificios Clase II (Mayor a 23 m)
- 2. Basada en la pendiente de los techos

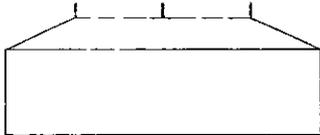
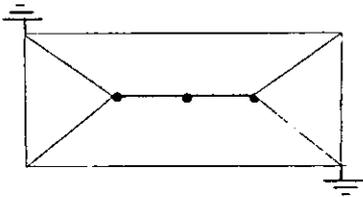
Un edificio de Clase I es todo edificio con una altura inferior de 23 m (75 ft), y un edificio de Clase II es aquel cuya altura rebasa los 23 m (75 ft). Este tipo de clasificación, determina el tipo de conductor que se debe usar ya que los conductores para las estructuras de clase II son de dimensiones más grandes y de

conductancia más alta que los valores mínimos permitidos para los edificios de clase I.

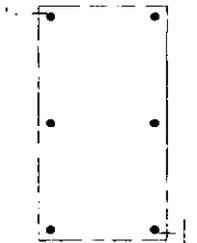
Con referencia a la inclinación o pendiente de los techos, pueden estar clasificados de la siguiente manera:



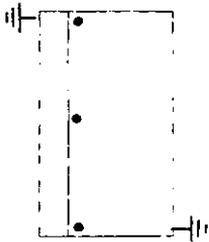
Dos aguas



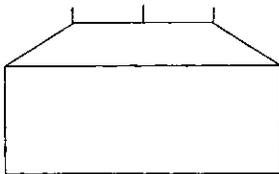
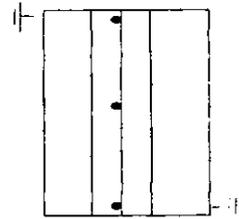
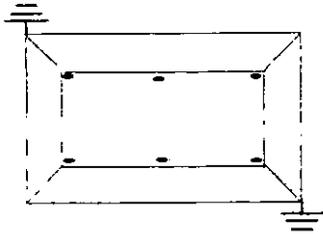
Caballote



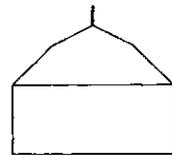
Plano



Dos aguas irregular



Mansarda



Grambel

Una vez definido y clasificado el edificio a proteger, las especificaciones que regirán para su protección serán:

1. Especificaciones sobre materiales.
2. Especificaciones sobre las instalaciones.

4. ESPECIFICACIONES SOBRE MATERIALES.

Con respecto a estas especificaciones, los materiales utilizados para la construcción de los sistemas de pararrayos, deben cumplir con ciertas normas de calidad.

Existen construcciones en donde se instalan sistemas ya sea de aluminio o de cobre, o en su caso combinadas.

El material debe de ser de primera calidad, esto con el fin de garantizar el buen funcionamiento y conservación del mismo.

A. Terminales Aéreas.

La terminal aérea, es el dispositivo que capta el rayo y, se coloca en las partes más altas de la estructura, en donde es más probable la caída de un rayo.

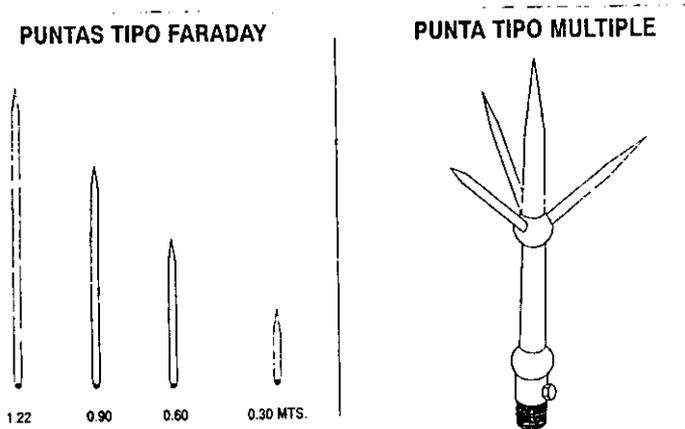
Existen diferentes tipos de terminales:

a. Punta Tipo Franklin

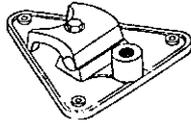
Esta punta es de las más comunes en la protección contra descargas atmosféricas, es una punta maciza de cobre, con acabado en cromado, con diferentes medidas de altura: 0.30, 0.60, 0.90 y 1.22 mts. Una derivación de este tipo de puntas es la Punta Tipo Múltiple. Son utilizadas en casa-habitación, hospitales, edificios, torres de comunicación, etc.

Para sujetar esta punta se utiliza una base de cobre, existen diferentes tipos de bases :

Triangular, redonda, para techos de lámina, de petril, rectangular.



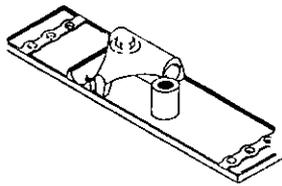
BASES



TRIANGULAR



REDONDA



PARA TECHO DE LAMINA

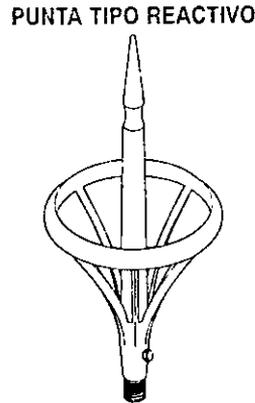
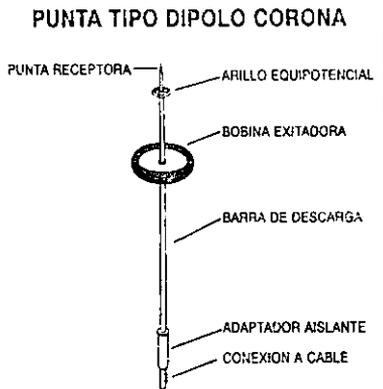


DE PRETEL

b. Terminales Aéreas Ionizadas.

La terminal o punta aérea ionizada consiste en el mismo principio que el de la punta Franklin, pero con material radiactivo, esto con el propósito de ionizar el ambiente que rodea a la terminal. Existen diferentes formas en las cuales se presenta este tipo de terminal, en México los más comunes son: La punta dipolo corona y la punta tipo reactivo.

Este tipo de puntas no es muy recomendable debido a que es más probable la atracción de rayos por el material radiactivo que utilizan. Se utilizan principalmente en torres de comunicación, y en edificios que superan por lo general los 5 pisos de altura.



B. Jaula de Faraday.

Para ofrecer una protección más efectiva contra las descargas atmosféricas, se ha empleado el uso de este tipo dispositivo, el cual consiste en rodear con un material eléctrico el objeto a proteger, creando así un escudo electrostático. Este dispositivo se une a las puntas del sistema de pararrayos, dando así una protección más confiable.

Una verdadera jaula de Faraday es difícil de construir y económicamente es muy costosa, se recomienda que solo se utilice para medios críticos o donde existan dispositivos sumamente sensibles.

C. Elementos en la construcción de Sistemas de Pararrayos.

a. Conductores.

Los conductores que se emplean para este tipo de Sistemas, deben estar diseñados y fabricados especialmente para Pararrayos. Este tipo de conductores se encuentra formado por pares trenzados de alambre de cobre suave, y deberán

también ofrecer peso y conductividad como lo señalan las especificaciones, ya sea para edificios Clase I o Clase II según sea el caso.

En el mercado existen los siguientes tipo de cable para Pararrayos.

Cable Pararrayos

Calibre 17, 29 Hilos

Para Edificios Clase I



Cable Pararrayos

Calibre 17, 31 Hilos.

Para Edificios Clase II



Cable Pararrayos

Calibre 14, 28 Hilos.

Para Edificios Clase II



Cable Semi-Duro

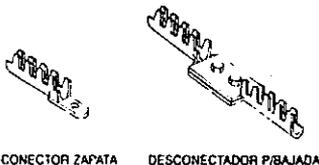
Calibre Varios.



b. Conectores.

Todo el material empleado en este tipo de instalaciones, ya sea para uniones, cruces, derivaciones o empalmes pueden ser de dos tipos, ya sea conectores mecánicos o conectores a presión, este tipo de material deberá ser de una aleación de cobre o en su defecto bimetálicos.

CONECTORES DE PRESION



CONECTOR ZAPATA

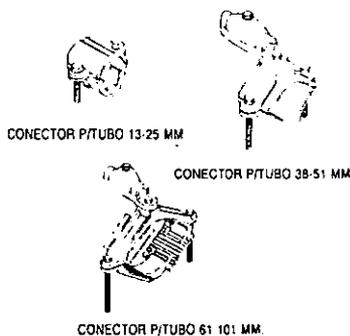
DESCONECTOR P/BAJADA



CONECTOR TIPO 'T'

CONECTOR RECTO

CONECTORES PARA TUBO

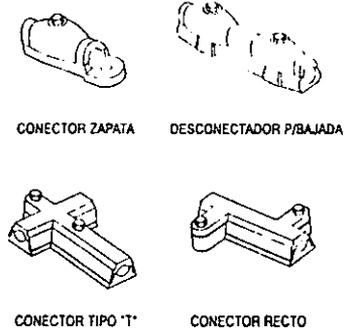


CONECTOR P/TUBO 13-25 MM

CONECTOR P/TUBO 38-51 MM.

CONECTOR P/TUBO 61 101 MM.

CONECTORES MECANICOS



CONECTOR ZAPATA

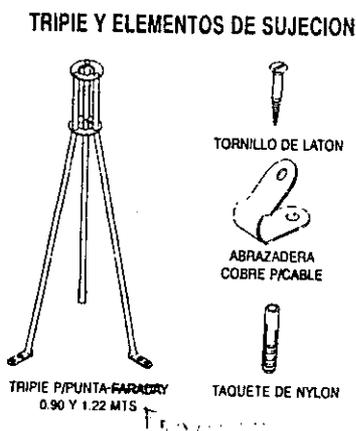
DESCONECTOR P/BAJADA

CONECTOR TIPO 'T'

CONECTOR RECTO

c. Abrazaderas

Las abrazaderas para sujetar los conductores deberán ser resistentes y junto con las clavos, tornillos, pijas, anclas o pernos con que se fijan, se recomienda que sean del mismo material que el conductor.



1. INSTALACION DEL SISTEMA DE PARARRAYOS.

Es recomendable que antes de iniciar un proyecto de instalación de cualquier sistema de pararrayos, se debe realizar una visita al lugar o tener los planos de la estructura, esto con el objetivo de saber realmente la geometría del edificio, altura, así como de las características del terreno en donde se encuentra la construcción. Los factores anteriores nos darán una correcta cuantificación del material, así como de detalles en la construcción.

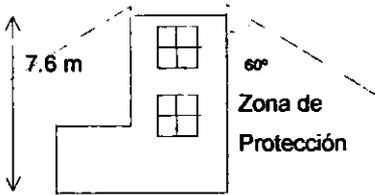
A. Zonas de Protección.

Las terminales o puntas aéreas ofrecen una zona o cono de protección el cuál varía dependiendo de la geometría de las estructuras.

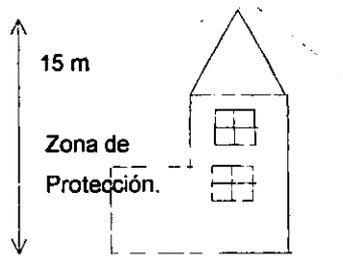
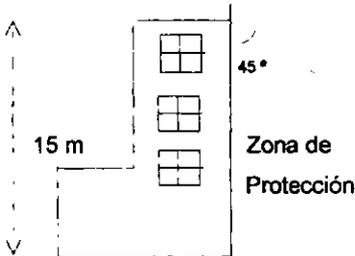
La zona de protección forma un cono, teniendo su vértice en el punto más alto en la terminal, formando un ángulo de 45° ó 60° con respecto a la vertical.

