

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**"SOBRE VOLTAJES, CAUSAS Y  
MEDIDAS DE PROTECCION**

**POR:**

*Ing. Silverio Manuel Córdova Romero*

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE:**

**Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica**

**CON ESPECIALIDAD EN:**

**POTENCIA ELECTRICA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L., DIC. DE 1997.**



Img. Silverio Marniel Córdova Romero

TM

Z5853

.M2

FIME

1997

C6

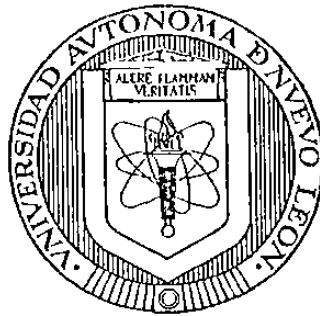


1020122995

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**“SOBRE VOLTAJES, CAUSAS Y MEDIDAS DE PROTECCION”**

**POR**

**ING. SILVERIO MANUEL CORDOVA ROMERO**

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA  
ELÉCTRICA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 1997**

TM  
Z5853  
M2  
FINE  
1997  
C6

0119-22860

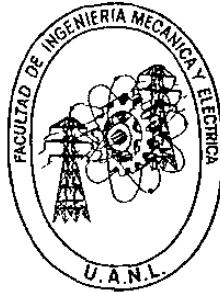


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**“SOBRE VOLTAJES, CAUSAS Y MEDIDAS DE PROTECCION”**

**POR**

**ING. SILVERIO MANUEL CORDOVA ROMERO**

**TESIS  
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA  
ELÉCTRICA.**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 1997**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Sobre Voltajes, Causas y Medidas de Protección " realizada por el Ing. Silverio Manuel Cordova Romero, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Macstro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con la especialidad en Potencia Eléctrica.

El Comité de Tesis



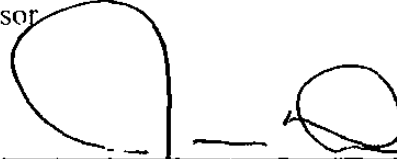
M.C. EVELIO GONZALEZ FLORES

Asesor



M.C. LUIS MANUEL MARTINEZ VILLARREAL

Coasesor



M.C. JUAN DIEGO GARZA GONZALEZ

Coasesor



M.C. ROBERTO VILLARREAL GARZA  
SUB-DIRECTOR DE POST-GRADO

Vo.Bo.

División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Enero de 1998.

## PROLOGO:

Los sistemas de transmisión de energía eléctrica de corriente alterna, sobre todo de alta tensión, han evolucionado en los últimos años de una manera rápida, a pesar de que en sus inicios una gran cantidad de los parámetros que se involucran en el desarrollo de los mismos han sido de carácter empírico. Los primeros sistemas de transmisión se crean en Europa a niveles de los 100 kv y en tiempos modernos, podemos observar sistemas de 400, 800 y hasta de 1200 kv, con tendencia a manejar voltajes superiores a este último.

Dado el carácter empírico de los trabajos realizados en alta tensión y extra alta tensión, se hace necesario la creación de laboratorios especializados donde puedan llevarse a cabo experimentos que normalmente resultan muy costosos, y esto a veces limita la posibilidad de que universidades como la nuestra se vean un tanto limitadas en la construcción de laboratorios de experimentación para estos niveles de tensiones .

Esto crea , sin duda, una dependencia de nuestra universidad a contar con los servicios que pueda proporcionar la Comisión Federal de Electricidad, o depender de información del extranjero, como los Estados Unidos de Norteamérica, o de Francia, o Venezuela para poder elaborar material que nos ayude a mantener actualizados nuestros conocimientos sobre estos temas.

Y uno de los problemas que se presentan en el desarrollo de los sistemas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión y extra alta tensión es la generación de sobrevoltajes que tienden a producir problemas en estos sistemas, por lo que en este trabajo pretendemos exponer los principios fundamentales de este problema, así como algunas formas de ayudar a resolverlos.

Esperando lograr este objetivo, me permito prologar este trabajo a todos los que con su experiencia y a través de sus escritos nos permiten adquirir conocimiento del mismo.

Enrique López Guerrero.



## SÍNTESIS:

En el capítulo primero se presenta una breve Introducción al tema, así como el planteamiento de los objetivos que se persiguen, y la metodología a emplearse en el tratamiento del problema.

En el capítulo (2) dedicado a las Fuentes de Sobrevoltajes se tratan las diferentes causas que generan los disturbios en los sistemas eléctricos, desde la generación de sobrevoltajes causados por la fricción del polvo en las líneas de transmisión, el contacto de sistemas de alto voltaje con sistemas de bajo voltaje, el efecto de resonancia en circuitos serie inductivo - capacitivo creados por el efecto capacitivo de las líneas de transmisión conectadas a transformadores en vacío o con poca carga. Los sobrevoltajes generados en casos de falla de corto circuito intermitente, así como la operación de conectar y desconectar cargas importantes. También se comentan los casos de la conexión de autotransformadores, pero se pondrá especial atención a los sobrevoltajes de origen atmosférico.

En el capítulo (3) dedicado a la Protección de Sistemas de Potencia Debido a Sobrevoltajes Causados por Descargas Atmosféricas, se comenta la naturaleza del sobrevoltaje, como se produce la descarga denominada rayo de acuerdo a las diferentes teorías como la de Simpson, analizando la gota de lluvia, la teoría de Elster y Geitel muy similar a la de Simpson. La teoría de Wilson conocida como la de la ionización de la gota de lluvia. Se comenta sobre el gradiente eléctrico de la tierra. También se describe la tormenta eléctrica para la formación del rayo, el nivel de isodensidad o nivel isocerámico, que define el número de tormentas eléctricas por día mes y año, como se calcula la probabilidad de una descarga. La teoría de Schonland de la formación del rayo, así como los efectos del mismo, los sobrevoltajes generados por el golpe directo del rayo o por el golpe inducido. Se define la forma de onda del sobrevoltaje generado por el rayo, la onda viajera y la onda reflejada, las características del aislamiento. El nivel básico de impulso (NBI), así como los valores de este para los diferentes equipos y para los diferentes valores de voltaje nominal de operación.

En el capítulo (4) llamado Equipos de Protección se definen los conceptos de los dispositivos denominados apartarrayos, sus fundamentos, forma de operación, su constitución. Las características de los apartarrayos, como se hace la selección de los mismos de acuerdo al voltaje de operación del sistema eléctrico que va proteger, así como su mejor localización.

En el capítulo (5) Protección de Equipo Electrónico Sensitivo, se dan los conceptos básicos al respecto, las características de los elementos de protección como son los dispositivos llamados pata de cabra (crow bar), las trampas de voltaje (clamps), así como los diodos avalancha y los varistores.

También se ofrecen las formas de conexión de estos dispositivos, así como unos comentarios respecto al modo de acoplamiento del sobrevoltaje al sistema de equipo electrónico sensible. Se hacen las recomendaciones prácticas para su instalación y las reglas a seguir para el aterrizamiento de estos equipos.

En el capítulo (6) de los Pararrayos, se presentan los conceptos fundamentales de estos dispositivos de protección, el cálculo del nivel de riesgo para determinar que tan severo puede ser el daño que ocasionaría una descarga en una estructura o edificio. Como se protegen estructuras estándar considerando las dimensiones de la estructura, la posición geográfica de ésta, la frecuencia de ocupación de la estructura, el riesgo de pánico, la dificultad de acceso y la continuidad de servicio, también se considera el contenido de la estructura, la forma del techo, su inclinación, en fin. Se definen los Pararrayos con Dispositivo de Cebado (PDC), sus zonas de protección, características, montaje. Se discute la protección de tanques que alojan combustibles, y el diseño de las terminales de aire o puntas pararrayos. Se comenta sobre el área o zona de protección según sea la altura de la estructura y la forma de conectar el sistema de puntas pararrayos al sistema de tierras.

Por último el el capítulo (7) se ofrece un paquete de conclusiones y recomendaciones para un diseño adecuado de protección de un sistema eléctrico contra las sobretensiones, y se ofrece en un anexo características de los dispositivos de protección como los apartarrayos y los pararrayos.

## ÍNDICE.

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCION	6
CAPÍTULO 2 . FUENTES DE SOBREVOLTAJES	8
2.1 ESTÁTICA	8
2.2 CONTACTO FÍSICO CON UN SISTEMA DE MAYOR VOLTAJE.	8
2.3 EFECTOS RESONANTES EN CIRCUITOS EN SERIE INDUCTIVO- CAPACITIVO	8
2.4 CORTOS CIRCUITOS INTERMITENTES.	9
2.5 SWITCHEO.	9
2.6 INTERRUPCIÓN CON CORRIENTE FORZADA- A CERO.	10
2.7 CONEXIÓN DE AUTOTRANSFORMADORES.	10
2.8 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	10
CAPÍTULO 3 . PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A SOBREVOLTAJES CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	12
3.1 NATURALEZA DEL SOBREVOLTAJE.	12
3.2 GOLPE DIRECTO E INDUCIDO.	26
3.3 FORMA DE ONDA.	27
3.4 ONDA VIAJERA.	30
3.5 ONDA REFLEJADA.	32
3.6 CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	36
3.7 NIVEL BÁSICO DE IMPULSO (NBI).	36
CAPÍTULO 4 EQUIPO DE PROTECCIÓN.	40
4.1 APARTARRAYOS, CONCEPTOS BÁSICOS.	40
4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS APARTARRAYOS.	43
4.3 SELECCIÓN DE LOS APARTARRAYOS.	46
4.4 LOCALIZACIÓN DE LOS APARTARRAYOS.	49
4.5 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTOS.	53
CAPÍTULO 5 PROTECCIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO.	56
5.1 CONCEPTOS BÁSICOS.	56
5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DE PROTECCIÓN.	58
5.3 MÉTODOS DE ACOPLE DE LOS SOBREVOLTAJES EN EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO	65

5.4 PRÁCTICAS RECOMENDADAS DE DISEÑO PARA EVITAR SOBREVOLTAJES.	68
5.5 PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA INSTALACIÓN.	69
5.6 TIERRA DE EQUIPO.	71
5.7 REQUISITOS DEL CÓDIGO NACIONAL ELÉCTRICO.	72
CAPÍTULO 6 PARARRAYOS.	75
6.1 CONCEPTOS BÁSICOS.	75
6.2 CÁLCULO DE RIESGO.	76
6.3 PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS ESTÁNDAR.	80
6.4 PROTECCIÓN DE TANQUES ALOJANDO MATERIALES FLAMABLES.	88
6.5 DISEÑO DE LAS TERMINALES DE AIRE.	90
6.6 ÁREA DE PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS ALTAS.	92
6.7 CONDUCTORES DE BAJADA.	93
6.8 TERMINALES DE TIERRA.	94
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
7.1 CONCLUSIONES	96
7.2 RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	98

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de transmisión, generación y distribución de energía eléctrica, así como los sistemas que consumen, o transforman la energía eléctrica en energía de trabajo útil para el desarrollo de las comunidades en el mundo, se ven afectados por una gran cantidad de problemas, que tienden normal mente a dañar los equipos que realizan estas funciones. en este trabajo denominado Sobrevoltajes, Causas y Medidas de Protección, se tratará de lograr los siguientes:

**OBJETIVOS.** este trabajo pretende ser una guía práctica para los ingenieros que incursionan en el diseño de las protecciones contra sobrevoltajes que se generan en los sistemas de distribución eléctrica y en los sistemas de potencia. así como se a dedicado un capítulo a las recomendaciones y criterios de diseño de los dispositivos de protección para equipos electrónicos sensitivos.

**METODOLOGÍA:** se abordaran primero las diferenres causas que generan sobrevoltajes en los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Una de las principales causas de sobretensiones que se producen en los sistemas eléctricos es la descarga atmosférica, comun mente denominada rayo, y por lo tanto se le prestará especial atención a este problema.

En seguida se abordarán los temas relacionados al diseño y selección, características de los dispositivos de protección, tanto para los sistemas de distribución como para los sistemas de potencia.

Por supuesto se le presta atención a la selección, diseño y características de los dispositivos de protección para los equipos electrónicos sensitivos.

Por último se estudian las protecciones denominadas pararrayos diseño e instalación y en forma particular se presentan en este trabajo los dispositivos de protección más modernos que se han desarrollado y son los llamados Pararrayos con Dispositivo de Cebado ( PDC ), los que estan revolucionando el concepto tradicional de la utilización de puntas pararrayos para la protección de estructuras estándar, sistemas eléctricos y demás.

Sobre este particular se ofrecen al final de este escrito y en forma de anexo, información sobre las características y bondades de este tipo de puntas parrayos.

**ANTECEDENTES.** Los sistemas de distribución son diseñados para operar en un voltaje en particular, cuando el voltaje excede el nivel de diseño, por ejemplo, cuando ocurren descargas atmosféricas o la desconexión de circuitos derivados así como fallas de línea a tierra, el personal y las estructuras del sistema corren un riesgo considerable.

Los sobrevoltajes se originan por diferentes causas las cuales ocurren durante la operación normal del sistema por lo cual se requiere un medio de protección seguro para evitar daños a causa de una falla.

Un sobrevoltaje se define como un voltaje anormal entre dos puntos de un sistema, siendo este voltaje más grande que el mayor voltaje de los mismos dos puntos, bajo condiciones de servicio normal. Estos sobrevoltajes pueden ser del tipo de baja frecuencia, temporales y transitorios ( alta frecuencia). La mayoría de los sobrevoltajes son transitorios durando unos cuantos ciclos en microsegundos, el rayo siendo un fenómeno impredecible ocasiona grandes esfuerzos mecánicos y eléctricos en los componentes del sistema.

El sobrevoltaje ocasionado por un rayo en una línea de transmisión puede viajar grandes distancias, ocasionado problemas relacionados con la ferorrresonancia.

En el capítulo siguiente se comentarán algunas de las diferentes causas que pueden generar sobrevoltajes en los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica.



# CAPÍTULO 2.

## FUENTES DE SOBREVOLTAJES

### 2.1 ESTÁTICA

Altos voltajes pueden ser generados por el movimiento de partículas de polvo y arena friccionando conductores de alta tensión aéreos. Y en los sistemas industriales pueden ser provocados por movimientos de bandas no metálicas sobre rodillos .

### 2.2 CONTACTO FÍSICO CON UN SISTEMA DE MAYOR VOLTAJE.

La causa de este sobrevoltaje puede resultar del contacto accidental entre los devanados primario y secundario de un transformador industrial .

También por el contacto accidental entre dos líneas aéreas de diferente voltaje.

Ambas pueden ser causa de sobrevoltajes peligrosos sobre todo en sistemas no -aterrizados y una efectiva protección pudiera ser la de conectar el circuito de menor tensión a un buen sistema de tierras a través de una conexión de impedancia baja capaz de aceptar la máxima corriente de falla a tierra del sistema de alto voltaje.