La norma NFPA, da las siguientes especificaciones de la zona de protección:

- ☛ Protección de edificios de techo plano y techo inclinado con una altura menor a 7.6 m (25 ft). Angulo de protección de



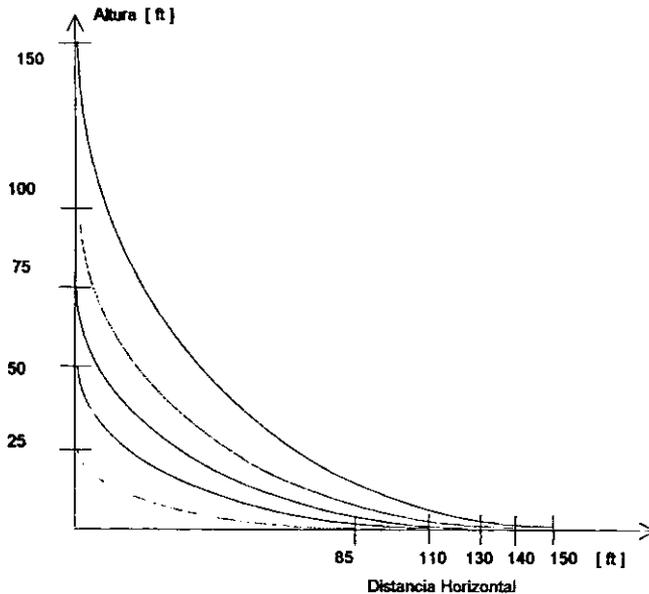
- ☛ Protección de edificios de techo plano y techo inclinado para estructuras que no excedan los 15 m (50 ft)



A continuación se muestra la representación gráfica del concepto geométrico para las estructuras debajo de los 46 m (150 ft).

Esta gráfica está basada en la altura de la terminal y la zona de protección de la estructura desde:

- 7.6 m (25 ft)
- 15 m (50 ft)
- 23 m (75 ft)
- 30 m (100 ft)
- 46 m (150 ft)



Zona de Protección.

6. ESPECIFICACIONES SOBRE INSTALACIONES.

Como se mencionó anteriormente, se debe tener una idea clara de la forma geométrica de la construcción a la cual se la va a instalar el sistema de pararrayos, al tenerla se puede proceder a la instalación del mismo. A continuación se dan las siguientes recomendaciones tanto para recursos humanos como en la instalación, adquiridas tanto por la experiencia como las recomendadas por la NFPA.

A. Recursos humanos.

- ↳ Personal calificado.
- ↳ Herramienta adecuada.
- ↳ Contar con plano de instalación.
- ↳ Material completo y adecuado según las especificaciones.
- ↳ Supervisión.

B. Instalación.

a. Cable.

- ☞ El cable puede ser de cobre o de aluminio, su característica principal es el de tener una cantidad de aire, en el espacio interno del cable para permitir un enfriamiento rápido en caso de una descarga, sin embargo en el campo se han encontrado cables fundidos, esto debido a que la intensidad de la carga fue bastante grande.
- ☞ En la instalación del cable, este deberá tener lo menos posible de cortes y de uniones, esto con el fin de tener una máxima continuidad.
- ☞ No deben tenerse curvas, ni ondas muy pronunciadas y cerradas, esto es a que se podría originar un arco entre ambos conductores.
- ☞ Las uniones entre conductores deberán ser mínimas, y las que se requieran pueden ser mecánicas o a presión, mecánicamente fuertes y de conductividad eléctrica adecuada.
- ☞ Los conductores se fijarán al edificio o a la estructura por medio de abrazaderas de cobre, las cuales serán adecuadas, para no propiciar la corrosión electrolítica en presencia de humedad. En la práctica estas abrazaderas cuando se instalan en conductores horizontales, su separación debe ser no mayor a 1 m, y en conductores verticales, su separación no debe ser mayor a 1.20 m.
- ☞ Las partes metálicas de edificios que se encuentren en la azotea, tales como tubería, aire acondicionado, escaleras, charolas, antenas u otros objetos que son probable recepción de descargas, no necesitan estar protegidas por puntas, pero se deberán conectar sólidamente al sistema con cable del mismo calibre que el conductor principal.

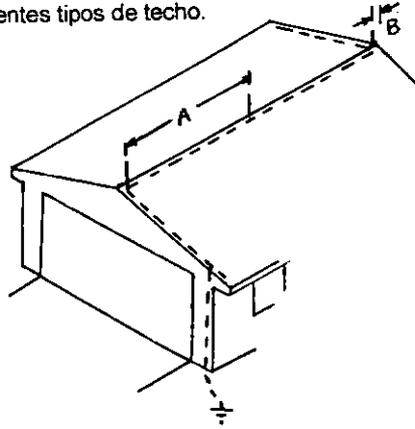
- ↳ El cable deberá colocarse al borde del techo y bajará por las esquinas y los lados, de tal manera que constituyan lo más cercano posible y como las condiciones lo permitan a una malla cerrada.
 - ↳ El conductor ligará entre sí a todas las terminales aéreas.
 - ↳ Los conductores deberán tenderse en un plano horizontal a lo largo de lumbreras, de techados abovedados, en torno del perímetro de techados planos, detrás o en lo alto de parapetos y, a través de extensiones planas de azoteas.
 - ↳ En todos los empalmes de conductores, tanto a "tope" como en "T" o en "Y", habrán de utilizarse conectores rectos o en "T" .
 - ↳ Dentro de los requisitos para la clase I son aceptables los empalmes con conectores, tanto a presión como mecánicos, de metal estampado o colado.
 - ↳ En las instalaciones de clase II no habrán de usarse empalmes con conectores a presión.
- b. Puntas pararrayo.
- ↳ Las puntas serán equivalentes en peso y rigidez a un tubo de cobre que tenga un diámetro exterior de 5/8 de pulgada, con un recubrimiento en cromado, podrán ser de sección transversal o tubular.
 - ↳ Las puntas se fijarán sólidamente a su base o formarán parte de ella.
 - ↳ El área transversal conductora de la base será al menos equivalente al área transversal de la punta.

↳ En caso necesario, cuando se encuentren bordes con declive se utilizarán rodillas niveladoras, que serán del mismo material.

↳ Los espacios máximos permitidos en diferentes tipos de techo.

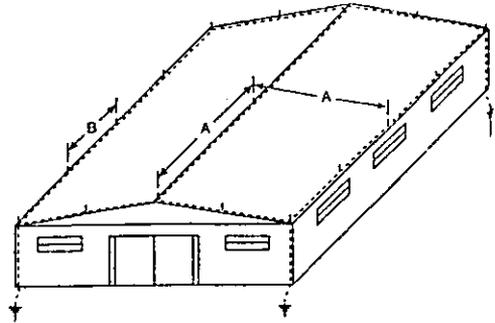
Terminal aérea en techos inclinados.

- A. Separación entre puntas 6 m (20 ft).
- B. Separación entre la punta y el borde del techo 0.6 m (24 in).



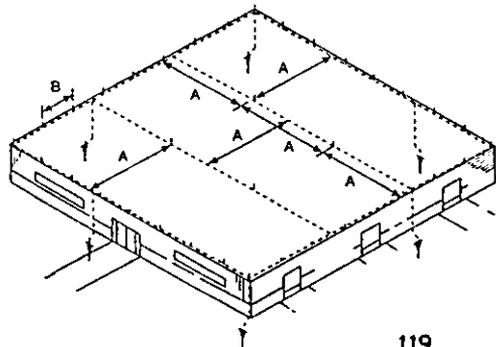
Terminal aérea en techos de pendiente ligera. Cuando se trate de edificios que excedan 15 m de ancho la recomendación es la siguiente:

- A. Espacio máximo 15 m (50 ft)
- B. Espacio máximo 6 - 7.6 m (20 - 25 ft)



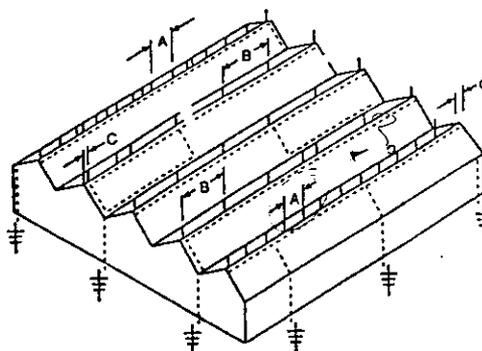
Terminal aérea en techo plano que Exceden los 15 m de ancho.

- A. Espacio máximo 15 m (50 ft).
- B. Espacio máximo 6 - 7.6 m (20 - 25 ft)



**Terminales aéreas en techos tipo
caballete intermedio.**

- A. Espacio máximo 8 - 7.6 m (20 - 25 ft).
- B. Espacio máximo 15 m (50 ft).
- C. Espacio máximo 0.6 m (24 in).



b. Conductores de bajada.

- ↳ Los conductores que desciendan a tierra se llevarán a través de partes exteriores del edificio, como esquinas, tomando en consideración los mejores lugares para hacer conexiones a tierra.
- ↳ La localización de los mismos dependerá de la colocación de las terminales aéreas, se instalarán de preferencia en esquinas opuestas diagonalmente ya sea en estructuras cuadradas o en rectangulares y en puntos opuestos diametralmente. Su recorrido a tierra debe ser lo más directo posible.
- ↳ Los conductores de bajada han de estar separados por una distancia promedio de 30 m como máximo.
- ↳ Los conductores de bajada deberán contar con protección que les eviten daños materiales o desplazamientos. Estas protecciones se logran con tubería PVC tipo pesado. El conductor de bajada habrá de estar protegido a una distancia mínima de 1.80 m, además deberá llevar en la parte superior un conector recto de prueba, que permita desconectar del sistema cada bajada para medir su resistencia periódicamente.

7. MANTENIMIENTO.

Es importante realizar una inspección periódica del sistema, ya que existen diversos factores los cuales pueden hacer que el sistema ya no sea confiable, entre los que encontramos:

- ↳ Robo de material.
 - Cable
 - Puntas.
 - Bases.
 - Conectores.
- ↳ Corrosión del material producido por:
 - Humedad.
 - Contaminación.
- ↳ Caída de descargas atmosféricas.
 - Doblamiento en la parte superior de las puntas.
 - Fundición del cable.
 - Flameo de conductores.

Se debe realizar un mantenimiento preventivo-correctivo, para realizar esto se debe hacer una inspección visual.

En una inspección visual se tomarán en cuenta los siguientes puntos:

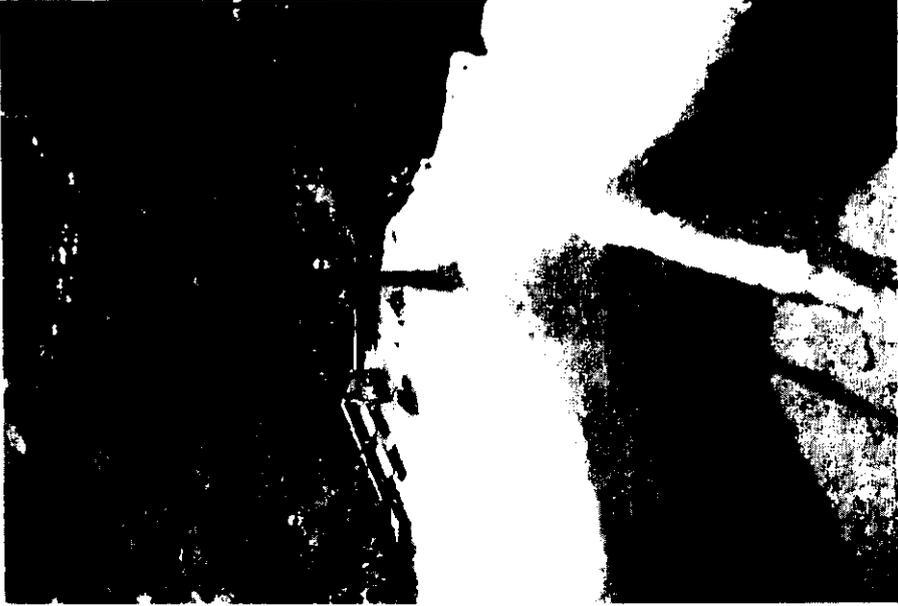
- ↳ El cable deberá estar completo, tanto en los horizontal como para los conductores de bajada.
- ↳ Las bases y puntas deberán estar completas y, en perfecto estado.
- ↳ Todos los conectores deben encontrarse en perfecto estado, no deben estar fracturados ni rotos.
- ↳ Las bases se deben encontrar bien fijas.
- ↳ El extremo de la punta y el cable deben presentar continuidad.
- ↳ El conductor se debe de encontrar bien colocado y rígido.

- ↳ Se debe de medir la resistencia de cada una de las bajadas existentes por separado, para después realizar una medición a todo el sistema cerrado.

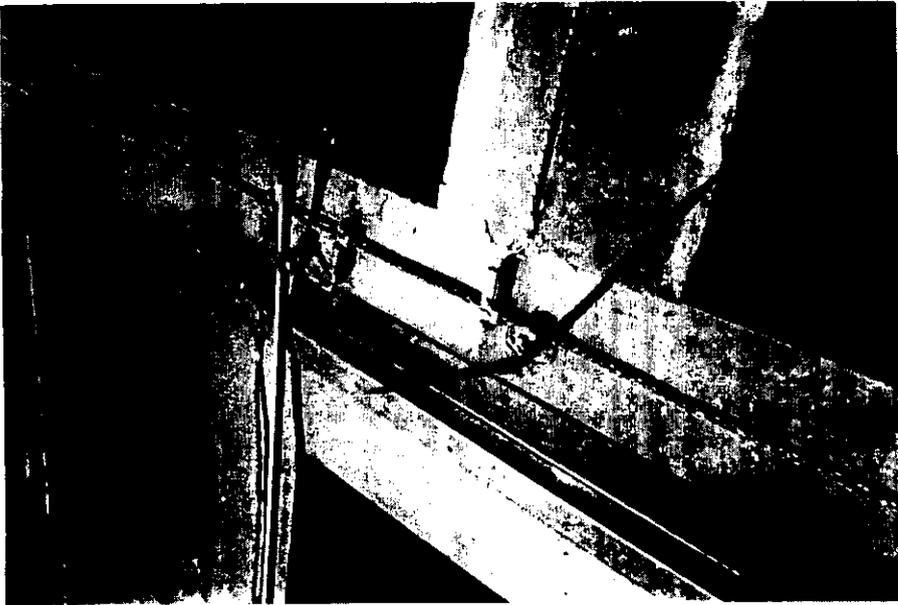
De lo anterior se puede llevar a cabo un registro o record de todos los datos en donde debemos de tener:

- ↳ Condiciones generales de:
 - Las terminales aéreas.
 - Conductores.
 - Otros componentes.
- ↳ Condición general con respecto a la corrosión que presenta el sistema.
- ↳ Pruebas de resistencia del sistema de tierras.
- ↳ Faltantes de conductores y componentes.

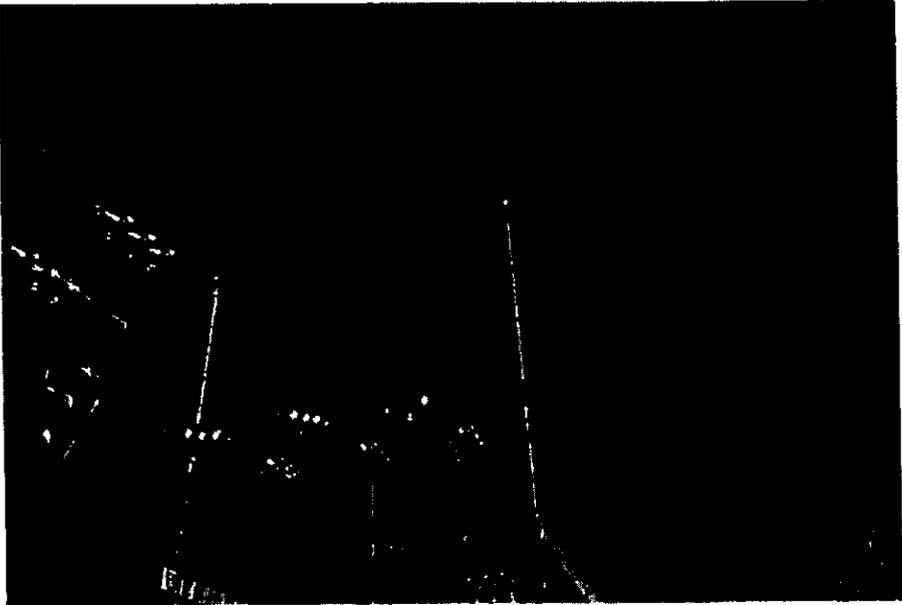
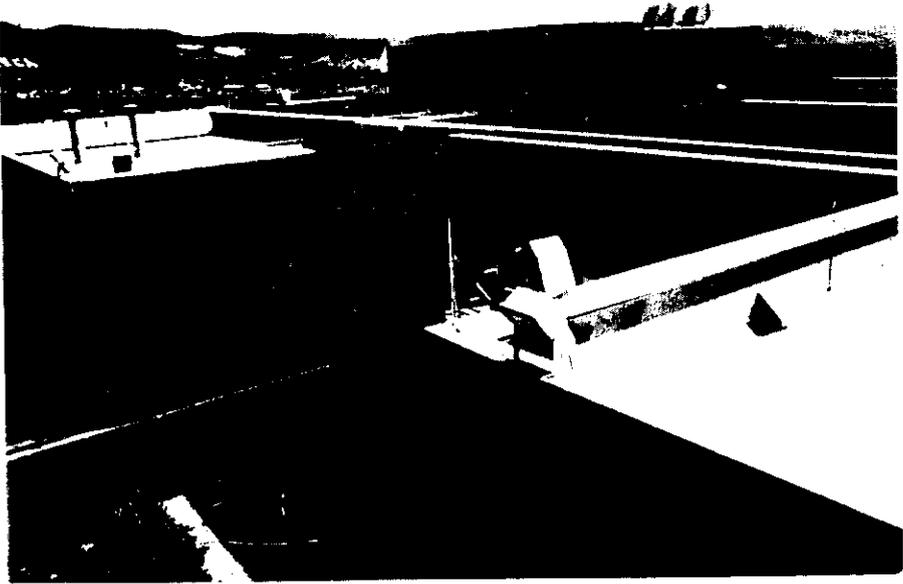
A partir de lo anteriores puntos se puede realizar un mantenimiento preventivo-correctivo del sistema.



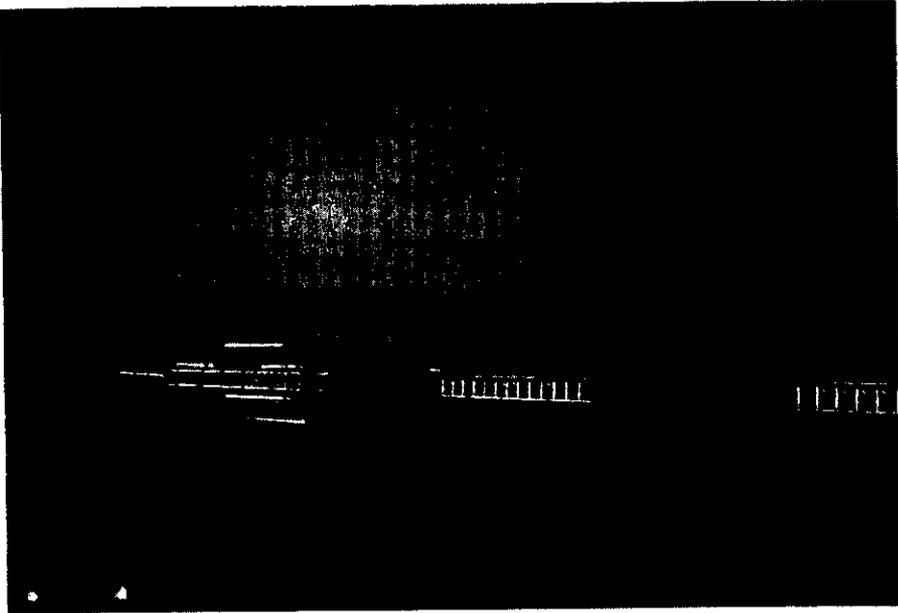
Punta de pararrayos recubierta con impermeabilizante



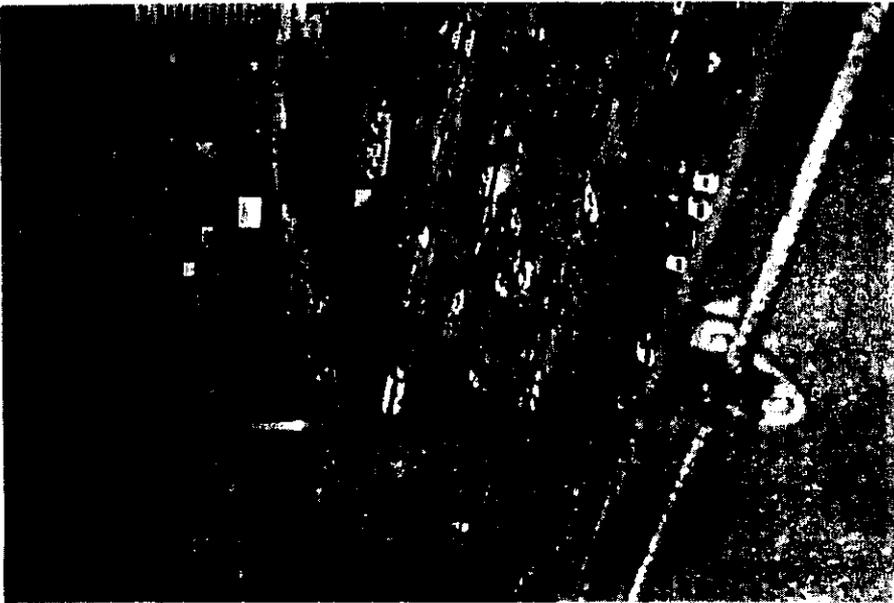
Sistema de Pararrayos con material de aluminio



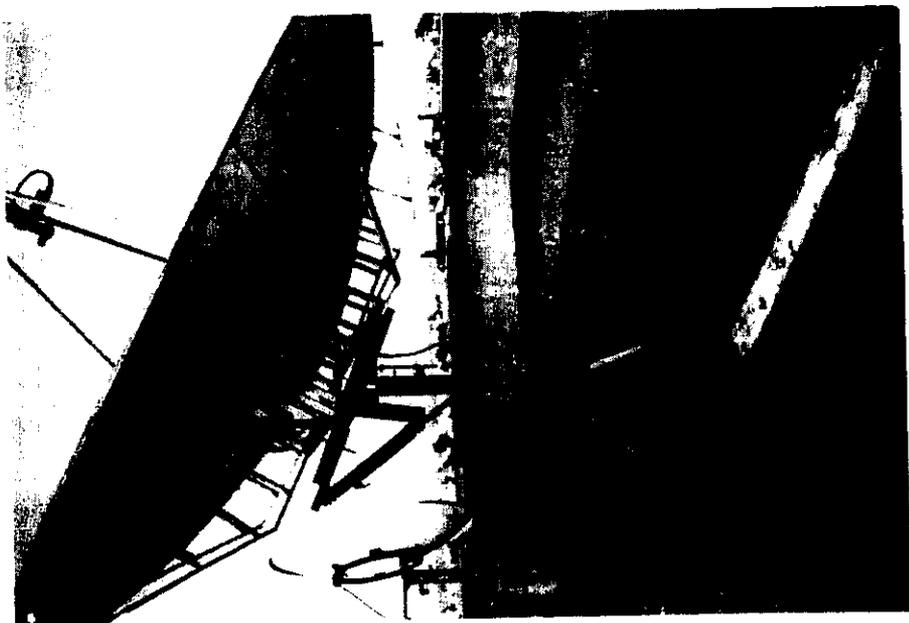
Protección a estructuras con punta tipo Franklin.