### 2.3 EFECTOS DE RESONANCIA EN CIRCUITOS SERIE INDUCTIVO-CAPACITIVO.

Tal vez el efecto que produce sobrevoltajes de importancia en los sistemas eléctricos de potencia ( limitado a sistemas de C.A.) sea el denominado ferromresonancia, el cual sin entrar mucho en detalles se define como: un fenómeno oscilatorio creado por la capacitancia del sistema, en conjunto con la inductancia no -lineal de un elemento con núcleo ferromagnético.

Este puede ser un transformador de potencia, de medición, o un reactor de compensación.

Este fenómeno se observa por lo general en sistemas de alta tensión y casi nunca en sistemas de distribución de energía, ya que es precisamente la capacitancia de líneas muy largas la que induce la ferorrresonancia, siempre y cuando la inductancia del circuito asociado se encuentre en condiciones favorables para entrar en resonancia.

Un transformador en vacío u operando con poca carga, puede crear una de esas condiciones favorables. En sistemas con cables de energía la causa puede ser la desproporción entre la gran capacitancia del cable y su resistencia óhmica, la primera de las cuales alimenta y sostiene entonces al fenómeno.

## 2.4 CORTOS CIRCUITOS INTERMITENTES

Este es un caso de generación de sobrevoltajes que pueden desarrollarse en sistemas industriales no-aterrizados y son producto del chisporroteo o conexión intermitente de falla a tierra. Esto puede ser el resultado de la vibración que causa un conductor eléctrico al hacer contacto intermitente con la tierra, o por la dispersión de partículas de metal conductor que establece un camino intermitente a tierra. En cualquier caso si se establece una separación fija entre el conductor y la tierra el incremento progresivo del rompimiento del voltaje entre separación, es un elemento esencial para la producción de sobrevoltajes.

En sistemas de bajo voltaje se pueden provocar sobretensiones de hasta cinco o seis veces el voltaje normal de operación. Estos sobrevoltajes en los sistemas de distribución pueden ser eliminados con un efectivo sistema de neutro aterrizado.

## 2.5 DESCONEXION DE CARGAS IMPORTANTES

La operación específica de maniobra de interruptores de cargas importantes, fallas u otras causas, en un punto dado del sistema constituyen un cambio brusco de los parámetros de los circuitos del sistema y pueden provocar sobrevoltajes que no exceden de 2 ó 3 veces el valor del voltaje normal y generalmente por corto tiempo. Una de las causas que provocan los sobrevoltajes más severos por switcheo es la apertura de un enlace entre dos sistemas o partes de un sistema, al salirse de sincronismos por alguna causa y el switcheo se produce cuando el voltaje de los dos sistemas se encuentra cerca de los 180 grados fuera de fase entre ambos. Otra fuente de sobrevoltajes de este tipo puede darse en los circuitos que alimentan hornos de arco eléctrico.

## 2.6 INTERRUPCION A CORRIENTE CERO FORZADO

Los sobrevoltajes por maniobras ( switcheos ) son muy rápidamente interrumpidos solamente cuando la corriente normal pasa por el valor cero. El término "corriente cero forzada" ó "interrupción fuera del valor cero de corriente" es usado para describir un mecanismo interruptivo ( puede ser un fusible, interruptor , tramos de conductores de pequeño calibre) que tiene la propiedad de desarrollar contra-voltaje en oposición al flujo de corriente, lo suficientemente grande para poder forzar la caída del valor de dicha corriente a cero en un tiempo diferente al de la corriente cero normal, propia del circuito. Debido a los problemas de sobrevoltajes que pueden presentarse, es que los interruptores en vacío tienen poca aplicación , pues estos aparatos tienden a cortar completamente la corriente al instante de abrir sus contactos, por lo cual deben contar con un supresor de voltaje. Los fusibles limitadores de corriente es un ejemplo típico de los mecanismos antes mencionados y debe tenerse cuidado con su uso pues no deberán usarse en un circuito con un fusible de este tipo de un voltaje nominal mayor que el voltaje particular del circuito porque durante su operación se presentan voltajes peligrosos para el nivel de aislamiento del circuito en cuestión.

## 2.7 CONEXION DE AUTOTRANSFORMADORES

Un banco de auto transformadores conectados en estrella que no cuente con un devanado conectado en delta en su construcción , presentará durante su operación problemas de sobrevoltajes peligrosos, debido a la forma no lineal de las curvas de magnetización del transformador , la corriente de magnetización requerida para producir el voltaje de forma senoidal a la frecuencia fundamental, presentará una gran cantidad de corrientes armónicas , predominando las corrientes de tercera armónica, por no contar con una fuente de corrientes de tercera armónica ( devanado en delta ) estas producen voltajes de tercera armónica , que pueden ser fuentes de sobrevoltajes.

## 2.8 SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS

Los fenómenos atmosféricos, en especial la descarga denominada rayo, han sido desde los comienzos de nuestra civilización objeto de estudios y especial interés por parte de reyes , monjes y sabios de todas las épocas , quienes observaban el infinito desde las terrazas de los templos y palacios.

La representación más antigua que se conoce del rayo data del año 2200 a.c. , y se le atribuye a un paje de Bursin, rey de la ciudad de Isin, en Mesopotamia. Ya para el año 700 a.c. se observa la representación del rayo en la cultura griega , y así sucesivamente, hasta nuestros días.

Desde un punto de vista más técnico, el rayo adquiere gran importancia cuando Benjamín Franklin, en el mes de junio de 1752, pone de manifiesto la electricidad en las nubes al hacer saltar chispas de su célebre cometa. Otros hechos, como la destrucción de edificaciones y embarcaciones causadas por el rayo, entre las cuales resalta el barco de guerra inglés Rodney el 6 de diciembre de 1838 ,y la muerte de muchas personas, entre ellas el profesor Richman, de la Academia Real de San Petersburgo, quien muere fulminado por un rayo experimentando con la electricidad de las nubes el 6 de agosto de 1753, motivaron a prestarle una atención cada vez mayor a tan interesante fenómeno.

Sin embargo, el estudio sistemático del rayo y sus efectos se inicia en el año de 1924 en Suecia, debido en primer lugar a que el rayo comienza a perturbar las líneas de transmisión de la época. Casualmente en esa misma fecha empieza la aplicación práctica de una de las herramientas más valiosas en su observación y medición, como lo es el osciloscopio de rayos catódicos.

Desde entonces la alta tensión dispensa especial cuidado al estudio de todos los fenómenos eléctricos que en una u otra forma afectan a los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

En el siguiente capítulo comentaremos algunas teorías acerca de como se forma este fenómeno así como los efectos del mismo en los sistemas eléctricos.

## CAPITULO 3 .

### PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A SOBREVOLTAJES CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

#### 3.1 NATURALEZA DEL SOBREVOLTAJE.

Antes de entrar en detalles acerca de los efectos del rayo es preciso saber más sobre la naturaleza y origen del mismo. En los siguientes párrafos se exponen, por consiguiente, las teorías más acertadas sobre el fenómeno en referencia. Sin embargo, antes conviene resaltar algunos aspectos de interés puestos en común de manifiesto por casi todos los postulados:

##### 3.1.1 LA NUBE DE TORMENTA

La nube de tormenta denota una constitución bipolar, en la cual la carga negativa se encuentra espacialmente por debajo de la carga positiva. Acerca de la forma en que se lleva a cabo tal distribución de cargas en la nube, no existe coincidencia de opiniones. Numerosos experimentos con globos sonda han verificado, no obstante dicha distribución. La mayor parte de estos, a nivel mundial, fueron conducidos en la década de los años 30 por institutos de física estadounidenses. La configuración simplificada de una nube de tormenta se ilustra en la figura 3.1.1.

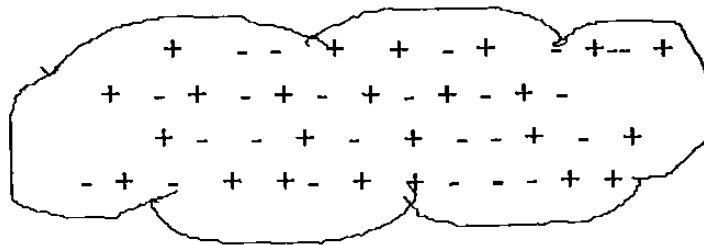


FIG. 3.1.1 CONFIGURACION TIPICA DE UNA NUBE DE TORMENTA.

### 3.1.2 TEORIA DE SIMPSON.

Esta teoría es de amplia aceptación práctica, pues se fundamenta en experimentos llevados a cabo en laboratorios.

Cuando se desintegran gotas de lluvia por la acción de una fuerte corriente de aire, las partículas así formadas denotan una carga positiva, y el aire, a su vez, acusa la presencia de una gran cantidad de cargas negativas de muy poca masa, y por consiguiente, gran movilidad.

En la naturaleza sucede esto cuando la corriente de aire alcanza la velocidad suficiente para desintegrar las gotas de lluvia. La corriente de aire transporta los iones negativos hacia la parte superior de la nube, donde se combinan con las partículas de agua. Las gotas positivas que han sufrido un fraccionamiento también son llevadas hacia arriba por la acción del viento, y cuando este cesa a determinadas alturas, se unen entre ellas para formar así gotas grandes y caer de nuevo. Al llegar a la zona de vientos fuertes se desintegran otra vez, aumentando así la carga positiva.

La figura 3.1.2 muestra la distribución de cargas en la nube según Simpson, la cual ha podido ser constatada en la práctica con la ayuda de globos sonda. Es interesante apreciar que mientras la parte inferior de la nube denota una temperatura promedio de  $4^{\circ}\text{C}$ , la parte superior alcanza valores de hasta  $-32^{\circ}\text{C}$ . Estos gradientes térmicos desempeñan como se verá posteriormente, un papel muy importante al formarse la descarga, ya que favorecen a esta con orientación terrestre.

La teoría de Simpson tiene gran ventaja a su favor, ya que puede ser simulada en los laboratorios: gotas de aproximadamente 5mm de diámetro se desintegran cuando el viento alcanza velocidades superiores a los 8m/s, obteniéndose una distribución de cargas parecida a la establecida por Simpson.

En la zona donde el viento no alcance esta velocidad crítica no se podrá formar la distribución espacial de las cargas señaladas arriba, dificultándose así la precipitación.



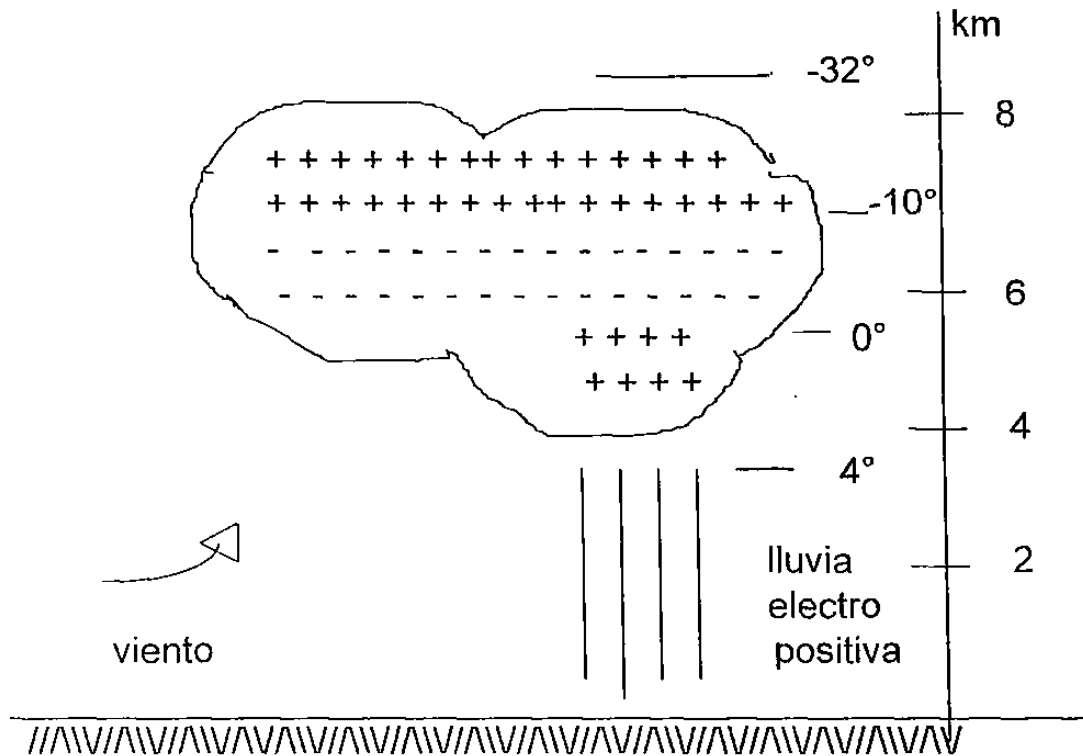


FIG. 3.1.2. Distribución de cargas en la nube según Simpson.

Según Simpson, las primeras gotas de lluvia de tormenta denotan comportamiento electropositivo, según se puede verificar en los pluviómetros. Estas proceden, del foco de la tormenta señalado en la fig. 3.1.2, las gotas siguientes denotan ya un carácter electronegativo y solo en estados avanzados de la tormenta es cuando vuelven a observarse gotas electropositivas. Se supone que estas provienen entonces de los estratos superiores de la nube.

### 3.1.3 TEORIA DE ELSTER Y GEITEL

Esta teoría también se conoce con el nombre de teoría de la influencia eléctrica. En la nube se encuentran gotas de diferentes tamaños las más grandes se precipitan y las más pequeñas son llevadas por el viento hacia arriba.

Las gotas polarizan por la acción del campo eléctrico existente, el cual, como se verá a continuación, denota una dirección terrestre.

Esto conduce a la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma.

El roce de una gota grande con una pequeña, al caer, trae como consecuencia un intercambio de cargas. En la gota pequeña predomina entonces la carga positiva y en la grande la negativa. Ambas gotas se desplazan en sentido opuesto. En la nube, por consiguiente, se acumulan poco a poco cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior. El campo eléctrico que así se forma favorece la separación de cargas por influencia.

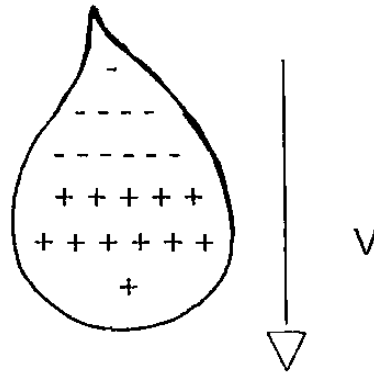


FIG. 3.1.3 Gota de lluvia según Elster y Geitel.

En la figura 3.1.3 se ilustra el pensamiento básico de Elster y Geitel. La formación de la nube se parece a lo establecido en la teoría anterior, no así la distribución y la separación de cargas, ya que el roce entre las gotas desempeña un papel determinante.

Informaciones recientes le restan importancia a esta teoría, ya que el roce entre gotas parece ser importante sólo en la formación de la lluvia y no en la distribución espacial de las cargas eléctricas.

### 3.1.4 TEORIA DE WILSON.

Conocida también como la ionización de la gota de lluvia, esta teoría asume, al igual que la de Elster y Geitel, una gran influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson reemplaza a la acción de la gota pequeña de la teoría anterior por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre las gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico de por sí existente. La parte superior de la gota acusa entonces carga negativa y la inferior carga positiva.