Punta tipo dipolo corona.



Punta tipo Franklin.



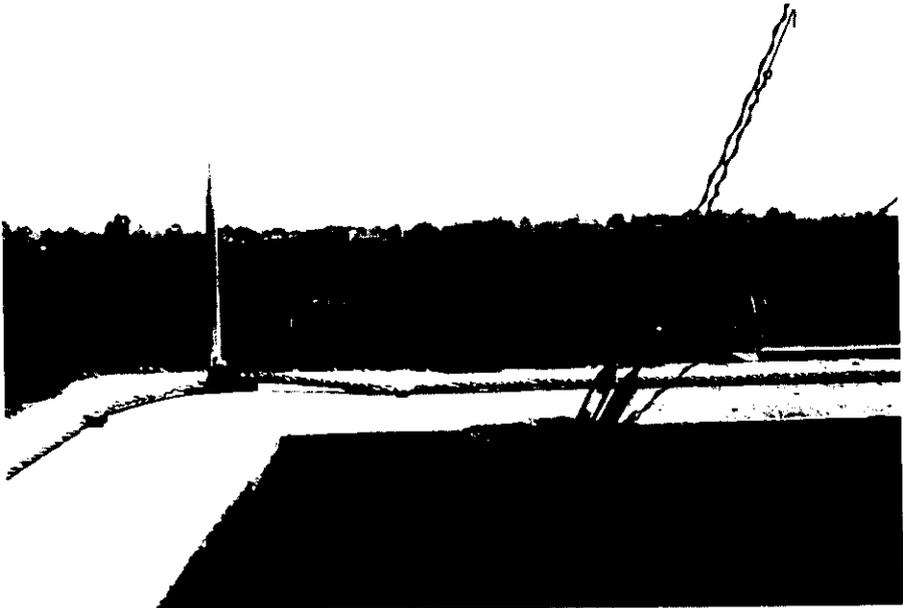
Unión al sistema de pararrayos de todas las estructuras existentes en el techo.



Incorrecta conexión de las bajadas a tierra



Incorrecta colocación de cable de comunicaciones, cerca del cable de pararrayos.



Sistema de pararrayos con material de aluminio

CAPÍTULO VII

Sistema de tierras.

1. ANTECEDENTES.

Los problemas en edificios industriales, comerciales y hasta residenciales relacionados con los sistemas de tierra, son una gran parte de todos los problemas que se pueden generar en este tipo de instalaciones, sobre todo aquellos que están relacionados con la calidad de la energía. Los problemas incluyen tópicos como conexiones inapropiadas, de pobre calidad y hasta un mal diseño. Muchas de las instalaciones a tierra no están apropiadamente conectadas de acuerdo a los requerimientos de los códigos nacionales, estatales, locales u otras especificaciones. Por ejemplo el NEC solo permite una unión entre Neutro y Tierra en la fuente de alimentación, todavía se encuentran conexiones a tierra hechas en forma inapropiada que son un problema comúnmente encontrado en sistemas de potencia en el campo.

La experiencia ha demostrado que muchas instalaciones de equipo electrónico han experimentado un mal funcionamiento y fallas, esto debido a un mal funcionamiento del sistema de tierras.

Así pues, el uso de un adecuado Sistema de Tierras se debe extender desde la casa-habitación hasta las compañías suministradoras de energía.

Las funciones principales de un sistema de tierra son:

↳ Puesta a tierra para protección.

La cual significa arrojar o drenar todas aquellas corrientes que son peligrosas tanto para la integridad física de las personas como para equipo sensible a este tipo de fallas.

↳ Puesta a tierra para la ejecución de trabajos.

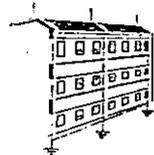
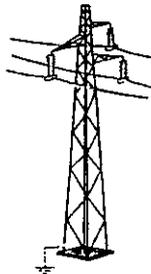
Este tipo de tierra es solamente de carácter provisional, la cual sirve para garantizar la integridad física de aquellos que operan sobre elementos normalmente energizados, pero que temporalmente están fuera de servicio.

↳ Puesta a tierra como voltaje de referencia cero.

Este tipo de tierra se refiere a que una parte del equipo tiene un potencial a tierra. Dentro de este apartado tenemos la puesta a tierra de gabinetes, de amazones, retenidas, sistema de pararrayos, entre otros muchos.

En México, con el advenimiento de nueva tecnología se necesita que este tipo de sistemas de tierra sea eficiente, ya que cualquier tipo de desarrollo ya sea industrial, en comunicaciones, habitacional, computacional, etc, requiere de este tipo de sistemas.

Para realizar un buen sistema de tierras, se debe conocer a fondo este tema, en la práctica se ha encontrado que los sistemas de tierra son solamente varillas enterradas, rehiletos o en el peor de los casos toman como sistema de tierras la estructura de la construcción, éste tipo de sistemas es ineficiente y genera diversos problemas.



2. NATURALEZA DEL TERRENO

Cuanto menor sea la resistividad del terreno, más fácilmente se pueden alcanzar valores bajos para la resistencia de la instalación de tierra.

A. El suelo como conductor de la electricidad.

En los sistemas con neutro a tierra, el suelo se comporta como un conductor, más aún, en los sistemas denominados SWER (Sistema de Retorno por Tierra) el suelo es un conductor.

Las características del suelo son tan diferentes en este aspecto, que hay suelos que no conducen la electricidad, es decir, son aislantes, por otro lado hay suelos que son buenos conductores de la electricidad como los suelos húmedos.

Para conocer que tan buen conductor de la electricidad es el suelo, es necesario conocer su resistividad o resistencia específica, las rocas, la arena y suelos secos tienen alta resistividad, es decir, no conducen la electricidad, los suelos con alto contenido de humedad tienen baja resistividad. Por lo tanto, es necesario conocer la resistividad del terreno para poder efectuar un diseño adecuado del sistema de tierras.

B. Resistividad del Suelo.

La resistividad también conocida como resistencia específica, es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, la cual está determinada por el tipo de suelo, el contenido de humedad del mismo, su composición química y la temperatura entre otros factores.

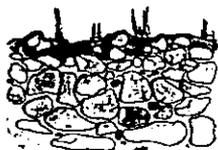
La resistividad se mide en Ω -m, Ω -cm, etc. Existen dos formas para determinarla, una es empírica mediante tabulación y conocimiento del terreno y la otra efectuando la medición directamente en el terreno.

Una clasificación general es:

Tierra orgánica húmeda	10 Ω -m.
Tierra húmeda	100 Ω -m.
Tierra seca	1 000 Ω -m.
Roca	5700 Ω -m.

C. Tipos de suelo.

En la construcción de Sistemas de tierras en general se tiene que tener muy en cuenta el terreno en donde se va a construir, esto es debido a que el terreno no se comporta de la misma manera en todos lados, por eso cuando se quiera construir un sistema de tierras eficiente se debe tener ya un estudio previo de la composición del terreno, así podemos encontrar diferentes tipos de terreno por ejemplo entre las más comunes tenemos: roca, tepetate, arena, relleno etc.



Terreno rocoso



Terreno orgánico húmedo

a. Roca.

Cualquier agregado o masa de materia natural sólida que forma parte esencial de la corteza terrestre, ya sea en estado consolidado o disgregado y constituido por una o más especies mineralógicas. Una clasificación divide a la roca en tres grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas también llamadas eruptivas o magmáticas, son producto de una erupción volcánica, en México existen claros ejemplos de este tipo de suelo como lo es Ciudad Universitaria.

Las rocas sedimentarias. También conocidas por clásticas, son las que se han formado por la acumulación de materiales clásticos, ya sea en el fondo del agua o sobre la tierra, o por la precipitación química del agua. Estas rocas pueden

agruparse, según las dimensiones de sus componentes, desde el grano grueso hasta el fino, en conglomerado o brechas.

Las rocas metamórficas se han formado por la recristalización de rocas ígneas o de rocas sedimentarias, a veces acompañada por la sustitución, o por la adición, de otros elementos. En el proceso entran principalmente el calor, la presión y la circulación, entre las que encontramos el mármol.

La resistividad de este tipo de terreno varía entre los 3000 Ω -m y los 10000 Ω -m.

b. Tepetate.

El tepetate está considerado como una roca, aunque no entra en la clasificación anterior, se formó de la sedimentación de las cenizas volcánicas. Su principal característica es su dureza al impacto o a la penetración. Este tipo de terreno es mediano conductor de la electricidad, ya que su resistividad varía entre los 100 Ω -m y los 200 Ω -m.

c. Arena.

Arena es una denominación que se emplea para designar casi a cualquier tipo de roca o mineral desmenuzado. La arena no se comporta como buen conductor de la electricidad, ya que es un material compuesto por granos de roca y no retiene la humedad, además de que no presenta una continuidad en su estructura, es decir, que entre grano y grano existen muchos huecos que ocupa el aire. Este tipo de terreno presenta un alto grado de resistividad esta oscila entre 500 Ω -m y los 3000 Ω -m.

d. Relleno.

Este tipo de terreno es un gran problema para la construcción de sistemas de tierra, esto debido a que en el relleno utilizan desde el cascajo hasta material orgánico, este tipo de suelo se debe de evitar debido a que su resistencia puede ser engañosa.

D. Temperatura y humedad.

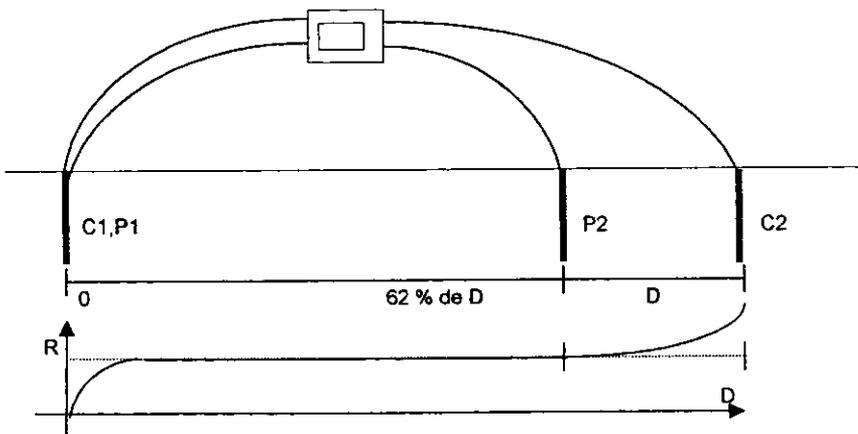
La resistividad del terreno varía con la temperatura y el grado de humedad. Por lo tanto no es aconsejable efectuar mediciones de resistividad ni de resistencia, cuando la temperatura sea excesivamente alta o cuando el terreno está impregnado de agua debido a lluvias recientes.

E. Resistencia a Tierra.

El sistema de tierra con electrodo se encuentra generalmente enterrado o inaccesible excepto durante la construcción de la instalación o de una remodelación importante. El propósito del sistema de tierra con electrodo es proporcionar un punto de referencia a tierra para la instalación y proporcionar una trayectoria para cualquier disturbio. La resistencia del sistema de tierra con electrodo se debe de verificar durante la construcción. Para hacer la medición con precisión, el sistema de tierra con electrodo debe estar desconectado de todas las otras conexiones a tierra.

F. Medición de la resistencia a tierra.

Para realizar mediciones de Resistencia a Tierra se utiliza el método de caída de tensión, el cual consiste en circular una corriente entre un electrodo auxiliar C2 y otro de prueba C1, midiendo la caída de tensión entre el otro auxiliar P2 y el electrodo de medición P1.



El valor de resistencia a Tierra del electrodo es el que se obtiene de la intersección del eje de la Resistencia R con la parte paralela de la gráfica al eje de las distancias D.

Si la curva no presenta un tramo paralelo, quiere decir que la distancia escogida no es suficiente.

Cuando no se logra enterrar los electrodos auxiliares debido a que existen planchas de concreto, se utilizan franelas húmedas las cuales envuelven a los electrodos y se colocan sobre la plancha de concreto realizando así la medición.

Actualmente se encuentran equipos de medición que contienen tres bornes de prueba, con cables calibrados a cierta distancia, que se conectan de la siguiente manera:

Borne Verde	Electrodo de Prueba. C1,P1
Borne Amarillo	Electrodo Auxiliar P2
Borne Rojo	Electrodo Auxiliar C2

El valor de resistencia que especifica la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999

Artículo 250-84. Un electrodo único que consista en una varilla, tubería o placa y que no tenga una resistencia a tierra de 25Ω o menos, se debe complementar con un electrodo adicional.

Actualmente las compañías de telecomunicación piden que sus valores de resistencia a tierra estén por debajo de los 5Ω .

La fórmula general para obtener la resistencia a tierra es la siguiente:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

Donde:

ρ Resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$].

L Longitud de la varilla [m].

d Diámetro de la varilla. [m].

3. IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE TIERRA.

A. Constitución de una instalación de tierra.

Una instalación de puesta a tierra se compone esencialmente de uno o varios electrodos, y de una red de conductores que los conectan a las partes de la instalación que deben ser puestas a tierra. Las conexiones a tierra de los equipos o de un sistema eléctrico ó electrónico deberá ser más efectiva cuanto mayor sea la posibilidad de que por ella fluyan hacia el terreno eventuales disturbios ya sea permanentes o transitorios, a fin de dispersarlas de manera uniforme y sin originar zonas de concentración que a su vez podrían ser fuente de riesgo para la integridad física de las personas que se encuentren próximas a dichas zonas.

B. Efectos sobre el cuerpo humano.

Los efectos de la electricidad en el cuerpo humano dependen de la intensidad de la corriente que lo atraviesa, de la duración del contacto y de la resistencia eléctrica del propio cuerpo. Dicha resistencia varía según las condiciones físicas del sujeto. La resistencia media del cuerpo humano se estima, convencionalmente en 1000 Ω siendo, un dato extremadamente variable.

C. Potenciales peligrosos.

Las personas asumen que cualquier objeto que está aterrizado puede ser tocado con seguridad, esto dependiendo del valor de resistencia que presente el sistema

de tierras, esto ha originado muchos problemas, desde pérdida de equipos muy costosos hasta pérdidas humanas.

Las condiciones que pueden provocar accidentes son:

- ✦ Corriente de falla a tierra muy elevada en relación con el área que ocupa el sistema de tierras y su resistencia a una tierra muy remota.
- ✦ La resistividad del suelo y la distribución de la corriente puede generar gradientes de potencial elevados en la superficie.
- ✦ La posición del individuo entre dos puntos con una alta diferencia de potencial.
- ✦ Duración de la falla, el flujo de corriente a través del cuerpo humano por un tiempo suficiente puede causar desde quemaduras hasta la muerte.

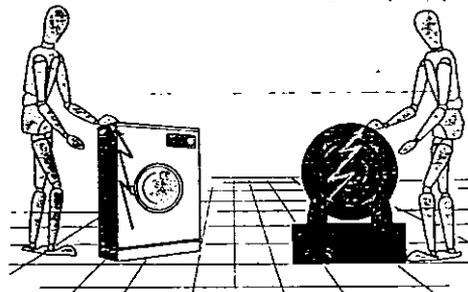
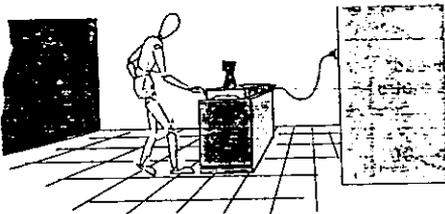
Cuando ocurre una falla a tierra se pueden presentar potenciales peligrosos que pueden dañar a las personas o a los equipos cercanos a la falla. Estos potenciales son:

- ✦ Potencial de toque.
- ✦ Potencial de paso.
- ✦ Potencial transferido.

a. Potencial de toque.

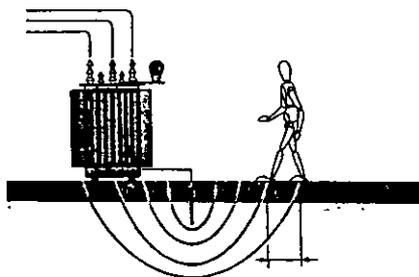
Es aquel potencial al que puede verse sometido el cuerpo humano como consecuencia de un contacto a una carcasa o estructuras metálicas de máquinas e instalaciones que normalmente no se hallan bajo tensión cuando circula una corriente de falla.

Por desgracia la mayor parte de accidentes por electrocución ocurren en el hogar por causa de este potencial.



b. Potencial de Paso

Es el potencial que puede soportar un individuo que se encuentra parado o caminando cerca del lugar de la falla.



c. Potenciales transferidos.

Estos se producen cuando existen elementos metálicos que salen del lugar de la falla, como son: rieles, hilo de guarda, tuberías, etc. Bajo condiciones normales de operación el equipo eléctrico que está puesto a tierra opera a nivel de voltaje cero o cercano a cero y este potencial es idéntico al de una red remota. Durante una condición de falla se eleva el potencial con respecto a la red remota existiendo una diferencia de potencial, que es proporcional a la magnitud de la corriente en la malla de tierras y su resistencia.

4. ELECTRODOS.

A. Definición

Con el término "electrodo" entendemos por un cuerpo metálico puesto en pleno contacto con el terreno y destinado a dispersar en el mismo las corrientes eléctricas. Puede estar constituido por un solo elemento o por diversos elementos conectados entre sí mediante conductores enterrados.

Existe cierta confusión con lo que respecta al electrodo de puesta a tierra, algunas personas piensan que el electrodo solo es una varilla enterrada, sin embargo un electrodo puede consistir en un conductor enterrado en forma vertical u horizontal, una placa, una varilla con compuestos químicos, varias varillas en paralelo, mallas de cables enterrados, etc.

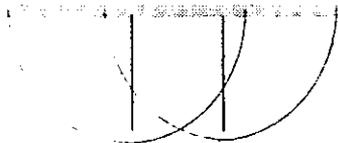
En cualquier construcción nueva de un sistema de tierras, primero se debe saber la resistividad del terreno para así determinar que tipo de electrodo y arreglo se debe utilizar.

B. Influencia entre electrodos.

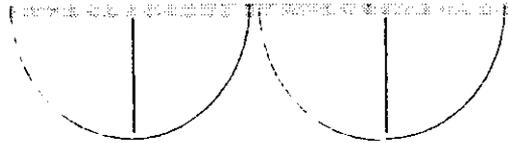
La resistencia de tierra del electrodo depende mucho más de su longitud (profundidad de penetración) que de las dimensiones transversales. Si se alcanza la capa freática la resistencia de tierra disminuye.

Para los electrodos en forma de placa, la resistencia depende de sus dimensiones; en electrodos en anillo de su perímetro, para electrodos en forma de malla, de la longitud total de los conductores que la forman.

No es posible obtener valores bajos de resistencia de tierra solo con aumentar el número de electrodos y sin tener sus respectivas áreas de influencia. Se recomienda que la separación entre electrodos sea mayor a 3 m.



Electrodos demasiados próximos.

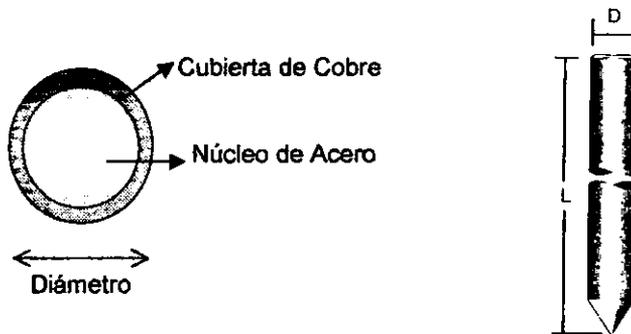


Electrodos correctamente distanciados.

C. Electrodo múltiples.

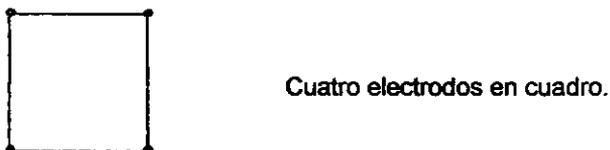
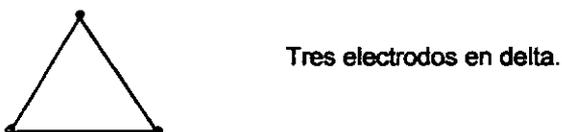
En la construcción de sistemas de tierras una de las partes esenciales del electrodo de puesta a tierra, es la varilla conocida como copper-weld, ésta consiste en una varilla con diferentes longitudes, una de 1.5 m y otra de 3 m, con diámetros de 13 mm (1/2 in), 16 mm (5/8 in) y 19 mm (3/4 in), con un núcleo de acero que le da dureza y revestida con cobre el cual le da resistencia y mejor conductividad, por norma el espesor del cobre debe tener 0.25 mm como mínimo.

Ya que la resistencia eléctrica no cambia mucho debido al diámetro de la varilla, la razón para escoger determinado diámetro es principalmente el terreno donde se va a usar esta varilla, así que para terrenos de baja resistividad se recomiendan diámetros más pequeños y para terrenos con alta resistividad se recomiendan diámetros más grandes.



Cuando se construyen mallas con electrodos múltiples y se utilizan como electrodos las varillas antes descritas, es un medio económico de instalar un sistema de tierras, sin embargo, por regla general, su valor de resistencia es alto, y frecuentemente se deben colocar varios electrodos en paralelo para lograr un valor aceptable.