El viento, a su vez, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota.

Los iones positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la nube, escapando así a la atracción de la mitad superior de la gota, la cual continúa su caída, por consiguiente, sólo con carga negativa. La nube denota entonces una carga positiva en su mitad superior y una negativa en la inferior.

Esta teoría tropieza con algunas dificultades que se derivan de observaciones prácticas. Así, por ejemplo, el tiempo medio de formación de una carga eléctrica de  $1 \text{ Cb/km}^3$ , por la acción de un gradiente eléctrico de  $1 \text{ kv/cm}$ , asciende a 170 min. Para la formación de la tormenta atmosférica esta carga resulta ser muy pequeña y con un tiempo de formación muy largo. Esto le resta importancia a la teoría de Wilson, aunque la misma contribuye a explicar la distribución de cargas eléctricas en la nube.

Existen otras teorías de la formación de la nube de tormenta, entre las cuales resaltan la de R. Gunn (teoría de condensación), Workman y Reynolds, y otros. En vista de que estas no han adquirido importancia práctica, como las anteriores, solo se les menciona sin entrar en detalles.

### 3.1.5 EL GRADIENTE ELÉCTRICO.

El valor promedio del gradiente eléctrico, en la proximidad de la tierra, oscila alrededor de los  $5 \text{ v/m}$ , para incrementarse vertiginosamente en la proximidad de las líneas de transmisión a  $5 \text{ kv/m}$  y bajo focos de tormenta  $15$  y más  $\text{kv/cm}$ .

Sobre la dirección del gradiente eléctrico puede abundarse; conviene sin embargo, aclarar lo siguiente: la tierra viene siendo el electrodo negativo de un gran campo eléctrico cuyo electrodo positivo es una carga concéntrica situada a unos  $120 \text{ km}$  de distancia (capa de Heaviside-Kennely).. A unos  $250 \text{ km}$  de distancia se encuentra otra capa, mas fuertemente ionizada con polaridad positiva que la anterior (capa de Appleton). Ambas capas le confieren al gradiente eléctrico una dirección terrestre. Figura 3.1.5.



encima de los 0°C (aproximadamente +4°C). Esta afirmación se ve verificada en la práctica por un sencillo pero relevante hecho : las primeras descargas eléctricas hacia la tierra denotan comportamiento electronegativo.

En estas circunstancias se puede resumir al ciclo de una tormenta eléctrica de la siguiente manera:

1.- Durante el crecimiento de la nube se observa la presencia de fuertes vientos ascendentes. Esto sucede aproximadamente de 10 a 15 minutos antes de la formación de las primeras gotas de agua.

2.- Una vez constituida la nube se observan vientos descendentes, en especial en su parte inferior, así como descargas atmosféricas y precipitación. Esta fase intermedia dura de 15 a 30 minutos.

3.- Durante el desmoronamiento de la nube, con un tiempo de duración aproximado de 30 minutos, se observan leves vientos descendentes a través de todo el volumen ocupado por la nube, al igual que una ligera atenuación de las descargas atmosféricas y de la precipitación.

El tiempo total de duración de una nube de tormenta es, por consiguiente, de una hora pudiéndose extender temporalmente al formarse nuevos focos de tormenta.

### 3.1.7 LA DESCARGA DENOMINADA RAYO.

El punto de partida de una nube de tormenta cuyas cargas eléctricas se encuentran distribuidas, pero no en forma homogénea, de acuerdo con lo expuesto anteriormente, entre las concentraciones de cargas desiguales de la nube, principalmente en las de la zona inferior, comienzan a ocurrir pequeñas descargas eléctricas. Esto sucede una vez que el gradiente eléctrico alcanza valores superiores a 5 kv/cm. Así y como consecuencia de la ionización por choque, se va formando una gran cantidad de cargas eléctricas, las cuales disminuyen apreciablemente la rigidez dieléctrica de la zona afectada.

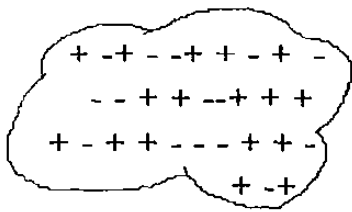


FIG 3.1.7.1 Nube de tormenta con distribución irregular de las cargas eléctricas.

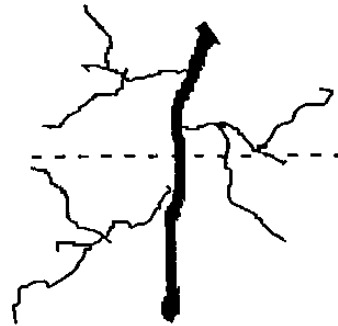


FIG.3.1.7.2 Crecimiento tortuoso de la descarga piloto.

Estas cargas eléctricas comienzan entonces a crecer en forma de avalancha, formando una especie de cono llamado descarga piloto (pilot streamer), el cual, por la acción de gotas de agua y corriente eléctrica, crece en ambas direcciones (fig. 3.1.7.2). La intensidad de corriente que acompaña a la descarga piloto es tan leve (solo algunos amperios) que no la puede registrar una cámara fotográfica.

La velocidad de propagación de esta descarga, no obstante, si es considerable ( $1/20$  de la velocidad de propagación de la luz, 15000 km/seg), con un recorrido o existencia promedio de solo 50 m.

La tortuosa trayectoria de dichas descargas le confiere al rayo su aspecto característico.

Una vez que la descarga piloto llega a la tierra, cuyos pormenores se expondran más adelante, queda trazado en el espacio interelectrónico ( nube- tierra ) un canal o sendero plasmático, donde el aire ha sido fuertemente ionizado y por el cual pasarán las descargas sucesivas ( return, streamer, dart leader ). En el breve tiempo que estas duran se produce un súbito calentamiento del aire, y se supone que el trueno se debe a la brusca dilatación que este calentamiento trae consigo. Al mismo tiempo se producen fenómenos de luminiscencia ( relámpagos ), como los que se observan en el seno de los gases enrarecidos, atribuidos a la explosión de un compuesto muy inestable -*la materia cerámica o fulminante*- de los elementos de la atmósfera. Cuando el estrépito de trueno es perceptible, se puede calcular fácilmente la distancia a la que ocurrió la descarga : omitiendo la velocidad del sonido ( 332 m/seg ), en comparación con la de la luz, se obtiene la relación de 1 km por cada 3 seg. de retraso, entre la percepción del fenómeno óptico y la del acústico, más sensible de noche que de día. Así mismo, cuando la descarga en forma de canal ( pilot streamer ) se va acercando a al tierra, aumenta considerablemente el gradiente eléctrico, favoreciendo la formación de un canal de recepción.



Este, partiendo de la superficie de la tierra, crece en sentido opuesto. Cuando ambos se encuentran comienza a fluir la intensidad de corriente de descarga. Este fenómeno se trata detalladamente más adelante, en la teoría de Schonland.

Este último detalle se ha podido verificar en la práctica con cámaras ultrarrápidas, entre ellas la cámara de Boys. En las placas se pueden observar una solución de continuidad del canal plasmático en intervalos de 30 a 90 seg. Se cree que esto obedece a ionizaciones por choque, las cuales van preparando la próxima descarga, mientras que las ramificaciones (stepped leader) se atribuyen a la acción del viento. Estas no siempre llegan al electrodo opuesto ya que la intermitencia en forma de canal les quita toda la energía. Los rayos globulares pueden ser el resultado de estas descargas inconclusas aureales.

Preparado ya el camino o canal de la descarga se produce la descarga principal: gran cantidad de cargas eléctricas negativas abandonan la nube. Inmediatamente, y con el fin de neutralizar la carga eléctrica en esta, una gran cantidad de cargas positivas abandonan la tierra (return streamer). En la mayoría de los casos el choque de estas cargas es tan fuerte que, como consecuencia del excedente de cargas, en la nube se produce una segunda descarga hacia la tierra a través del mismo canal (dart leader), y así sucesivamente. La velocidad de propagación de estas últimas es más lenta (3% de la velocidad de la luz). El número de ellas puede llegar en algunos casos hasta 54.

La estadística arroja los siguientes valores para el rayo, los cuales deben ser considerados por el ingeniero de potencia:

1.- El 50% de todos los rayos consta de dos descargas, y el 10% aproximadamente de siete descargas sucesivas.

2.- Del 60% al 95% de los rayos que caen en la tierra son electronegativos, lo que hace suponer que el rayo proviene de la parte inferior de la nube. Solo cuando la tormenta se encuentra en un estado más avanzado se registran rayos con cargas positivas, lo que hace suponer que provienen de la parte superior de la nube.

3.- La duración promedio de un rayo, con sus descargas, es de 0.15 seg., la duración máxima no excede de 1.5 seg.

4.- Se supone que en la tierra caen aproximadamente 100 rayos por segundo. Esto ha motivado a algunos científicos a tratar de hacer uso, con fines experimentales, de su contenido energético.

Para efectos de protección en los sistemas de transmisión de energía es conveniente saber lo siguiente:

5.- El 50% de las descargas atmosféricas acusa una intensidad de corriente inferior a los 20 kA.

6.- Sin embargo, el 5% de los rayos que caen en la tierra acusa intensidades de corriente hasta 160 kA, habiéndose registrado descargas de hasta 400 kA. Estos valores conllevan al peligro de descarga retroactiva.

7.- La energía de un rayo es, por consiguiente, aproximadamente de 10 a 100 kWh, pero con una potencia destructiva de 10 a 10 kW. La longitud que puede alcanzar una chispa eléctrica con dicha energía llega a los 20 km, siendo la de 10 o 12 km la más frecuente.

### 3.1.8 EL NIVEL ISOCERÁUNICO.

Cuando se diseñan líneas de transmisión de energía eléctrica es conveniente saber hasta que punto estas se encontrarán expuestas a los daños de las descargas atmosféricas, en particular si las líneas denotan tensiones nominales de operación inferiores a 300kV. De allí que la frecuencia local de las mismas sea de interés para el técnico de alta tensión. Para tal efecto se utiliza el concepto de nivel isoceráunico, el cual indica el número de días por mes y año en que se puede oír truenos en un área de 10 km de radio, cuyo centro viene siendo el sitio en cuestión.

Esta observación o registro del fenómeno se venía haciendo visualmente, lo cual en realidad resultaba ser una apreciación muy subjetiva. El nivel que se obtiene, además, al medir o cuantificar a los truenos es el isobróntico.

Afortunadamente la universidad técnica de Darmstadt, en Alemania Occidental, desarrolló un instrumento para el registro automático de los rayos, el cual fue muy pronto aceptado por el CIGRE; hoy en día se conoce por consiguiente, como el CIGRE COUNTER. Este instrumento, con la ayuda de una sencilla antena, está en condiciones de detectar variaciones del gradiente eléctrico superior a 5 V/m en un área aproximada de 500 km<sup>2</sup>. El establecimiento de un tiempo muerto de 1 seg. impide, inclusive, que un rayo de larga duración sea contando el doble. El instrumento del CIGRE indica la densidad de rayos por año y km<sup>2</sup>, operando a 10 kHz y 500 Hz. en dos unidades diferentes. A partir de los años 80 este instrumento se ha visto en parte desplazado por instrumentos altamente sofisticados, a base de radares muy sensibles con soporte de computadores y graficadores, los cuales indican la ubicación y avance de la tormenta en un radio de hasta 400 km.

No obstante, la mayoría de los países ha levantado mapas isoceráunicos con la ayuda de los contadores del CIGRE citados anteriormente. En vista de la importancia que revisten estos contadores, es prudente resaltar sus ventajas :

Contador de 10 kHz : Este instrumento se recomienda para la medición de altas densidades de descargas atmosféricas ( $> 5/\text{km}^2$ ) , como las que suelen presentarse en zonas tropicales y subtropicales. Tiene la ventaja, además de poder diferenciar las descargas atmosféricas que inciden directamente sobre la tierra, de aquellas que ocurren dentro de la misma nube o entre nube y nube.

Es de señalar que a los efectos de las líneas de transmisión interesan fundamentalmente las descargas que caen sobre la tierra.

Contador de 500 Hz : Este es el más sensible de todos los contadores y su aplicación se recomienda en áreas de baja actividad cerámica ( $< 2/\text{km}^2$ ), o también se quiera detectar prematuramente la aproximación de nubes de tormenta.

### 3.1.9 PROBABILIDAD DE DESCARGA ATMOSFÉRICA DIRECTA.

Muy importante en la práctica es la determinación del parámetro  $N_e$ , el cual estipula el número de rayos por día de tormenta para un sitio determinado en función de la distancia al ecuador :

$$N_e = (0.1 + 0.35 \text{ sen } \lambda ) ( 0.4 \pm 0.20 ) \quad \text{Ec. 3.1.9}$$

$N_e$  indica el número de rayos por día de tormenta y por  $\text{km}^2$  y  $\lambda$  es la latitud geográfica.

De la expresión 3.1.9 se puede deducir, en forma aproximada, el riesgo que tiene una estructura cualquiera de ser alcanzada por una descarga atmosférica. El área de atracción de la estructura depende de la intensidad de la corriente de la descarga (fig. 3.1.9.3). La distancia radial  $d$  varía entre  $2H$  y  $10H$ , siendo  $H$  la altura de la estructura.

Ejemplo : Para el caso particular de  $2H$ , al cual le corresponde, según la fig. 3.1.9.3, el 50 % de las descargas (20 kA), el área total de atracción esta dada por:

$$S = L A + 4H(L+A) + 4H^2$$

Si  $L=50$ ,  $A=30$  y  $H=30$  m respectivamente, se obtiene un área de atracción de  $0.022 \text{ km}^2$ . Si la estructura se encuentra en una latitud geográfica de  $50^\circ$ .

La relación 2.1.9 suministra 0.01 rayos por día de tormenta y  $\text{km}^2$ . Si el nivel isoceráunico es de por ejemplo 30, entonces la probabilidad de descarga será de  $1/0.30=3.3 \text{ km}^2$  de área por año, es decir, un impacto por cada  $3.3/0.02=160$  años.

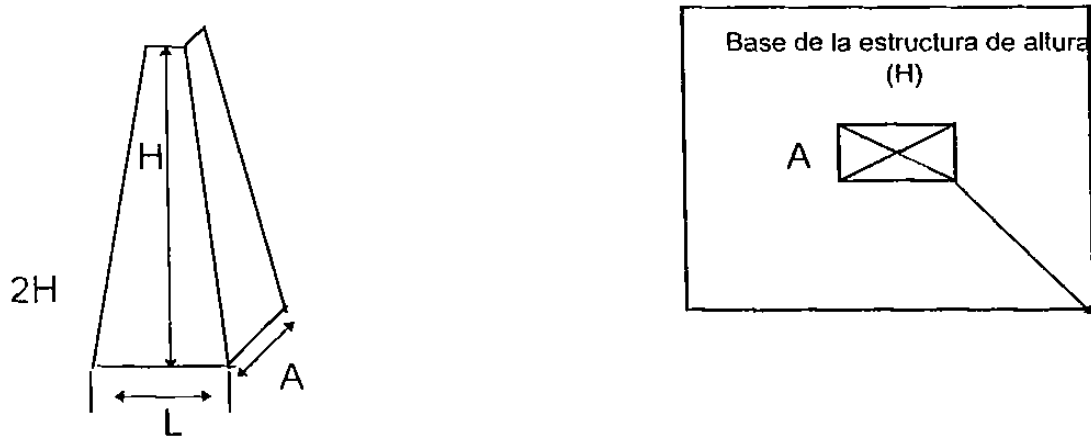


Fig. 3.1.9.3 Estructura de dimensiones conocidas, y área de atracción del rayo.

### 3.1.10 LA TEORIA DE SCHONLAND.

El ciclo de la nube y la consiguiente descarga denominada rayo se puede resumir de la siguiente manera:

a) Las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo, por consiguiente, concentraciones desiguales de carga en el seno de la misma.

Mientras el gradiente eléctrico de la tierra permanece casi invariable ( $100 \text{ v/cm}$ ), el gradiente eléctrico en la nube se aproxima al valor crítico ( $5 \text{ kv/cm}$ ), de allí que la descarga provenga de la nube y no de tierra.

b) El gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, comenzando a ocurrir pequeñas descargas en el seno de la nube. Estas, en virtud de la ionización por choque descrita anteriormente, van degenerando en una especie de avalancha, denominada descarga piloto (pilot streamer), la cual avanza con una velocidad promedio de  $250 \text{ km/seg}$ .

La parte superior de la nube se encuentra a una temperatura promedio de  $-30^\circ \text{ c}$ , acusando la presión, por lo tanto, un valor mucho más bajo que la parte inferior de la misma.

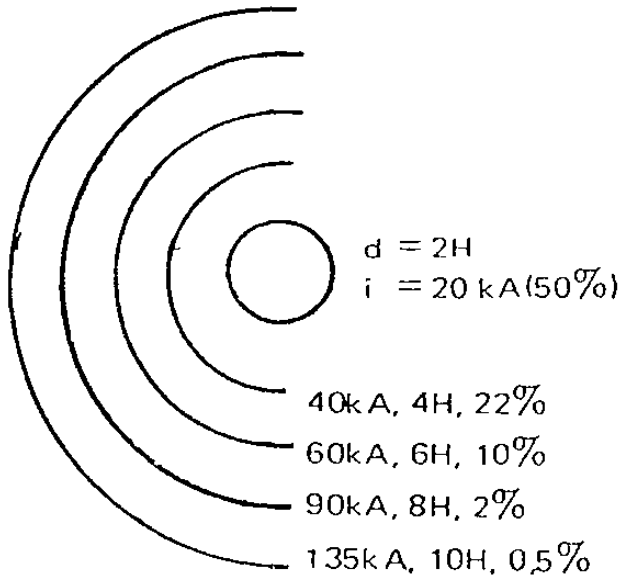


FIG. 3.1.9.3 VARIACION DE LA DISTANCIA RADIAL  $d$  EN FUNCION DE  $i$  (KA) Y  $H$  (m)

A la cual le corresponde una temperatura de aproximadamente  $0^{\circ}$  C. La rama de la descarga orientada hacia la tierra tiene entonces, las mejores condiciones para su propagación.

c) La rama de la descarga piloto orientada hacia la tierra logra imponerse en su crecimiento, viéndose acompañada de pequeños puntos luminosos, característicos de las descargas escalonadas (stepped leader), cuyo tiempo de duración es relativamente corto recorriendo un trayecto aproximado de sólo 50 m a una velocidad de 50 000 km/seg.

Las descargas escalonadas parecen tener su origen en la acción del viento, llegando raras veces a la tierra. Esto se debe a que la intermitencia de la descarga piloto (de 30 a 90  $\mu$ seg) les sustrae la energía necesaria para tales fines. El incremento del gradiente eléctrico, al aproximarse la descarga a la tierra, favorece la formación de un canal de recepción.

d) El canal de recepción sale al encuentro de la descarga piloto, la cual trae gran cantidad de cargas negativas consigo, formándose así un canal plasmático. Para neutralizar la carga de la nube, una gran cantidad de cargas eléctricas positivas abandona entonces la tierra, utilizando el mismo canal o sendero previamente ionizado, a través del cual ocurrirán todas las descargas sucesivas, la primera de las cuales se denomina descarga de retorno (return streamer).

La velocidad de propagación de esta descarga es de aproximadamente 30 000 km/seg, siendo apreciable el valor de la intensidad de corriente que las caracteriza ( hasta 200 kA ). Mientras la descarga principal requiere de un tiempo aproximado de 20 000  $\mu$ seg en llegar a la tierra, la descarga de retorno acusa un tiempo promedio de 100  $\mu$ seg en lograr su cometido.

e) El impacto provocado por las cargas eléctricas, que la descarga de retorno introduce en el seno de la nube es tan fuerte que en la mayoría de los casos se origina una segunda descarga orientada hacia la tierra, denominada descarga secundaria ( dart leader ), con una velocidad promedio de 3 000 km/seg.

Este dúo ( return streamer, dart leader ) puede repetirse un número de veces apreciable ( hasta 7 combinaciones sucesivas ). Las cargas positivas procedentes de la nube se observan sólo en estados avanzados de la tormenta, cuando la descarga secundaria se las trae a la tierra.

Obsérvese: La velocidad más lenta de todas las descargas mencionadas hasta ahora es la correspondiente a la descarga piloto o principal, la cual al penetrar en el aire virgen no excede de los 150 km/seg.

Esta descarga, en consecuencia, necesita según el caso un tiempo promedio de 20 000  $\mu\text{seg}$  para llegar a la tierra. En la fig. 2.1.10 se representa este fenómeno en función del tiempo.

### 3.1.11 EFECTOS DEL RAYO.

Las consecuencias más importantes del rayo en el sistema de transmisión afectado se pueden resumir de la siguiente manera:

Efecto dinámico: el rayo se puede caracterizar por corrientes de hasta 400kA, las cuales en caso de reflexiones desfavorables pueden ascender hasta 800 kA. En un conductor eléctrico la corriente ejerce una fuerza, la cual se obtiene directamente de la ley circuital de Ampere, A saber

$$F = B L I = \mu_0 L I^2 / 2\pi a$$

donde B es la inducción magnética, I es la intensidad de corriente del rayo y L la longitud del conductor. La distancia que separa un conductor de otro es a.

En el caso de un lazo formado por el conductor, o en el de barras colectoras en una subestación, la misma intensidad de corriente es la que genera o engendra al campo magnético dado por B. La fuerza que ejerce un rayo en conductores en paralelo es por lo general muy superior a la que se observa en caso de corto circuito, de allí que sea imperativo tomar las prevenciones correspondientes.

Efecto térmico: Toda intensidad de corriente, al pasar por una resistencia, produce la siguiente potencia térmica de disipación  $P = I^2 R$ . El calor que se disipa es proporcional al tiempo de la acción de la intensidad de la corriente.

Despreciando la derivada respectiva se puede suponer la temperatura del conductor proporcional al tiempo de acción. La energía así disipada será entonces :

$$dw = u I dt$$

en la práctica el tiempo de acción promedio no excede, por lo general, los 120  $\mu\text{seg}$ . Si se supone ahora, a título de ejemplo, un conductor de cobre de 10 m de longitud, 25  $\text{mm}^2$  de sección, afectado por una corriente de 50 kA, se obtiene

$$R = 7.15 \ \Omega \text{ y } W = I^2 R t = 2 \ 140 \ \text{W seg} = 512 \ \text{cal.}$$

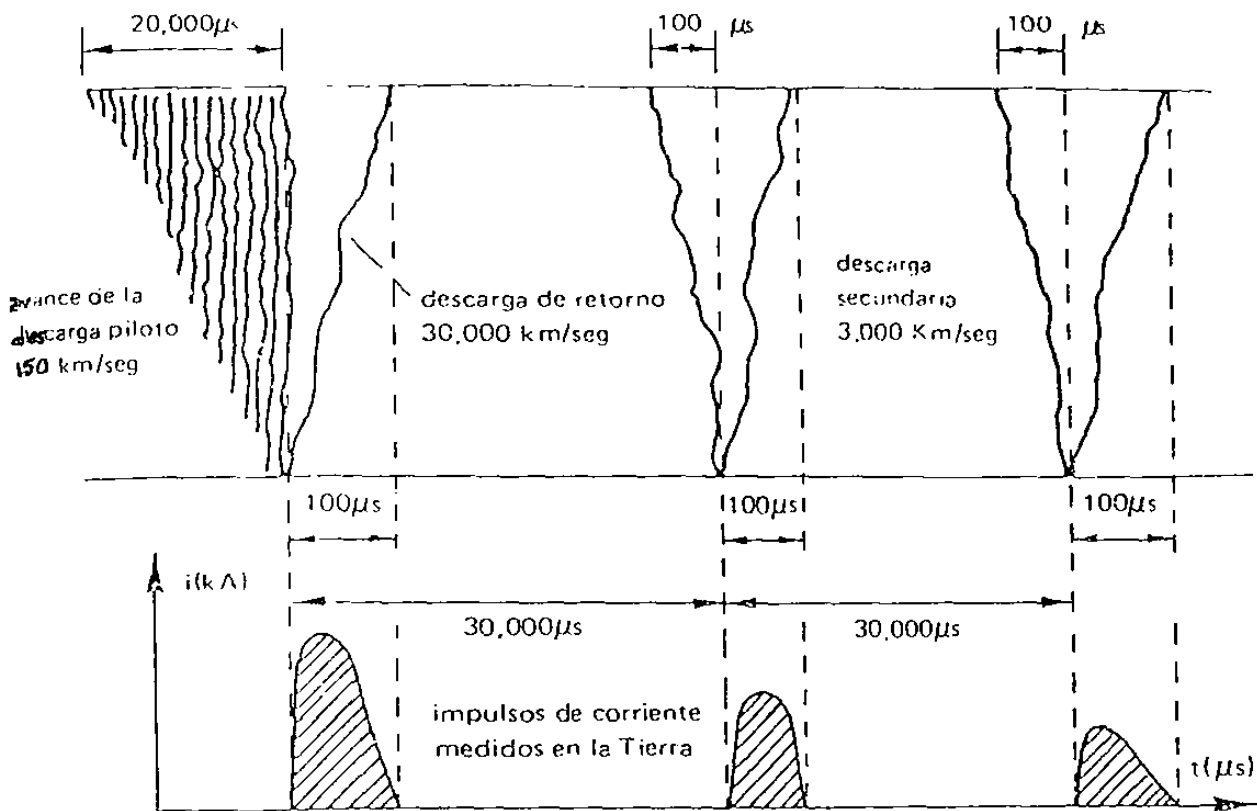


FIG. 3.1.1.0 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL PROCESO DE DESCARGA DE UNA NUBE DE TORMENTA SEGUN SCHONLAND Y COLLENS



Este valor es relativamente pequeño si se toma en cuenta que para derretir un gramo de cobre se requiere 48.9 calorías. La cantidad de energía antes mencionada podría derretir 10.5 gramos de cobre únicamente. En los pararrayos es menester considerar este particular al diseñar la masa de cobre requerida para las derivaciones a tierra.

Efecto químico: En su trayecto el rayo encuentra tres medios diferentes, aire, metal y tierra. En el primero no se produce nada descomunal, formándose ozono, ácido nítrico y ácido nitroso, los cuales se utilizan como fertilizantes. En el metal la reacción química de importancia es una ligera corrosión, la cual no conduce a una inutilización del pararrayos. En el tercer medio, la tierra, y en especial en la zona de transición metal-tierra, se podría desgastar teóricamente el hierro o la cubierta galvánica anticorrosiva.

La carga eléctrica en movimiento (unos 6 Aseg) es capaz de desprender solamente unos cuantos miligramos de zinc, de allí que el pararrayos no se encuentra expuesto. En la propia tierra no se originan procesos químicos de importancia debido a lo reducido de las cargas eléctricas existentes en la misma.

**CONCLUSIÓN:** Si los dispositivos que se empleen en los sistemas de transmisión de energía se diseñan adecuadamente, en particular el pararrayos, entonces el rayo no los somete a mayores requerimientos o daños que pudieran hacer peligrar su función.

### 3.2 GOLPE DIRECTO E INDUCIDO.

La descarga puede producir sobrevoltajes en una línea de transmisión o distribución por el golpe directo en la línea o por inducción electrostática a los elementos de circuito en la vecindad de la línea.

El máximo voltaje probable que puede aparecer en la línea por el golpe directo es de unos 15 millones de volts y por el golpe inducido puede aparecer una onda de unos 500 000 volts. Estos voltajes aparecen entre conductor y tierra.

Esto significa que si el ángulo de protección del hilo de guarda no ha sido diseñado adecuadamente, el rayo puede incidir directamente una de las fases o conductores activos. En la fig. 3.1.9.3 se indicaron algunos valores característicos y frecuentes del rayo, los que en mayor o menor grado varían con la distancia de atracción de la estructura soportante de los conductores.

En la práctica se ha podido observar que la incidencia del rayo en el sistema ( golpe directo ) conduce a mayores sobretensiones que cuando incide en la proximidad del mismo. El enfoque analítico de las sobretensiones inducidas por el rayo en el sistema, al incidir en su proximidad, no es sencillo, pues se deben considerar las cargas que el rayo induce al acercarse a la tierra, pero sin haber llegado aún a la tierra, al igual que las cargas inducidas después de haber llegado a ella. La descarga de retorno también desempeña un papel un papel muy importante, pues lleva de nuevo al seno de la nube una gran cantidad de cargas eléctricas.

La solución analítica a este fenómeno fué presentada por S. Rusck basándose en las leyes de Maxwell. El vector de campo inducido por el fenómeno atmosférico está dado por

$$E = - \text{grad } U_i - \delta A / \delta t$$

donde  $U_i$  es el potencial escalar de la carga eléctrica  $Q$  a lo largo del canal plasmático de la descarga atmosférica y  $A$  es el potencial vectorial de la corriente de descarga del rayo.

La tensión que se registraría en cualquier punto de la línea de transmisión afectada por el rayo, referida a tierra, está dada por la siguiente relación:

$$U = - \int E \cdot dz = k (Q)$$

donde  $Q$  es la carga eléctrica inducida en el conductor de la línea de transmisión. Como es de suponer, el valor máximo de  $U$  se obtiene en el punto más cercano al sitio del impacto. según se mencionó anteriormente, las sobretensiones inducidas por el rayo en el sistema no alcanzan valores muy peligrosos, pero si las tensiones de paso y de contacto en la proximidad del sitio de incidencia. Estas tensiones suelen ser tan elevadas que con frecuencia conllevan a accidentes fatales. Particularmente se ven en los cuadrúpedos (vacas, caballos, y en menor grado perros, ) y también al hombre.

### 3.3 FORMA DE ONDA.

Los voltajes producidos por las descargas atmosféricas tienen grandes magnitudes, pero su duración es muy corta. Esta está medida en microsegundos. Típicamente, el voltaje crece muy rápidamente ( en 1 a 10  $\mu\text{seg}$  ) al valor máximo de cresta y entonces decae más suavemente, alcanzando el 50 % del valor de cresta en 20 a 50  $\mu\text{seg}$ .