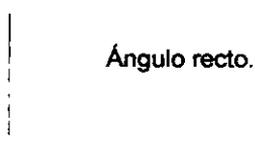
En el campo los arreglos más comunes son:

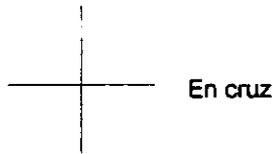


Una variante de la varilla copper-weld es electrodo conocido como rehilete.

D. Electrodo horizontales.

Cuando no es posible utilizar electrodos con varillas enterrados en forma vertical se recurre a otros métodos, uno de ellos es bastante eficiente, es el de electrodos horizontales, este tipo de sistemas requiere de mucho espacio y con frecuencia es hurtado; factores que representan desventajas, por lo cual su aplicación se reduce a lugares donde no se pueden colocar electrodos verticales, existe suficiente área y no tienen acceso fácil, en sistemas de distribución básicamente su aplicación se reduce a los fraccionamientos. Se recomienda enterrarlos a una profundidad que va desde los 50 cm hasta los 100 cm, entre las configuraciones más usuales tenemos:





E. Electrodo Profundos.

Este tipo de electrodos consiste de un conductor de cobre instalado en perforaciones profundas, hasta encontrar terrenos de baja resistividad o niveles freáticos, adicionalmente estas perforaciones se rellenan con compuestos químicos que se mencionan a continuación.

F. Electrodo químicos.

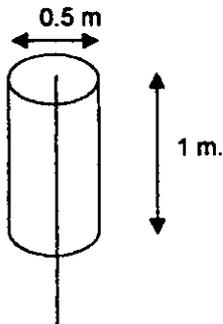
Este tipo de elementos modifica el medio que rodea el electrodo, bajando la resistividad del suelo, los más usuales son:

- ↳ Carbón Mineral (Coke). Ha venido a sustituir el carbón vegetal por tener mejores cualidades, este tipo de material retiene mejor la humedad.
- ↳ Sulfatos. Han caído en desuso debido a sus cualidades corrosivas sobre los metales, en particular del cobre.
- ↳ Sales. También, al igual que los sulfatos ya no se usan, además son corrosivas, se diluyen muy fácilmente en el agua.
- ↳ Bentonita. Se usa también como medio artificial para bajar la resistividad del terreno y a la vez reducir el valor de resistencia a tierra, se empezó a utilizar con estos fines en Hungría y en la República Checa. La bentonita en sí es una arcilla de la familia de las montmorillonitas y su principal propiedad es la capacidad de absorber y retener agua. Básicamente consiste en ocupar las grietas, aberturas y huecos que existen o hacen en el terreno, mediante una masa que envuelve las partículas del mismo y los une eléctricamente,

formando una gran superficie de contacto, haciendo un buen camino para las corrientes eléctricas que se drenan a tierra. La bentonita es de difícil manejo debido a que en contacto con el agua forma una película impermeable, su mezclado con agua no es fácil, necesiándose dos meses para absorber el agua al 100%.

Actualmente en el mercado existen diferentes tipos de compuestos químicos para bajar la resistencia a tierra de los electrodos como los es GAP, GEM y RR50.

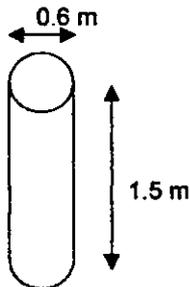
Cuando se encuentran suelos con alta resistividad, lo que se procede a realizar es una combinación de compuestos químicos, así la combinación más usual y económica, que a dado buenos resultados es la combinación de bentonita con carbón mineral, este tipo de combinación se puede realizar de la siguiente manera:



Varilla Copper-weld

Se realiza una excavación en forma de cilindro con un diámetro de 0.5 m ó más con una profundidad de 1 m. Se coloca una varilla copper-weld de 3 m, o en su defecto una varilla de 1.5 m de longitud. Se rellena con cualquier producto químico.

Otra combinación es utilizar el electrodo Parres, adicionado con cualquier producto químico, para llevarlo a cabo se realiza una excavación con las siguientes dimensiones:

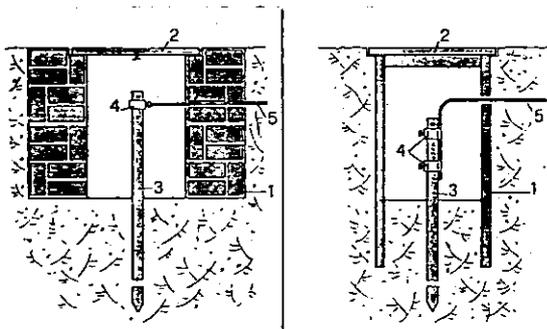


En la excavación se coloca el electrodo Parres, y se rellena con producto químico ó líquido electrolítico.

Otra combinación que se utiliza es el electrodo en forma de rehilete, las dimensiones y la cantidad dependerá de las dimensiones del electrodo.

5. TIPOS DE POZOS

Es útil el empleo de pozos cuando se requiere tener acceso al electrodo cuando se requiere efectuar mantenimiento y mediciones. En algunos casos y a petición de cliente se dejan ahogados, es decir, se dejan completamente cubiertos, pero no es una buena recomendación. A continuación se muestran el esquema de los pozos más utilizados.



- 1 - Pozo.
- 2 - Tapa.
- 3 - Electrodo.
- 4 - Bornes (Mecánicos ó soldadura)
- 5 - Cable de cobre.

6. IMPORTANCIA DE LA UNIÓN NEUTRO-TIERRA.

El conductor de neutro y de conexión a tierra del equipo son requisitos de la norma (NOM-001-SEDE-1999) que indica que deben conectarse en el panel de servicio principal y en el lado secundario de los sistemas derivados en forma separada. Las uniones neutro-tierra inapropiadas, extrañas, son un problema relativamente común que no solo crean riesgos de shock para el personal de operación sino también degradan el comportamiento del equipo electrónico sensible. Estas mediciones se pueden detectar midiendo el voltaje entre el neutro y tierra en los contactos, normalmente indicará voltaje en el rango de milivolts bajo condiciones de operaciones normales. Una lectura de cero volts indica la presencia de una unión neutro-tierra cercana. Una corriente excesiva en la conexión a tierra de los equipos en los paneles de distribución también indica la posibilidad de una unión neutro-tierra en el lado de carga. Es necesaria una inspección visual para verificar y localizar uniones indebidas.

7. DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRA EN BAJA TENSIÓN

Para que un sistema de tierras funcione en forma satisfactoria debe cumplir con ciertos requisitos, el diseño puede ser simple, desde una varilla, hasta algo muy complicado, como una malla de tierras para una planta nucleoeléctrica, por mencionar algo.

En el diseño intervienen factores diversos como son:

- ⌘ Resistividad del terreno.
- ⌘ Voltaje del servicio.
- ⌘ Potencia de corto circuito.
- ⌘ Espacio disponible.
- ⌘ Equipo y personal a proteger, etc.

En los inicios del uso de la electricidad la tierra eléctrica solo se usaba como una referencia de voltaje, sin embargo, con el transcurso del tiempo se le fueron asignando otras funciones, entre otras, 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, estabilizar la tensión a tierra del circuito durante su operación normal, una conexión sólida a tierra facilita la operación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente, en caso de fallas a tierra.

Incluso se tenían recomendaciones como la siguiente: "En una instalación nueva no es conveniente poner a tierra los equipos ya que una falla en el aislamiento de cualquier motor, detiene la producción, recomendando la puesta a tierra de las instalaciones a los cinco años de servicio", esta filosofía de operación ponía la producción por encima de la seguridad.

En la actualidad los reglamentos vigentes exigen la conexión a tierra de todas las partes metálicas que pueden energizarse en un momento dado por una falla a tierra.

A. Sistemas de tierra en baja tensión.

El reglamento de instalaciones eléctricas exige a los usuarios de la energía eléctrica tener su propia conexión a tierra y dice: "En un sistema secundario de suministro puesto a tierra, cada servicio individual debe tener una conexión a un electrodo de tierra. Esta conexión debe hacerse como parte de la instalación del usuario, el lado de abastecimiento del medio de desconexión principal y no en el lado de carga".

A pesar de este requisito pocos usuarios de baja tensión tienen sus tierras instaladas, sin embargo, algunos usuarios que tienen equipos especiales, instalan sus tierras, tal como lo exige el reglamento.

El mismo reglamento para instalaciones en baja tensión dice: "El valor de la resistencia a tierra de los electrodos artificiales no debe ser superior a 25Ω , en las condiciones más desfavorables . Cuando no se pueda lograr esta resistencia con un solo electrodo, deben emplearse, cuando menos un electrodo artificial. "

Sin embargo, los fabricantes de equipos de cómputo, comunicaciones, etc, piden un valor de resistencia a tierra bastante menor que pueden ser 1, 3 y hasta 5Ω para poder dar validez a las garantías y a la vez proteger a los equipos, esto se debe a que los equipos modernos que tienen componentes electrónicos se dañan fácilmente con las sobretensiones.

Los sistemas de tierra en baja tensión, aparentemente son los más simples, ya que no se diseñan a base de potenciales de paso o de contacto, sin embargo, es un hecho que la mayor parte de accidentes por este concepto ocurren en el hogar, en regaderas eléctricas, tinas de hidromasaje, equipos de baño, lavadoras, secadoras, etc.

Hay que poner cuidado en la conexión de los contactos polarizados ya que es común que se invierta la conexión de la tierra física con el neutro lo que ocasiona fallas en los sistemas, por ejemplo una falla en una máquina de escribir puede repercutir en el sistema de cómputo.

Debe quedar claro que la tierra y el neutro no son iguales y su función es muy diferente, el neutro sirve para tener potencial de referencia con respecto a la fase y este conductor en sistemas trifásicos lleva la corriente de desbalance y en sistemas monofásicos lleva la corriente de línea. La tierra conecta las carcasas de los equipos y en condiciones de falla a tierra, lleva la corriente, en condiciones normales no lleva corriente.

El neutro y la tierra física deben unirse en un solo punto, esto se hace lo más cerca posible a la fuente de alimentación.

Se recomienda que el voltaje máximo entre neutro y tierra no rebase un volt. Esto es para evitar que los equipos funcionen en forma inadecuada y no reciban información falsa, sobre todo los equipos computarizados, de comunicación y, también para evitar la introducción de ruido eléctrico.

En instalaciones de gran longitud para lograr esto, se pueden colocar varios cables de neutro o un cable neutro de mayor sección, o tener las cargas balanceadas.

8. DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRA EN MEDIANA TENSIÓN.

Es común que en subestaciones de mediana tensión (13.8 kV, 23 kV, 34.5 kV) se piense que con tener una resistencia a tierra baja es suficiente para proteger los equipos y al personal, sin embargo, existen factores que son determinantes y que si no se cumplen, el diseño no es adecuado ya que se pueden presentar potenciales peligrosos al momento de una falla de corto circuito, algunos de estos factores son: la resistividad del terreno, la corriente de corto circuito, tamaño del local de la subestación, duración de la falla, geometría de la malla, etc.

El diseño se debe basar en la protección del personal y los equipos, disipando las corrientes de falla a tierra sin elevar el potencial que se presenta más allá de lo permisible, es decir, poniendo especial interés en los criterios de los voltajes de paso y de toque. Una red de tierra se forma por regla general por un conductor desnudo enterrado a una profundidad que varía de 30 a 100 cm, en forma horizontal, en forma rectangular, formando una malla y con conductores paralelos en ambos sentidos, con electrodos o varillas colocadas en las esquinas o en cualquier parte de la red. No es necesario que la malla tenga forma rectangular ya que la configuración puede adaptarse a las condiciones del terreno que ocupa la subestación.