Como se ilustra en la fig. 3.3 la forma de la onda de voltaje o corriente producida por el rayo es comunmente expresada por dos números.

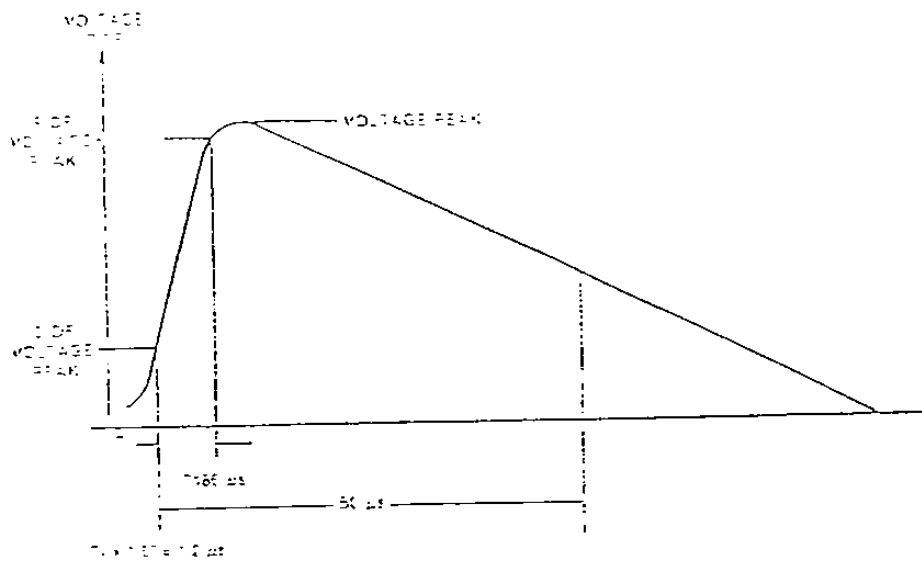


FIG.- 3.3 FORMA DE ONDA PRODUCIDA POR UNA DESCARGA ATMOSFERICA (STD. I. E. E. E.).

El primero es el tiempo del cero virtual del frente de la onda en el que alcanza el valor de cresta, mientras que el segundo número es el tiempo del cero virtual en el cual la onda de voltaje o corriente decrece al 50 % del valor de cresta. El cero virtual del frente de onda es la intersección con el eje cero de una línea recta dibujada a través de los puntos, en el frente de la onda, con un 30 % y 90 % del valor de cresta de la onda de voltaje y 10 % y 90% del valor de cresta de la onda de corriente. Ambos tiempos son usualmente expresados en microsegundos. Por ejemplo, 95 kv 1.5 x 40  $\mu$ seg, es una onda cuyo valor de cresta es 95kv, que lo alcanzó en 1.5  $\mu$ seg del cero virtual, y decayó al 50 % del valor de cresta ( 47.5 kv ) en 40  $\mu$ seg desde el cero virtual. Continuando con éste concepto, es bueno repasar valiosos conceptos tratados en el cálculo de líneas de transmisión. Aquí se vió que la tensión e intensidad de corriente están dadas, para un lugar cualquiera x en la línea, por las siguientes relaciones :

$$U_x = U_2 \cos h (\gamma x) + I_2 Z \operatorname{sen} h (\gamma x)$$

$$I_x = I_2 \cos h (\gamma x) + (U_2/Z) \operatorname{sen} h (\gamma x) \quad \text{Ec. 3.3.1}$$

donde  $\gamma$  es la constante de propagación, la cual denota una componente real ( $\alpha$ ), denominada constante de atenuación, y otra imaginaria ( $\beta$ ), llamada constante de fase. La relación que une a estas constantes es la siguiente:

$$\gamma = \alpha + j \beta \quad \text{Ec. 3.3.2}$$

La relación 3.3.1 se obtiene fácilmente de la fig. 3.3.1, suponiendo que el extremo transmisor acusa el subíndice 1 y el receptor el subíndice 2. Aunque en esta relación no figura el tiempo, se puede calcular con ella una apreciable cantidad de tareas prácticas. Más adelante se verá, no obstante, que tanto la tensión U como la intensidad I denotan en cualquier lugar x valores diferentes para tiempos diferentes. Es decir, ambas magnitudes son una función del lugar x y del tiempo t ; a saber : U (x,t) e I (x,t). Z es la impedancia de onda o impedancia característica, con

$$Z = \sqrt{R + j \omega L / G + j \omega c} \quad \text{Ec. 3.3.3}$$

Las magnitudes L y C, al igual que R y G, no ameritan una descripción, pues son conocidas en el cálculo de líneas de transmisión. Estas magnitudes determinan, la impedancia del sistema, la cual varía considerablemente si se trata de una línea de transmisión ( Z=500  $\Omega$  ) o de un cable ( Z=50  $\Omega$  ).

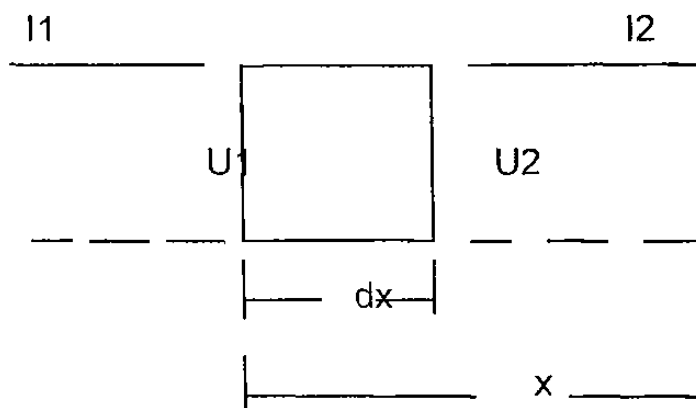


FIG. 3.3.1 Elemento diferencial de una línea de transmisión, el cual permite derivar las ecuaciones que rigen el comportamiento de la tensión  $U$  y la corriente  $I$ .

En la ecuación 3.3.1 se puede observar que tanto la tensión  $U$  como la intensidad de corriente  $I$  denotan dos componentes; es decir, ambas expresiones se pueden formular de la siguiente manera :

$$U_x = u_p + u_r$$

$$I_x = i_p + i_r$$

Ec. 3.3.4

En realidad ambas ondas tienen tanto una componente que se desplaza hacia el otro extremo de la línea (extremo receptor), a la cual se le llamará onda progresiva, como otra que se desplaza en sentido contrario (hacia el extremo transmisor), por lo cual se denomina onda regresiva. Por lo tanto de acuerdo con las ecuaciones 3.3.1 y 3.3.4, se obtiene la siguiente importante relación

$$U_p = I_p Z \quad \text{y} \quad U_r = - I_r Z$$

Estas ondas de tensión y de corriente se propagan a través de la línea de transmisión con la velocidad de la luz. Para recorrer una línea de 2 500 km de longitud, el tiempo requerido se obtiene de  $C = x/t$  : es decir,

$$t = 2\,500 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/seg} = 8.33 \text{ mseg.}$$

Este tiempo es casualmente un semiperíodo en un sistema que opera a 60 Hz ( $T = 16.67 \text{ mseg}$ ), con lo cual la tensión en el extremo receptor de la línea denota un desfase de  $180^\circ$  respecto al extremo transmisor.

Obsérvese : Líneas de transmisión muy por debajo de 500 km y cables con longitudes inferiores a 250 km son los únicos que permiten asumir igualdad de fase para la corriente y la tensión, según se puede calcular en la forma antes descrita.

Esta igualdad de fases se puede asumir, para las longitudes en cuestión, a lo largo de toda la extensión del cable o línea. El sistema se comporta entonces como si fuese cuasiestacionario.

Si por el contrario, las longitudes involucradas exceden de los 500 km ( líneas aéreas ) o 250 km ( cables ) respectivamente, entonces la velocidad de propagación finita de las ondas, puede perturbar seriamente a la transmisión de energía del sistema y a las cargas conectadas en su extremo ( motores, transformadores, líneas ). Si el desfase llega o excede a los  $90^\circ$  (  $U_2$  contra  $U_1$  ), entonces es factible que se presenten peligrosas sobretensiones de resonancia.

### 3.4 ONDA VIAJERA.

En el punto anterior se vió que tanto la tensión como la intensidad de corriente se pueden representar mediante ondas, las cuales se desplazan a través del sistema con una velocidad de propagación determinada. Por esta razón se suele hablar de ondas viajeras. en seguida se da una interpretación física a la velocidad de propagación que caracteriza a estas ondas.

Si se aplica a los bornes de entrada ( extremo transmisor,  $U_1$  ) un impulso de tensión  $u(t)$ , circulará una intensidad de corriente a través del primer cuadripolo de la figura 3.4, la cual cargará al condensador del mismo. Después de un tiempo determinado, se cargará el segundo condensador que encuentre a su paso en el sentido de la propagación, y así sucesivamente. Esto quiere decir que después de transcurrido un tiempo determinado  $\tau$ , el otro extremo de la línea ( receptor ) acusará una tensión igual a la del extremo transmisor, siempre y cuando no haya atenuación en la cadena de cuadripolos (  $R=G=0$  ). Si  $t_1$  es el tiempo de duración del impulso, es conveniente diferenciar dos casos importantes :

$t_1 < \tau$  : Si el tiempo de duración del impulso que penetra en la línea es inferior al tiempo que se requiere para recorrerla, entonces se observa que mientras los primeros cuadripolos acusan una tensión determinada, los últimos no denotan potencial alguno, debido a que el impulso aún no ha llegado a éstos. Si  $t_1 \ll \tau$ , entonces se tiene que mientras el segundo cuadripolo denota una tensión, el primero y el tercero se encuentran libres de potencial. El impulso los carga paulatinamente en su desplazamiento hacia el extremo receptor.

idad de propagación

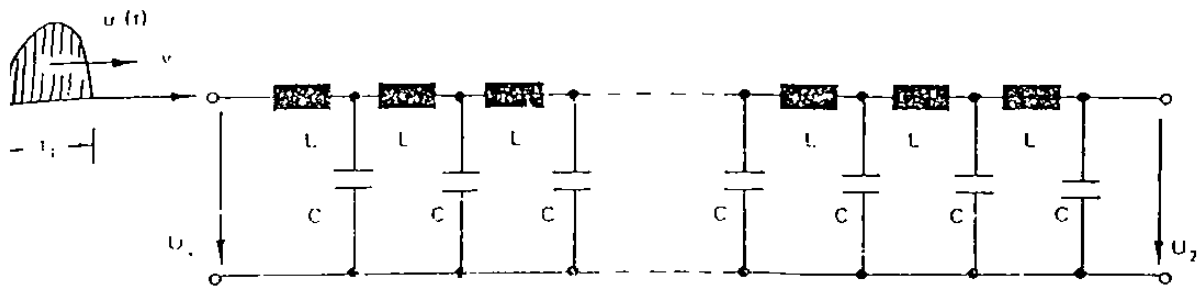


FIG. 3.4 CADENA DE CUADRIPOLOS  
CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LINEA DE  
TRANSMISION DE LONGITUD FINITA

Los condensadores que se van cargando no se pueden descargar en sentido inverso ( extremo transmisor ) debido a la ley de Lenz. En realidad la corriente que acompaña al impulso induce en la inductancia L una tensión en oposición

( - L di/dt ), imposibilitando así dicha descarga. Este comportamiento es representativo de las sobretensiones atmosféricas ( 1.2 / 50 μseg ).

$t_1 > \tau$  : En este caso se puede observar que el impulso está en condiciones de energizar todos los cuadripolos.

Transcurrido cierto instante, el extremo receptor denotará la misma tensión del extremo transmisor. En instante en cuestión depende únicamente de la velocidad de propagación del impulso.

Este comportamiento es característico de las sobretensiones de maniobra ( 250/2 500 μseg ), las cuales pueden energizar simultáneamente un tramo de línea de longitud apreciable.

Resulta interesante el análisis energético de este fenómeno. Así por ejemplo, la cantidad de energía acumulada por cada uno de los cuadripolos es para un elemento diferencial

$$dQ = u C dx = i dt \quad \text{Ec. 3.4.1}$$

Considerando que la velocidad de propagación está dada por  $v = dx/dt$ , se obtiene de la expresión anterior

$$v = dx/dt = I / u C \quad \text{Ec. 3.4.2}$$

Aplicando la ley de Ohm (  $U = I Z$  ) y considerando la relación 3.3.3 para el caso de libre atenuación (  $R=G=0$  ), se obtiene

$$v = 1/Z C = 1/\sqrt{LC} \quad \text{Ec. 3.4.3}$$

La interpretación de esta última expresión es de sumo cuidado, ya que la velocidad de propagación no difiere de una línea aérea a otra, mientras que la capacitancia C e inductancia L sí, pues dependen de la configuración geométrica del sistema. Esta interpretación de la velocidad de propagación se puede obviar si se sustituye a L y C por sus valores correspondientes.

$$L = \mu_0 \mu_r \ln(a/r) / \pi \quad \text{y} \quad C = \epsilon_0 \epsilon_r / \pi \ln(a/r) \quad \text{Ec. 3.4.4}$$

con la relación 3.4.3 adquiere nueva forma ;

$$v = 1/\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r} \quad \text{Ec. 3.4.5}$$

considerando que

$$l = 10 \text{ cm/km}$$

$$\epsilon_0 = 8.859 \cdot 10^{-12} \text{ A seg / V cm}$$

$$\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ V seg / A cm}$$



La relación adquiere finalmente la forma siguiente :

$$v = 300\,000 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \text{ km / seg} \quad \text{Ec. 3.4.6}$$

Es decir,, la velocidad de propagación depende de la permitividad  $\epsilon_r$  y de la permeabilidad magnética  $\mu_r$ . Con cierta aproximación se puede suponer  $\mu_r = 1$ , ya que los materiales ferromagnéticos con la influencia del campo homónimo no desempeña ningún papel importante ni para la línea de transmisión aérea ni para el cable subterráneo. En cuanto a la permitividad  $\epsilon_r$  se refiere, se puede suponer también  $\epsilon_r = 1$  para las líneas aéreas y  $\epsilon_r = 4$  para los cables con aislamiento a base de papel impregnado en aceite.

Las simplificaciones anteriores arrojan los siguientes valores para la velocidad de propagación ;

$$\begin{aligned} v &= 300 \text{ m/ } \mu\text{seg} && \text{para líneas aéreas} \\ v &= 150 \text{ m/ } \mu\text{seg} && \text{para los cables con el aislamiento referido.} \end{aligned}$$

En realidad los valores más frecuentes de la capacitancia e inducción que se emplean en la práctica son los siguientes :

$$\begin{aligned} \text{Línea aérea} \quad L &= 1.67 \text{ mH / km, } C = 0.0067 \text{ } \mu\text{F / km} \quad \text{--- } Z = 500 \text{ } \Omega \\ \text{Cable} \quad L &= 0.33 \text{ mH / km, } C = 0.1330 \text{ } \mu\text{F / km} \quad \text{--- } Z = 50 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

éstos arrojan los mismos valores dados anteriormente para la velocidad de propagación. Es interesante observar la considerable diferencia en las impedancias características de la línea aérea y el cable ( 1:10 ), motivo por el cual es imperativo proteger a este último de ondas viajeras.