Al ocurrir una falla a tierra en una subestación, el voltaje máximo que se presenta en la malla (voltaje de malla) es el peor caso, a excepción de los voltajes transferidos, entonces, el voltaje de malla se puede usar como base para diseño, ya que el máximo voltaje de toque es igual al voltaje de malla. Los voltajes de paso son menos peligrosos que los voltajes de toque, además, por regla general se colocan materiales de alta resistividad en la superficie de las subestaciones, como son: grava, tezontle, tarimas de madera, tapetes de hule, etc.

Para el diseño de estos sistemas de tierra en estas tensiones, se diseñan basándose en la protección de las personas, para lo cual se calculan los potenciales de contacto y de paso.

A continuación se desglosan los conceptos a desarrollar para el diseño de un sistema de tierras.

↳ Obtención de datos de campo.

A : Área total de la malla de tierras [m²].

ρ : Resistividad del terreno tomada en distintos puntos del local en donde se va a realizar esta malla [Ω-m].

↳ Calibre del conductor.

Las primeras normas AIEE y IEEE recomendaban calibres mínimos de 1/0 y 2/0 de conductor de cobre para construir las mallas y en recientes encuestas en diferentes compañías de distribución eléctrica se tiene que la mayor parte usa conductor calibre 4/0 y unos cuantos usan calibres 500 MCM. Sólo el 25% usa calibres de 1/0 o menos sin reportar a la fecha daños mecánicos.

↳ Calculo de potenciales de toque y de paso.

Potencial de toque a 50 Kg $E_t = \frac{116 + 0.17 \rho}{\sqrt{t}}$

$$\text{Potencial de toque a 70 Kg} \quad E_t = \frac{157 + 0.24 \rho}{\sqrt{t}}$$

$$\text{Potencial de paso a 50 Kg} \quad E_p = \frac{116 + 0.7 \rho}{\sqrt{t}}$$

$$\text{Potencial de paso a 70 Kg} \quad E_p = \frac{157 + \rho}{\sqrt{t}}$$

Donde

ρ : Resistividad del terreno.

t : Tiempo típico de apertura de los interruptores (0.5 s).

↳ Diseño inicial.

En este punto se parte de una malla inicial sencilla, en donde se tiene que tomar en cuenta los siguientes parámetros:

D : Espacio entre conductores paralelos de la malla [m].

n : Número de conductores paralelos de la malla.

L : Longitud total del conductor enterrado y de las varillas de tierra [m].

h : Profundidad de la malla [m].

↳ Resistencia de la malla.

La resistencia se puede calcular de la siguiente manera:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

Donde

ρ : Resistividad del terreno [Ω -m].

L : Longitud total de conductor y varillas instaladas [m].

d : Diámetro del conductor [m].

☞ Corriente de la malla.

Esta corriente se deberá calcular por cualquier método ó consultado el dato directamente con la compañía suministradora, también conocida como corriente de cortocircuito.

☞ A continuación se hace una comparación entre potenciales, para determinar si nuestro diseño inicial es correcto, esta comparación se realiza de la siguiente manera:

$$I R \leq E_{\text{toque 50 kg}}$$

Donde:

I : Corriente de la malla.

R : Resistencia de la malla

$E_{\text{toque 50 kg}}$: Potencial de toque a 50 kg.

Si se cumple la anterior condición el diseño de la malla es correcto, si no se procede con los siguientes puntos:

☞ Cálculo de potenciales de paso y de contacto en la malla.

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_{cc}}{L} \qquad E_p = \frac{\rho K_p K_i I_{cc}}{L}$$

Donde:

E_m : Voltaje de la malla.

E_p : Voltaje de paso.

ρ : Resistividad del terreno.

K_m : Factor de espaciamiento para voltaje de la malla.

K_i : Factor de corrección por geometría de la malla

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left\{ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right\} + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

Donde:

D : Espacio entre conductores paralelos de la malla [m].

d : Diámetro del conductor de la malla [m].

h : Profundidad de la red [m].

n : Número de conductores paralelos de la malla [m]: *N.a.i*

Kii : Factor de corrección de peso que ajusta los efectos de los conductores internos de la esquina de la malla.

Kii = 1 Para mallas con varillas a lo largo del perímetro o con varillas en las esquinas o bien con varillas a lo largo del perímetro y en el interior.

Kii = $\frac{1}{(2n)^{2/n}}$ Para mallas sin varillas o mallas con unas cuantas varillas o ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro.

Kh : Factor de corrección de peso que enfatiza los efectos de la profundidad de la malla.

$$Kh = \sqrt{1 + h/h_0}$$

h₀ = 1 m (Referencia de la profundidad de la malla).

Kp : Factor de espaciamento para voltaje de paso.

$$Kp = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{w}{D} \right]$$

$$w \cong \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423$$

w: Conductores paralelos a la malla si "n" es mayor a 6.

$$K_i = 0.656 + 0.172 n$$

I_{cc} : Corriente de corto circuito.

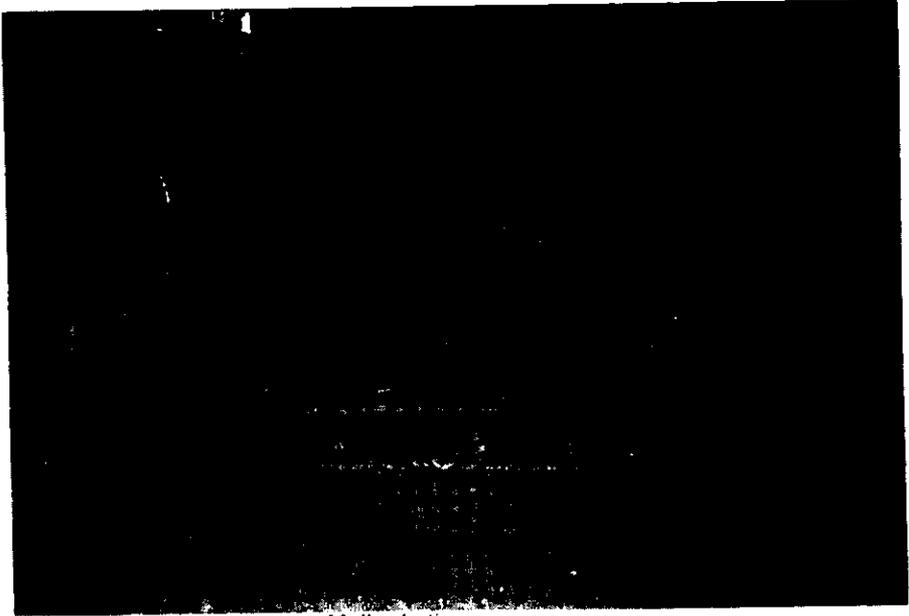
↳ Una vez realizados los anteriores cálculos, se procede a realizar otra comparación entre los siguientes parámetros:

$$E_m < E_{\text{toque 50 kg.}}$$

$$E_p < E_{\text{peso 50 kg.}}$$

Si se cumplen los anteriores parámetros, el diseño es correcto.

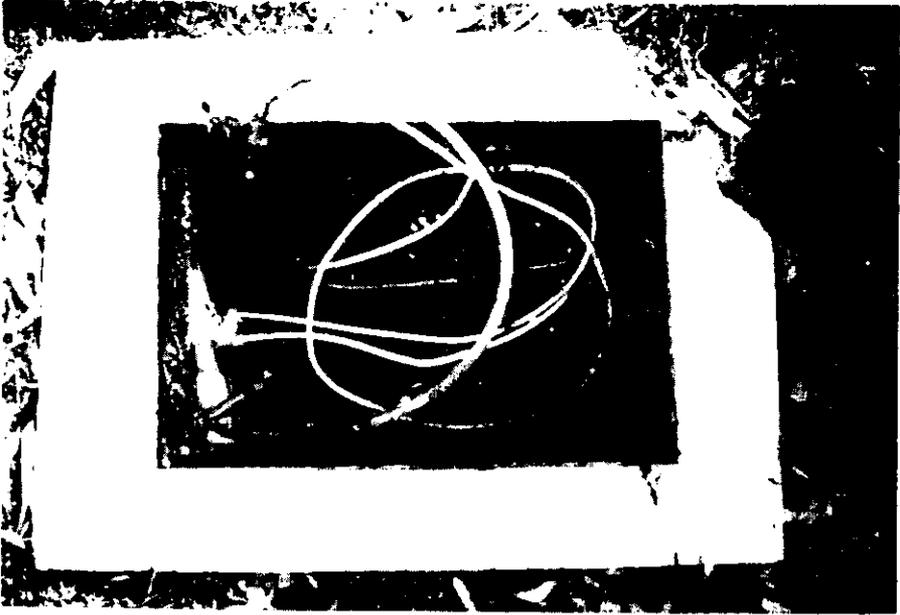
Si no se cumple, entonces se procede a modificar el diseño original de la malla.



Malla de tierra.



Soldadura cadweld para malla de tierra.



Registro de Tierras Físicas.



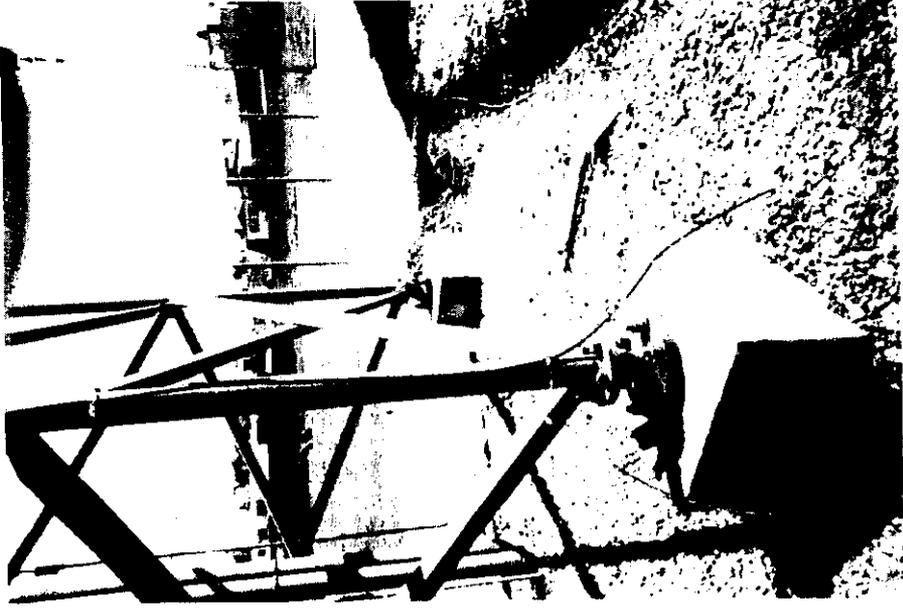
Soldadura cadweld .



Unión con soldadura cadweld.