### 3.5 ONDA REFLEJADA.

Cuando las ondas viajeras se desplazan a través de los conductores y existen irregularidades transversales o longitudinales ocurre un fenómeno de reflexión o refracción. Basta que la impedancia característica del conductor cambie en un nodo, por ejemplo de  $Z_1$  a  $Z_2$ . En la figura 3.5 se ha planteado esta situación. En la primera se encuentra entonces al último cuadripolo del conductor  $Z_1$  y al primer cuadripolo del conductor  $Z_2$ . Si se supone que no hay pérdidas en el sistema (  $R=G=0$  ), como en el caso anterior, la corriente  $i_1$  cargará a  $C_1$ , luego a  $C_2$  y así sucesivamente.

Debido a que no hay atenuación, la carga eléctrica  $Q$  permanece invariable, y en vista de que las impedancias involucradas son desiguales (  $Z_1 \neq Z_2$  ), se deduce que  $C_1$  es diferente de  $C_2$ . Para la carga vale entonces

$$dQ = C_1 dx U_1 = C_2 dx U_2 \quad \text{Ec. 3.5.1}$$

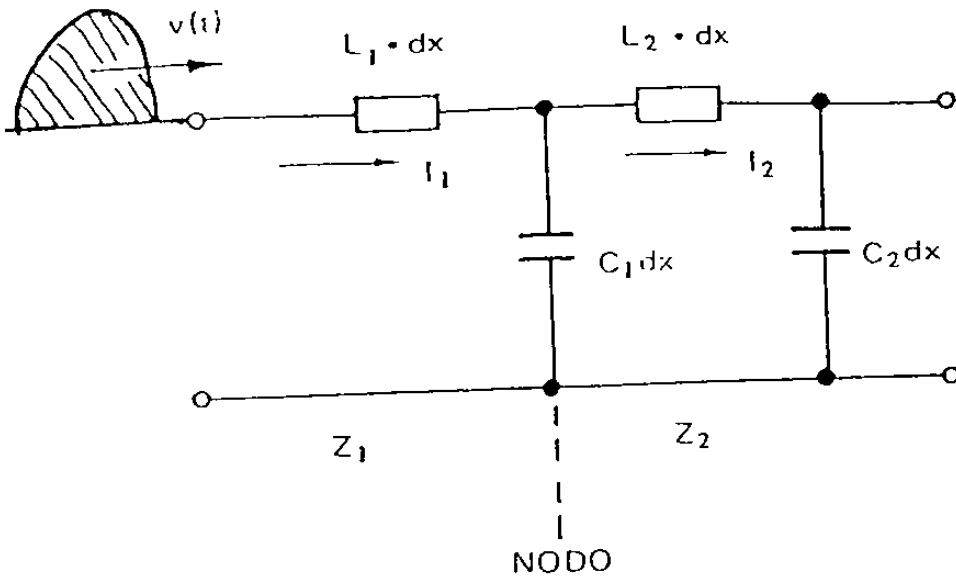


FIG. 2.5.1 NODO DE TRANSICIÓN, EN EL CUAL LAS IMPEDANCIAS CARACTERÍSTICAS CAMBIAN DE VALOR ( $Z_1 \neq Z_2$ )

es decir

$$U_1 / U_2 = C_2 / C_1$$

Ec. 3.5.2

Esta última relación implica que en el nodo tiene que ocurrir un fenómeno de compensación que se denominará reflexión y refracción. En general se observa, en los puntos de unión de líneas de impedancias características diferentes ( nodos ), una perturbación, por determinar éstas el comportamiento de la tensión e intensidad de corriente a través del medio que se propagan.

En la figura 3.5.1, se ilustra un nodo de transición, el cual conecta, por ejemplo, a un cable ( $Z_1$ ) con una línea de transmisión ( $Z_2$ ). Suponiendo que a través del cable se desplaza una onda viajera de amplitud  $u_1$ , en el nodo tiene entonces validez la siguiente expresión:

$$u_1 + u_r = u_2$$

Ec. 3.5.3

donde  $u_r$  es la amplitud de la onda reflejada, mientras que  $u_2$  es la amplitud de la onda refractada; es decir, la que penetra en el conductor  $Z_2$ . La ley de Kirchoff suministra en el nodo

$$i_1 - i_r = i_2$$

Ec.3.5.4

Aplicándole la ley de Ohm a esta última se obtiene

$$u_1/Z_1 - u_r/Z_1 = u_2/Z_2$$

Ec. 3.5.5

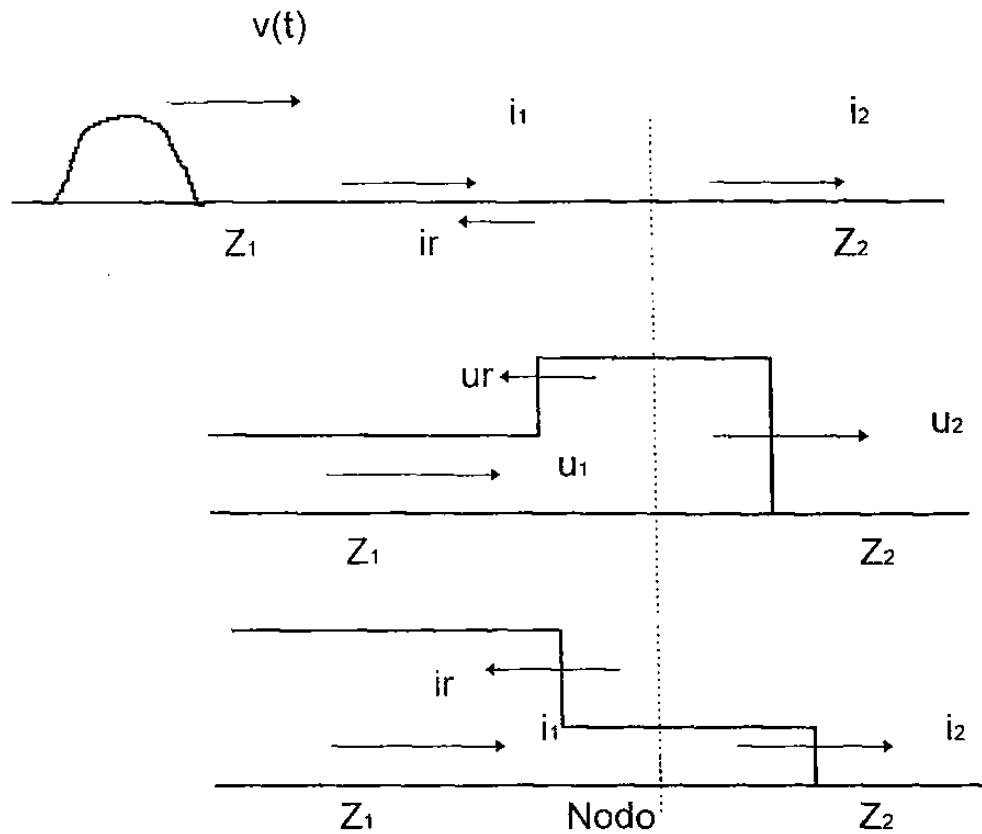


Fig. 3.5.1 Reflexión y refracción en un nodo de transición.

Si se multiplica ahora la relación 3.5.5 por  $Z_1$  y se la suma a la relación 3.5.3 se logra obtener la amplitud o altura máxima de la onda refractada; es decir, aquella que penetra en el conductor de impedancia característica  $Z_2$ :

$$u_2 = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} u_1 \quad \text{con} \quad b_u = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} = \text{Factor de paso (tensión)}$$

El factor de paso para la tensión ( $b_u$ ) se denomina también coeficiente de refracción, ya que indica el porcentaje de tensión que logra penetrar en el conductor opuesto. Si se aplica la ley de Ohm ( $u=i Z$ ) se obtiene de la relación anterior:

$$i_2 = \frac{2 Z_1}{Z_2 + Z_1} i_1 \quad \text{con} \quad b_i = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} = \text{Factor de paso (corriente)}$$

Las ondas reflejadas, es decir, las que se regresan a su punto de origen a través del conductor de impedancia  $Z_1$ , serán :

$$u_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_1 \quad \text{con} \quad r_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \text{Factor de reflexión de la tensión.}$$

En forma análoga se obtiene el coeficiente de reflexión para la intensidad de corriente

$$i_r = - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} i_1 \quad \text{con} \quad r_i = - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \text{Factor de reflexión de la corriente.}$$

Estas relaciones determinan las leyes que rigen la reflexión y la refracción de las ondas viajeras ( tensión y corriente) en un nodo de transición. Es fácil demostrar que existe una sencilla relación entre ambos coeficientes de reflexión y refracción ;

$$b = r + 1$$

Esta expresión resulta un recurso valioso en el cálculo de sobretensiones.

## CONCLUSIÓN.

Cuando una onda viajera o sobretensión penetra en una línea de impedancia característica mayor ( $Z_2 > Z_1$ ), la tensión de la onda acusa un incremento y la intensidad de corriente una atenuación. Si la relación existente entre las impedancias características se invierte ( $Z_1 > Z_2$ ), sucede exactamente lo contrario.

La relación  $Z_2/Z_1$  determina , por consiguiente, las alteraciones que sufrirán la tensión e intensidad de corriente en el nodo de transición,

fig 3.5, siendo el corto circuito ( $Z_2 = 0$  ) y la marcha en vacío ( $Z_2 = \infty$  ) casos extremos para la línea a través de la cual se desplaza o en la que incide la onda viajera. Es también fácil demostrar que la energía de la onda incidente siempre sufrirá una atenuación debido al porcentaje que se refleja.

Obsérvese : El análisis minucioso de las relaciones anteriores pone de manifiesto lo siguiente : La onda que penetra en la línea de impedancia característica  $Z_2$  tendrá siempre el mismo signo de la onda incidente, mientras que una de las ondas reflejadas ( tensión o corriente ) denotará siempre signo opuesto.

### 3.6 CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO.

Es característico de la mayoría de los aislantes que el máximo voltaje que pueden soportar varía inversamente a la duración del voltaje. Puesto que los sistemas de potencia eléctrica están sometidos a diferentes tipos de sobrevoltajes, unos de larga duración y otros de corta duración, se requiere que el equipo de distribución de potencia soporte por lo menos dos tipos de pruebas dieléctricas. Una de baja frecuencia (60 Hz) con duración de un minuto y establece la habilidad de el aislamiento a soportar sobrevoltajes moderados de relativamente larga duración.

Las otras son pruebas de impulso que prueban que los aislamientos no fallaran ante olas de voltaje de gran magnitud y corta duración, como lo son los sobrevoltajes producidos por las descargas atmosféricas. De aquí la importancia de las pruebas de impulso.

### 3.7 NIVEL BÁSICO DE IMPULSO.

La prueba de impulso más comunmente usada consiste en la aplicación de una onda completa de voltaje de  $1.5 \times 40 \mu\text{seg}$ , de un específico valor de cresta, especificado en función del nivel del aislamiento del equipo involucrado. El valor de cresta es llamado Nivel Básico de Impulso (NBI) del equipo. Para simplificar el diseño y la aplicación de equipo eléctrico, varias sociedades como NEMA (National Electrical Manufacturers Association) AIEE ( American Institute of Electrical Engineers), y otras han establecido una serie de estandares del Nivel Básico de Impulso. Estas se pueden abreviar en la tabla 3.7.1.

Estos valores corresponden a transformadores en aceite, reactores inmersos en aceite, bushings de equipos, interruptores en aire, soporte de buses. Sin embargo bajo condiciones especiales, equipos con bajo rango de impulso pueden ser fabricados. Por ejemplo en sistemas de alto voltaje (115 kv y más ) que son bien aterrizados, los transformadores pueden tener un paso abajo del valor estándar y logran un buen funcionamiento.

A estos se les llama transformadores de aislamiento reducido, mientras que teniendo un N B I en concordancia con la tabla, son llamados de aislamiento completo.

Clase de voltaje kv	Nivel Básico de Impulso kv	Clase de voltaje kv	Nivel Básico de impulso kv	Clase de voltaje kv	Nivel Básico de Impulso kv
1.2	30	23	150	138	650
2.5	45	34.5	200	161	750
5.0	60	46	250	196	900
8.7	75	69	350	230	1050
	95 *	92	450	287	1300
15.0	110	115	550	345	1550

\* El NBI 95 kv se usa para cierto tipo de equipo en clase 15 kv.

TABLA 3.7.1.

El NBI estándar para transformadores de distribución y potencia, reactores y reguladores (todos inmersos en aceite), y transformadores de instrumentos con aislamiento clase 15 kv y menores están dados en la tabla 3.7.2.

Clase de aislamiento KV	Transformadores de distribución, regulares de voltaje transformadores de instrumentos inmersos en aceite.			Transformadores de potencia y reactores limitadores de corriente inmersos en aceite.		
	Onda completa  1.5 x 40 ( NBI ) KV	Prueba con onda recortada		Onda completa  1.5 x 40 ( NBI ) KV	Prueba con onda recortada	
		valor de cresta KV	tiempo minimo de arqueo $\mu$ seg.		valor de cresta KV	tiempo minimo de arqueo $\mu$ seg.
1.2	30	36	1.0	45	54	1.5
2.5	45	54	1.25	60	69	1.5
5.0	60	69	1.5	75	88	1.6
8.66	75	88	1.6	95	110	1.8
15	95	110	1.8	110	130	2.0

TABLA 3.7.2

Para transformadores de tipo seco no está bien establecido un estándar pero puede usarse la siguiente guía práctica.

Clase de aislamiento	NBI
1.2	10
2.5	20
5.0	25
8.66	35
15.0	50

Junto con la prueba de onda completa, los equipos son sometidos a una prueba de onda recortada. En ésta se aplica un voltaje predeterminado y se reduce sustancialmente a cero por el arqueo en un entrehierro en aire.



El valor de cresta alcanzado en el tiempo mínimo de arqueo también se presenta en la tabla 3.7.2, para equipos de 15 kv o menores. Para clases de aislamiento mayores, el valor de cresta de la onda recortada es aproximadamente 15 % que el N B I y el mínimo tiempo de arqueo es 3  $\mu$ seg.

# CAPÍTULO 4.

## EQUIPO DE PROTECCIÓN

### 4.1 APARTARRAYOS, CONCEPTOS BÁSICOS

Los apartarrayos son los dispositivos más utilizados para combatir las sobretensiones en los sistemas eléctricos de distribución. Comenzaron a utilizarse en los sistemas comerciales de transmisión de energía para enviar a tierra las sobretensiones atmosféricas. Posteriormente, y al ir creciendo los valores de los voltajes de operación, se les utilizó para derivar las sobretensiones internas, de ahí se les comienza a llamar descargadores de sobretensiones como un término más genérico. La función que este dispositivo desempeña en el sistema es la de derivar o descargar en forma rápida e inofensiva a tierra aquellas sobretensiones que ponen en peligro al aislamiento del sistema, por lo que el nombre de descargador de sobretensiones es bien acertado, pero en nuestro medio estos dispositivos son llamados en forma general apartarrayos, por lo que en este escrito se empleará este término.

Históricamente las primeras líneas de transmisión que entraron en operación a principios de siglo, alcanzaron rápidamente longitudes superiores a los 100 km, y el rayo se convierte en uno de sus principales problemas.

Así el primer dispositivo utilizado para enviar a tierra las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión fué un simple explosor de puntas ( rod gap ) el cual se ilustra en su forma elemental en la fig. 4.1.1 y del cual se observan algunas desventajas:

- a) La tensión de disparo depende en alto grado de la polaridad.
- b) Retraso de funcionamiento, dado por el tiempo de formación de la onda incidente. Para funcionar en  $1 \mu$  seg. la tensión de disparo debe ser 1.5 a 3 veces superior a la tensión 50 % de choque disruptiva.
- c) El arco no se extingue por sí mismo, debido a la naturaleza capacitiva del dispositivo.

Otro dispositivo similar es el descargador de explosor sencillo, también denota un comportamiento capacitivo. Cuando dispara la intensidad de corriente de derivación se encuentra desfasada  $90^\circ$  respecto a la tensión dándose las condiciones para el reencendido del arco. La corriente, además, no se ve limitada en su derivación a tierra, y la corriente de régimen sigue el mismo camino.

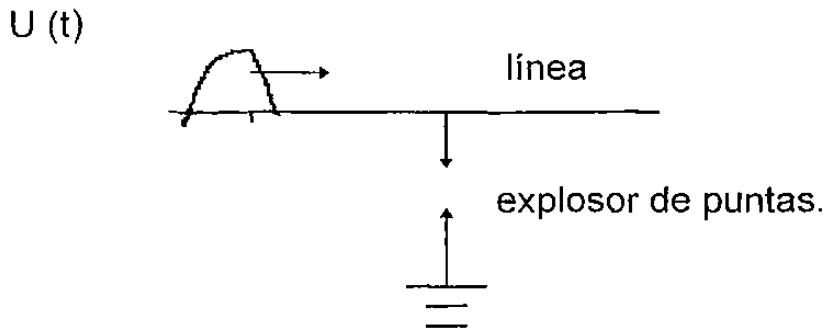


FIG. 4.1.1 Representación de un explosor de puntas.

Esto motivó que el explosor se viera rápidamente provisto de una resistencia óhmica en su extremo conectado a tierra. El objeto de esta resistencia era:

1.- Darle al dispositivo de protección un comportamiento óhmico-capacitivo de manera que el desfasaje existente entre la corriente a tierra y la tensión no llegara a  $90^\circ$ . De esta manera se trataba de combatir el reencendido del arco.

2.- La resistencia limitaba también a la corriente en su trayectoria a tierra.

El dispositivo mostró una evidente mejoría, pero pronto se advirtió que la resistencia no debería ser lineal, sino más bien denotar un comportamiento autoválvula; es decir, que su valor óhmico cambiase con el valor de la tensión imperante entre el conductor y el dispositivo de protección. Este tipo de resistencia se logró utilizando discos de carburo de silicio.

Aparece un nuevo dispositivo llamado descargador catódico, de origen alemán, y posee todos los elementos que se observan en los apartarrayos modernos. En primer lugar se observa el explosor de disparo, el cual determina el nivel de protección dado por el descargador. En seguida del explosor de disparo se ubica una resistencia a base de carburo de silicio. El número de discos depende de la tensión, y el diámetro de los mismos de la intensidad de corriente máxima que tiene que ser enviada a tierra. Otro dispositivo empleado es el llamado descargador de expulsión, en el que el explosor de disparo está conformado por el cabezal del descargador y el propio conductor activo. Este explosor se encuentra en serie con otro, pero dentro de un tubo de fibra de vidrio, en cuyo interior tiene lugar la descarga eléctrica. La alta temperatura del arco produce una corriente de gas turbulenta, la cual procede de la descomposición de la fibra.

En el interior del tubo, por consiguiente, ocurre una variación brusca de la presión; ésta trata de expulsar violentamente al gas fuera del tubo por el único orificio disponible para tales fines. Así, el arco es desgarrado, al mismo tiempo que se interrumpe la descarga.

Una de las principales desventajas de los descargadores hasta ahora, exceptuando al descargador catódico, es que en el disparo conlleva a un corto circuito en el sistema.

La intensidad de la corriente de régimen permanente alimentaba entonces al descargador, debido a su baja impedancia y condición de corto circuito, y no se tenía ningún dispositivo que permitiera desgarrar el arco eléctrico y despejar la corriente de derivación y la misma corriente de fuga.

El tiempo de disparo resultaba ser, además, considerable, ya que el arco se originaba en un campo relativamente no homogéneo.

El resultado de las mejoras hechas al descargador catódico, y las innovaciones surgidas en los años sesenta dieron como resultado un apartarrayos más eficiente y más confiable, al cual se le denomina autoválvula, debido al comportamiento característico de su resistencia no lineal. En la fig. 4.1.2 se ilustra un descargador del tipo autoválvula, simplemente se han representado los elementos más relevantes contenidos en el mismo. El recipiente de porcelana que aloja todos los elementos no ha sido representado. El descargador está constituido de arriba hacia abajo por: Explosor de disparo -- Este tiene dos finalidades; determinar la tensión de disparo del apartarrayos y el nivel de protección dado por el mismo, así como aislar la unidad en condiciones de régimen permanente.

Explosor de placas múltiples -- Su tarea es la de hacer homogéneo el campo eléctrico y al mismo tiempo refrigerar el arco. Está constituido por láminas de cobre, las cuales son excelentes conductoras térmicas.

Resistencia no lineal -- Esta resistencia está construida a base de carburo de silicio u óxido de zinc, aglutinados en una masa no conductora. Su finalidad es evitar el corto circuito. En efecto, a valores nominales de operación, el valor óhmico de estas resistencias es muy alto. Sin embargo, ante la sobretensión su valor disminuye apreciablemente, de ahí el nombre de autoválvula.

Resistencia de puesta a tierra -- Este elemento al igual que el siguiente, no está incluido en el recipiente de porcelana, pero su importancia es relevante, pues un alto valor de esta resistencia conlleva a incrementos de los potenciales en la subestación, y más aún cuando el apartarrayos se conecta a tierra directamente a la malla de la subestación.

Anillo de regulación -- Como ya se dijo este elemento no se encuentra contenido en el recipiente del descargador.

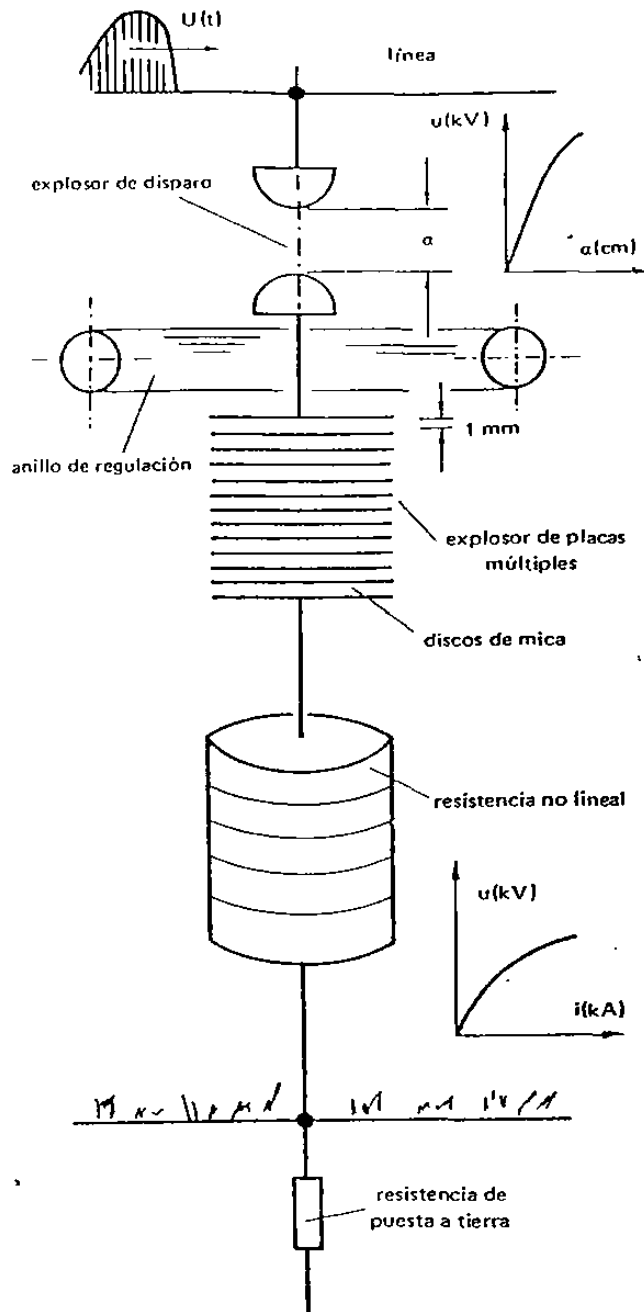


FIG. 4.1.2 REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE UN DESCARGADOR O APARTARRAYOS AUTOVÁLVULA

Su trabajo consiste en linealizar en lo posible la distribución de la tensión a lo largo de la columna de porcelana del recipiente, en particular cuando la misma se encuentra expuesta a un grado de contaminación elevado.

Contadores de descargas -- Este es un pequeño dispositivo contenido en el interior del recipiente, y que puede constar de un pequeño explosor montado sobre un disco de sección circular, que perfora un papel colocado sobre este, o llevar un dispositivo de conteo digital.

Válvula de alivio -- Cuando el apartarrayos deriva una intensidad de corriente elevada a tierra, la descomposición brusca en el interior del recipiente puede alcanzar valores tan elevados que la unidad explotaría. Para tratar de aliviar esta situación, los apartarrayos disponen de membranas o válvulas que permiten el escape de los gases que se originan en el interior.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS APARTARRAYOS.

Las dos características de los apartarrayos que determinan el grado de protección son 1) el impulso de voltaje de disparo, 2) el voltaje de descarga; o sea el voltaje que aparece en sus terminales durante el paso de la corriente de descarga. Dos diferentes voltajes de disparo son usualmente dados por los fabricantes de apartarrayos. Uno es el voltaje crítico de disparo con una onda de  $1.5 \times 40 \mu$  seg. o sea el valor de cresta de la onda  $1.5 \times 40$  que causa el disparo al 50 % de la aplicación de esta onda. El otro es el voltaje promedio del frente de la onda donde ocurre el disparo con la onda de voltaje aumentando en la razón especificada en los estándares de AIEE para pruebas de descargadores, nominalmente, 100 Kv por  $\mu$  seg por cada 12 Kv del rango del dispositivo. Este voltaje es generalmente mayor que el voltaje de disparo crítico para una onda de  $1.5 \times 40 \mu$  seg.

El voltaje de descarga del apartarrayos es el valor de cresta promedio del voltaje que aparece en terminales del dispositivo cuando descarga una onda de corriente de  $10 \times 40 \mu$  seg teniendo varios valores de cresta como 1 500, 3 000, 10 000, y 20 000 amperes. En la siguiente tabla se presentan estos valores de voltaje, considerando apartarrayos de alta tensión. Los apartarrayos se clasifican de acuerdo con su principal característica y campo de aplicación en:

- 1.- Apartarrayos de tipo distribución.
- 2.- Apartarrayos de tipo línea.
- 3.- Apartarrayos de tipo estación.

Tipo de apartarrayos	máxima variación del valor promedio.	
	voltaje de disparo	voltaje de descarga.
Distribución.....	25	20
Línea .....	20	15
Estación .....	15	10

FIG. 4.2.1 Tolerancias en el diseño de apartarrayos autovalvulares.

Los dispositivos de tipo distribución se encuentran en rangos de voltajes de 1,3,6,9,12,y 18 Kv.Son utilizados en la protección de transformadores de distribución, pero también son usados en la protección de otros equipos,como transformadores de medición,interruptores,reguladores de voltaje, capacitores de distribución y cables de energía. Estos apartarrayos son pequeños, de peso ligero, y están listos para instalarse en postes, estructuras, tienen buenas características de protección,y son de bajo costo.

Los dispositivos de tipo línea, se encuentran en los rangos de voltaje de 20, 25, 30, 37, 40, 50, 60, y 73 Kv. Son usados para la protección de transformadores en subestaciones de tensión media.

Los apartarrayos de tipo estación proporcionan mejores características de protección que los anteriores. Son empleados en la protección de grandes e importantes aparatos. Se encuentran en rangos que van de 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 73, 79, 97, 109, 131, 133, 145, 169, 195, y 242 Kv . En la tabla 3.2.2 se presentan las características de los apartarrayos de tipo distribución, estación y línea. Se puede observar el valor promedio del voltaje de disparo ( de acuerdo con una onda de prueba de la AIEE ) y el valor promedio del voltaje de descarga ( con una onda de corriente de 10 000 amp. y  $10 \times 20 \mu$  seg.). Vale la pena aclarar que continuamente se están desarrollando apartarrayos que contienen sustancialmente mejores características de protección, por lo que se recomienda consultar a los fabricantes a la hora de tomar decisiones sobre el tipo de dispositivo que vaya a emplearse.

rango de voltaje Kv	valor promedio del voltaje de disparo Kv		valor promedio del voltaje de descarga onda de corriente 10 000 amp 10x20 $\mu$ seg	
	tipo distribución	tipo estación	tipo distribución	tipo estación
3	18	13	15	11
6	34	23	30	22
9	48	35	44	33
12	61	43	55	44
15	71	53	69	54
18	84	----	78	----
	tipo línea		tipo línea	
20	75	72	92	72
25	93	89	111	90
30	110	106	135	108
37	136	131	164	132
40	147	136	177	144
50	183	178	222	179
60	220	214	271	217
73	267	261	328	262
97	----	345	-----	349
109	----	388	-----	394
121	----	430	-----	438
145	----	515	-----	523
169	----	602	-----	610
195	----	691	-----	698
242	-----	860	-----	872

TABLA 4.2.2 Características de protección promedio de apartarrayos tipo autovalvulares.



### 4.3 SELECCIÓN DE LOS APARTARRAYOS.

Las características de protección de los apartarrayos, en general son buenas, su costo es bajo así como también lo es su rango de voltaje. De tal modo que si el voltaje de línea a tierra del sistema después del disparo del descargador excediera este valor de voltaje, el descargador no interrumpe el flujo de corriente y entonces fallará muy rápidamente. Esto hace importante el determinar el máximo voltaje de línea a tierra del sistema y el punto en el cual el descargador se va a aplicar, y del mismo modo es necesario considerar todas las condiciones anormales que se puedan producir.