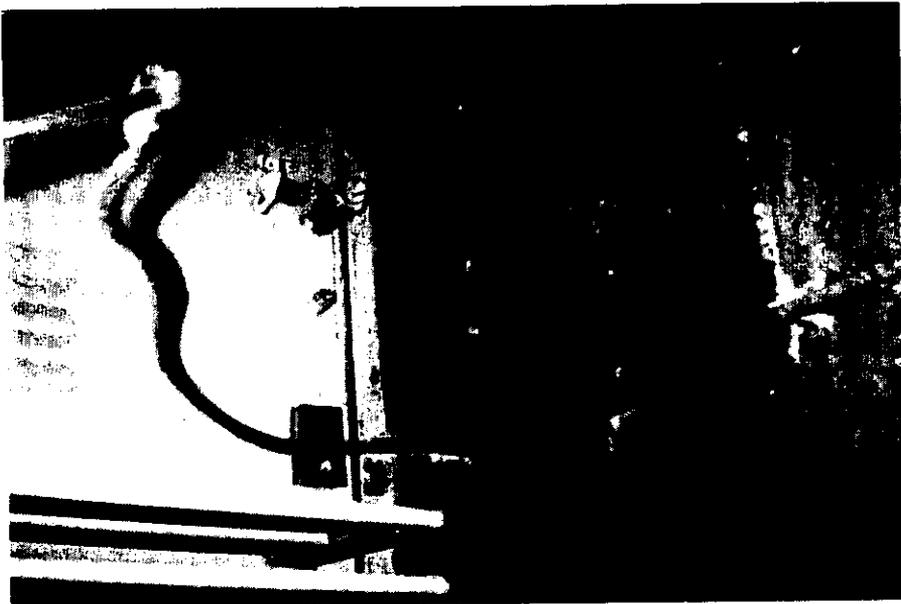
Moldes para soldadura cadweld.



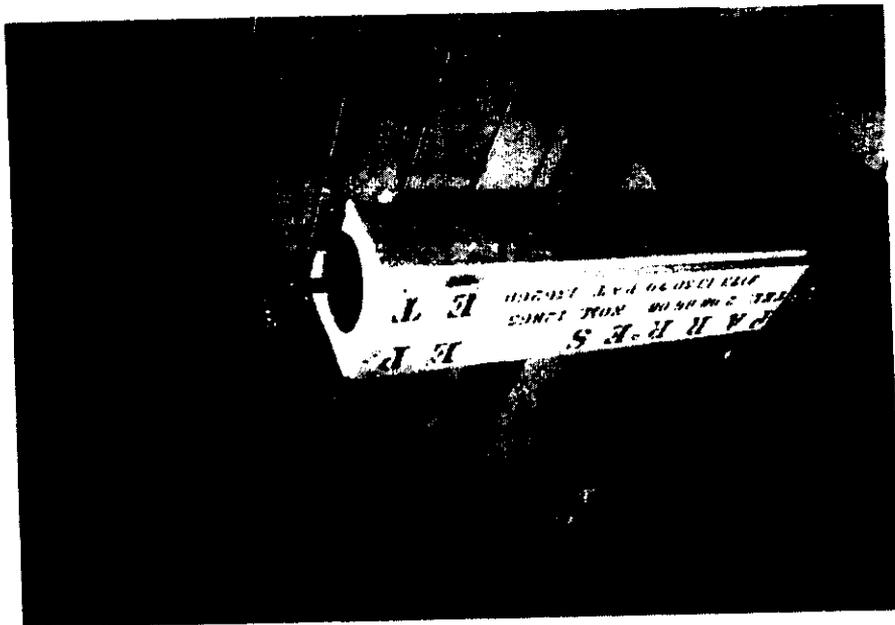
Colocación de tierra física en torre autoportada.



Tierra física en tablero de distribución.



Unión del neutro del transformador con la malla de Tierra



Electrodo de tierra tipo Parres.

CONCLUSIONES

A lo largo de esta obra se pudo estudiar y analizar los parámetros más importantes en cuanto a la protección y corrección de sobretensiones en los sistemas de distribución, los cuales consideramos de vital importancia para el desarrollo integral del país.

Es por lo que también se incluyeron los temas de "calidad de la energía" y "sistemas de tierra" ya que, estas dos áreas tienen que ver con las sobretensiones, por que en la época actual existe una gran cantidad de equipo de cómputo, electrónico, de comunicaciones, etc., todos estos equipos funcionan con energía eléctrica y al existir una mala calidad de la energía puede dañar a estos equipos que son considerablemente costosos, por tal motivo resumimos los puntos más importantes para así saber como evitar la deformación de la onda de voltaje y optimizar más el servicio y el suministro de energía eléctrica.

Es por eso que analizamos todos aquellos aspectos que deforman la onda de voltaje, sus orígenes, causas y formas de corregirlo además, del efecto que surge de la conexión a tierra con respecto a la calidad de la energía, ya que establecemos un voltaje de cero como referencia para un sistema de distribución y así poder contar con una protección para el sistema eléctrico y los equipos (de los cuales ya hemos hecho mención) de voltajes producidos por descargas y cuando se tenga contacto con sistemas de alto voltaje. Los dispositivos que mencionamos para la corrección de la calidad de la energía son los más utilizados hoy en día, es aquí donde mostramos una síntesis de cómo están constituidos y como trabajan, además de sus funciones que llevan a cabo.

Por otra parte retomando ya lo mencionado antes, en cuanto a la relación entre los sistemas de tierra y las sobretensiones, es que actualmente estos sistemas han ganado gran importancia para la protección contra descargas atmosféricas y fallas de corto circuito, ¿ por qué contra las descargas atmosféricas?, como ya lo vimos en capítulo V (Sistema de Pararrayos) una descarga atmosférica puede ser mortal

para equipo electrónico y de comunicaciones, ya que la resistencia que tienen sus componentes llega a ser muy baja, por lo que si no se tiene un sistema de tierra adecuado y eficiente se pueden dañar estos equipos, ya que la descarga no la disiparía el sistema de tierra sino se descargaría directamente en los equipos.

Si contamos con un sistema de tierra de baja resistencia de puesta a tierra, las descargas atmosféricas las podemos controlar (hasta cierto punto) tanto como para el equipo como para el ser humano, nuestro objetivo principal en este tema es recopilar y actualizar la información que existe, para así tener un documento que despeje muchas dudas y que pueda ayudar a la ingeniería eléctrica en campo, de tal forma que se tengan las bases para diseñar e instalar un sistema de tierra que garantice un óptimo desempeño y la protección de diversos equipos (cómputo, comunicaciones, etc.) e inmuebles (edificios, fábricas, subestaciones eléctricas, presas, torres, entre otros) y antes que todos es puntos proteger la vida humana. En cuanto a los apartarrayos no los podíamos dejar fuera de esta obra, ya que es una de las protecciones más utilizadas para las sobretensiones de origen externo, en cuanto a sistemas de distribución, definimos los apartarrayos más utilizados en la red de distribución de la ciudad de México y en el país, ya que existen muy pocos documentos e información acerca de su funcionamiento y operación, aquí podemos analizar cual tipo de apartarrayos responde mejor a una sobretensión de origen externo, en cuanto a su composición, materiales y características de funcionamiento.

Por igual establecemos una reseña de las descargas atmosféricas ya que son el principal motivo por el cual existan fallas en el suministro de la energía eléctrica y también sean causantes de muertes año con año, por tal motivo hay que comprender que es un fenómeno natural al cual estamos expuestos pero al saber de que manera se comporta este fenómeno y si tenemos los conocimientos básicos de que son los sistemas de pararrayos podemos protegernos de este fenómeno natural.

La ciudad de México al igual que otros países de mundo, cada año tienen una gran incidencia de descargas atmosféricas, es por lo que creamos un tema donde se tengan conceptos claros y determinantes para la instalación y diseño de un sistema de pararrayos, aquí hablamos de una norma que nos rige los sistemas de pararrayos ya que en México aún no tenemos una estandarizada, esta norma es la NFPA 780 (National Fire Protection Association) es aquí donde analizamos a detalle los principales requerimientos para un sistema de pararrayos, en donde mostramos desde el material, tipos de pararrayos, instalación y algo muy importante, su mantenimiento.

En conclusión podemos establecer que existe muy poca información sobre algunos de los temas que incluimos en esta obra, por tal motivo decidimos reunir y compactar la información actual para que con esto tengamos los conocimientos necesarios para la aplicación en el campo, que en muchas ocasiones en la práctica no se toman en cuenta y no se cumplen con las normas establecidas.

Por lo tanto esperamos que este documento ayude a futuras generaciones y también a contribuir con la Ingeniería Eléctrica para su desarrollo integral en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Viqueira Landa, Jacinto.
"Redes Eléctricas, Primera Parte"
México, D.F.

- ❖ Calderón, L.R.
"La importancia de la calidad de la energía en
redes eléctricas de suministro estratégico."
Informática e Ingeniería Integral. INININ-1995

- ❖ Espinosa y Lara, Roberto
López Monroy, Guillermo.
López Santamaría, Alberto A.
"Perturbaciones en la energía eléctrica en mediana y baja tensión."
IEEE-1995

- ❖ Espinosa y Lara, Roberto.
"Sistemas de Distribución."
Noriega Editores.

- ❖ Vázquez, David.
Apuntes de la Materia "Sistemas eléctricos de potencia II"
Facultad de Ingeniería, UNAM.

- ❖ Enríquez Harper, Alberto.
"El estudio de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos"
IEEE-1995.

- ❖ López Mena, Valmiki.
Loredo Romero, Rubén.
"Calidad en el servicio a usuarios industrial en redes y circuitos de
distribución".
IEEE-1995.

- ❖ Dagenhart, John.
Consultin engineer, Clap research Associates, P.C.
"Standard Handbook for the Electrical Engineers".
Power Quality.

- ❖ Estándar IEEE 1100-1992.
Prácticas recomendadas por el IEEE para la alimentación y puesta a tierra del equipo electrónico sensible.

- ❖ Espinosa y Lara, Roberto.
López Monroy, Guillermo.
Sosa R, Mario.
"Aplicación de apartarrays de óxido de zinc en sistemas de distribución"
RVP.194 DIS 05. Ponencia recomendada por IEEE.

- ❖ C. Rumualdo T.
"Estudios analíticos para predecir la respuesta de apartarrays de óxido de zinc en líneas de distribución"
IIE. Cuernavaca.

- ❖ Moreno Barraza, Marcos.
Peñaloza, Francisco J.
"Análisis de falla de apartarrays de óxidos metálicos".
LADEM, Irapuato.

- ❖ Plata, Ana Ma.
Félix, Octavio.
Chattopadyay, Sukumar.
"Programa de investigaciones sobre elementos de óxido de zinc"
IIE. Cuernavaca.

- ❖ De la Rosa, Francisco.
"Resultados de la evaluación de diversos métodos de protección contra descargas atmosféricas en circuitos de distribución".
IIE. Cuernavaca.

- ❖ NFPA 780
"Standard of the installation of lightning protection systems"
1995 Edition.

- ❖ National Electrical Code. Edition 1995.

- ❖ Microsoft, Encarta 98.
Encyclopedia 1993-1998.
Microsoft Corporation.

- ❖ Practical Grounding
Copperweld Steel Company.

- ❖ Enríquez Harper, Alberto.
"Estudio de sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos y coordinación de aislamiento". Vol II.
Ed. Limusa.

- ❖ Zoppetti Judez, Gaudencio
"Estaciones transformadoras y de distribución".
Editorial Gustavo Gilio, S.A.

- ❖ Velázquez Sánchez, Raúl.
"Panorama sobre la protección de líneas e instalaciones eléctricas contra sobretensiones de origen atmosférico".
IIE, Cuernavaca.

- ❖ López Monroy, Guillermo.
"Sistemas de tierra en redes de distribución".

- ❖ Re, Vittorio.
"Instalaciones de puesta a tierra".
Ed. Marcombo.

- ❖ Norma Oficial Mexicana relativa a las instalaciones destinadas al suministro y uso de la energía eléctrica. NOM-001-SEMP-1994.