Bajo condiciones normales de operación, el voltaje de línea a tierra en el sistema de tres fases es igual al voltaje de línea a línea dividido por 1.73, ya sea que el sistema este aterrizado o no. Hay sin embargo, muchas condiciones anormales que pueden ocurrir resultando en voltajes mayores que el normal de línea a tierra, pero una de estas condiciones más comunes es la existencia, al tiempo de disparo del descargador, de una falla de línea a tierra. Por ejemplo, si el golpe directo de un rayo produce una falla en una de las fases de la línea de transmisión, el voltaje inducido en las fases sanas es apto para causar el disparo del descargador conectado en esas fases. Estos descargadores deberán entonces interrumpir el flujo de corriente con una falla de línea a tierra en el sistema. El rango de voltaje de los descargadores es seleccionado en base del voltaje del sistema al que están sujetos bajo condiciones de falla a tierra.

El voltaje de los conductores sanos a tierra con una falla de línea a tierra en un sistema dependen de como el neutro está aterrizado.

Para sistemas no aterrizados o aterrizados a través de una resistencia, este voltaje será esencialmente igual al voltaje de línea a línea del sistema, y el apartarrayos usado será seleccionado en esa base. Esto es algunas veces referido como descargadores del 100 %. Sin embargo, para sistemas sólidamente aterrizados o aterrizados a través de una reactancia, el voltaje del conductor sano a tierra con una línea aterrizada puede ser más bajo que el voltaje de línea a neutro del sistema.

Depende entonces de la relación de las impedancias de secuencia positiva y secuencia cero del sistema. Por ejemplo, si la razón de la reactancia de secuencia cero  $X_0$  a la reactancia de secuencia positiva  $X_1$  es positiva y menor que 3 y la razón de la resistencia de secuencia cero  $R_0$  a la reactancia de secuencia positiva  $X_1$  es menor que 1, el voltaje del conductor sano a tierra no excederá el 140 % del voltaje de línea a neutro del sistema o cerca del 80 % del voltaje de línea a línea del sistema. Como el sistema se dice que está sólidamente aterrizado, y el descargador es referido como del 80 %.

En vista de que el apartarrayos se puede conectar de varias maneras, es prudente diferenciar las más usuales :

Conexión entre fase y tierra : Esta es , sin lugar a dudas, la más común de las conexiones en los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Los apartarrayos se colocan entre los conductores activos y la tierra, según se indica en la fig. 3.3.1. La tensión de fase a tierra es la que determina entonces la selección del voltaje de diseño de apartarrayos, pero también el tratamiento que se le haya dispensado al neutro del sistema, debido a los posibles incrementos de tensión en las fases sanas, cuando tenga lugar una falla de línea a tierra. Citaremos ahora el llamado coeficiente de aterrizamiento "m" y la selección del apartarrayos.

El coeficiente de aterrizamiento está dado por la siguiente expresión :

$$m = \frac{U_1}{U_L}$$

e indica la relación entre la tensión de fase a tierra, de cualquiera de las fases no afectadas por la falla a tierra, contra la tensión de línea de las fases sanas.

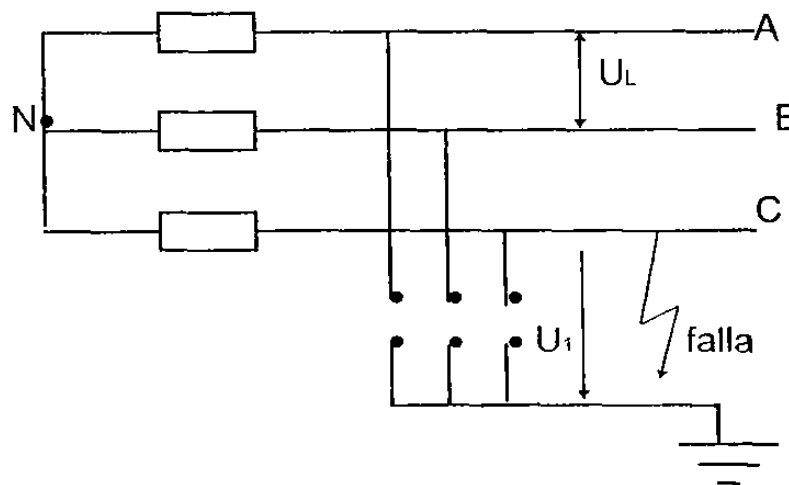


FIG. 4.3.1 Conexión de los apartarrayos.

Sistemas con el neutro sólidamente conectado a tierra : Este tipo de conexión corresponde a los sistemas comerciales de alta, extra alta y ultra alta tensión.

Al ocurrir una falla a tierra, en cualquiera de las fases, no hay ningún desplazamiento del neutro o centro eléctrico del sistema hacia la fase afectada, ya que el neutro de por sí, se encuentra también conectado a tierra.

Las fases sanas no sufren ningún incremento en la tensión y el coeficiente de aterrizamiento es  $m < 0.8$ . La tensión de diseño (disparo) del apartarrayos se selecciona con la siguiente expresión :

$$U_d = k \cdot U_L = 0.8 ( U_L ) \text{ ya que } k = 0.8$$

Sistemas con conexión semirígida a tierra : Estos sistemas se conectan a través de una resistencia entre el neutro y la tierra, la cual sirve para limitar la corriente de falla. Al presentarse la falla de línea a tierra, las tensiones en las fases sanas sufren un ligero incremento, proporcional a la caída de tensión en la resistencia . Este caso es utilizado en instalaciones de cables subterráneos y el coeficiente de instalación a tierra de estos sistemas oscila entre 0.8 y 1.0, y la tensión de disparo se selecciona de acuerdo con :

$$U_d = k \cdot U_L = (0.8 \dots\dots\dots 1.0 ) U_L$$

Sistemas conectados a través de una reactancia a tierra : La bobina que compensa la corriente de falla , en caso de una perturbación en el sistema no impide el incremento de la tensión en las fases sanas, de ahí que el coeficiente de conexión a tierra de estos sistemas se hace entonces de acuerdo con la siguiente recomendación :

$$U_d = k \cdot U_L = 1.0 ( U_L ) \text{ ya que } k = 1.0$$

Sistemas con neutro flotante : Estos sistemas denotan un incremento de 1.73 en la tensión de las fases sanas, en el momento de la falla a tierra. La selección de la tensión de disparo del apartarrayos se hace en base a

$$U_d = k \cdot U_L = 1.1 ( U_L ) \text{ ya que } k = 1.1$$

Sistemas con características especiales : Entre estos sistemas se encuentran aquellos que tienen líneas de longitud apreciable, interconexión de bancos de capacitores en serie, puestas a tierra múltiples, cuatro conductores, conexión en estrella con neutro común, conexión en delta, y que ameritan estudios particulares, en función del cual se selecciona la tensión de disparo de los apartarrayos.

Es conveniente destacar que el coeficiente de conexión a tierra se puede expresar también con la siguiente relación :

$$m = \frac{1}{2} \sqrt{3} \left| \frac{X_0 / X_1}{2 + X_0 / X_1} \right|^{2+1}$$

donde  $X_0$  y  $X_1$  son las reactancias de secuencia cero y positiva. Se notará que en este caso se han despreciado las resistencias, lo cual es perfectamente factible en sistemas de extra y ultra alta tensión.

Conclusión : El buen conocimiento del comportamiento del sistema, en caso de fallas a tierra, debido al tratamiento que se le ha dado al neutro del sistema, resulta ser de extrema importancia en la selección de la tensión de diseño del apartarrayos, ya que dicha tensión es la que estipula el nivel de protección dado por el mismo.

#### 4.4 LOCALIZACIÓN DE LOS APARTARRAYOS.

La localización ideal de los apartarrayos es, sin duda, directamente en las terminales del aparato o aparatos que quieran protegerse . Colocados en ese punto y con las terminales de tierra del descargador conectadas directamente al tanque, carcaza, u otra estructura metálica que soporta las partes aisladas, la onda de voltaje aplicada al aislamiento será limitada por el voltaje de disparo y el voltaje de descarga del apartarrayos.

En algunos casos esto puede ser costoso o dificultar el montaje de los descargadores en las terminales de los aparatos. Además si los apartarrayos son movidos lejos de las terminales de los equipos, puede que este incremento en la distancia resulte en un incremento en la magnitud del la onda de voltaje que es aplicada a equipo.

También hay que considerar que en muchas ocasiones el equipo que va a protegerse tiene una impedancia de onda más grande que la de la línea o cable por medio del cual se desplaza la descarga. Lo que significa que el voltaje puede en su momento reflejarse positivamente en las terminales del equipo, y el voltaje desarrollado en este punto, incrementarse a valores superiores al del voltaje de disparo del descargador.

La ubicación del apartarrayos, entonces no puede ser arbitraria, ya que su radio de protección es limitado. En condiciones de servicio el descargador puede verse conectado al final de una línea o en el punto de unión de dos líneas de impedancia características diferentes. En seguida se tratará un caso :

Una onda viajera se desplaza a través de una línea de transmisión de impedancia característica  $Z$ , como se ve en la fig. 4.4.1, al final de la cual se encuentra conectado un apartarrayos de tipo autoválvula. Antes que el descargador dispare, la tensión se duplicará por reflexión, ya sea porque la línea se encuentra abierta en ese extremo o porque la misma alimenta un transformador de potencia ( $Z_T \gg Z_L$ ).

Pero una vez que el descargador haya sido disparado, la tensión de disparo, obligará la circulación de una intensidad de corriente a través del mismo.

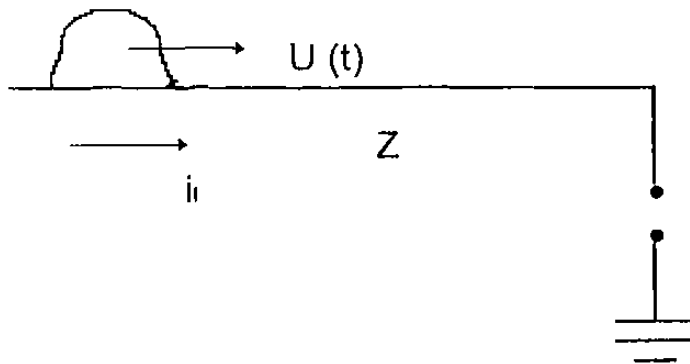


FIG. 4.4.1 Representación esquemática de una onda de tensión arriando a un apartarrayos autovalvular.

Utilizando un circuito equivalente para tal fin, como el de la fig. 4.4.2, se obtiene

$$2.U = I_1 \cdot Z = u_r \quad \text{Ec. 4.4.1}$$

de donde se despeja

$$u_r = 2.U - i_1 \cdot Z \quad \text{Ec. 4.4.2}$$

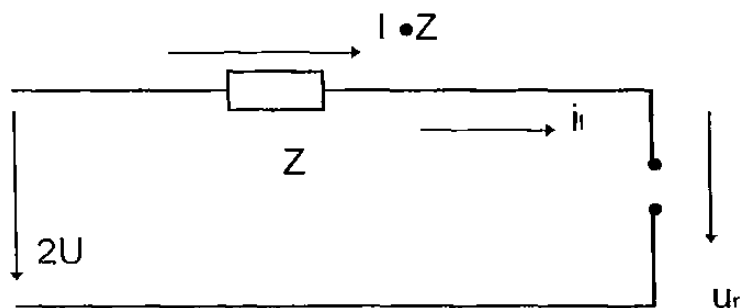


FIG. 4.4.2 Circuito equivalente.

De acuerdo con este resultado, se desprende que la tensión residual desempeña un papel importante en el comportamiento del apartarrayos y su grado de protección. Representando a  $u_r + i \cdot Z$ , en función de la intensidad de corriente, y transportando los valores de una gráfica a otra, se obtiene la tensión buscada.

Generalmente interesa el valor pico de la tensión residual, el cual coincide con la amplitud máxima de la onda incidente. La tensión en el descargador también se puede determinar de otra forma : a un valor específico de la tensión, por ejemplo  $2U(t_1)$ , le corresponden dos valores fijos de  $u$  e  $I$ .

En el diagrama  $u = f(I)$  la relación

$$2U(t_1) - I \cdot Z = u_r \quad \text{Ec 4.4.3}$$

representa una línea recta. Esta corta el eje de las ordenadas (circuito abierto) en el punto  $2U(t_1)$  y al de las abscisas (corto circuito) en el punto

$$i_{cc} = \frac{2 \cdot U(t_1)}{Z} \quad \text{Ec. 4.4.4}$$

La intersección de la línea recta con la característica  $u = f(I)$  suministra los valores correspondientes  $u$  e  $I$  para  $2 \cdot U(t_1)$ . En forma análoga se obtienen los valores para  $t_2, t_3, t_4$ , etc.

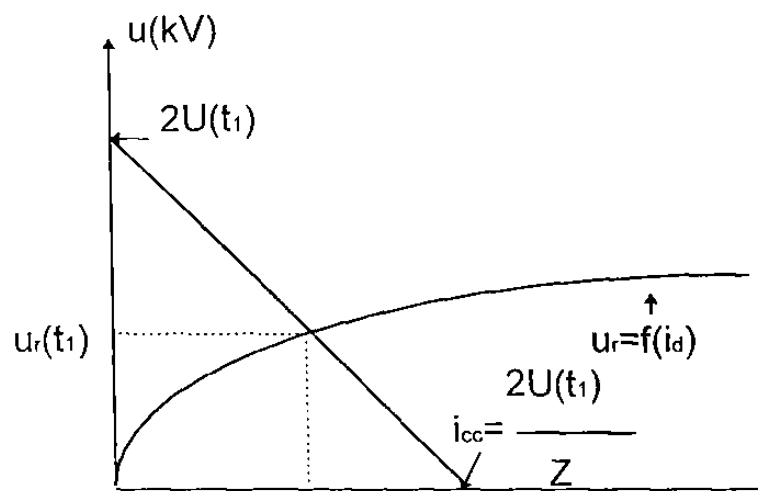


FIG. 4.4.3 Determinación gráfica de tensión residual para el tiempo  $t_1$

Otro caso frecuente y de una aplicación bastante práctica es el correspondiente a la instalación del apartarrayos en un nodo, al cual están conectadas dos líneas de impedancia diferentes fig. 4.4.4.

Por razones de sencillez, se asume que la longitud de las líneas es infinita; para no considerar las reflexiones en los extremos de las mismas. De este circuito se tiene :

$$2. U(t) = I_1 \cdot Z + u_r \quad \text{Ec. 4.4.5}$$

de donde

$$u_r = 2 \cdot U(t) - I_1 \cdot Z \quad \text{Ec. 4.4.6}$$

considerando que  $I_1 = i_d + I_2$  y  $u_r = I_2 \cdot Z_2$  se logra que

$$u_r = 2 \cdot U(t) - i_d \cdot Z_1 - u_r \cdot Z_1 / Z_2$$

es decir,

$$u_r = U(t) \cdot b_u - i_d \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Ec. 4.4.7}$$

en esta última relación se ha introducido un nuevo término denominado factor de paso  $b_u$

$$b_u = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Ec. 4.4.8}$$

La tensión residual,  $u_r$ , se puede determinar gráficamente. Para ello multiplique  $U_t$  por el factor de paso  $b_u$ . La caída de tensión de la línea, debido a la conexión en paralelo, viene por el término negativo de la ecuación 4.4.7. La intensidad de la corriente que es enviada a tierra por el descargador,  $i_d$ , se obtiene de la división de la tensión en vacío, término del lado derecho de la misma relación, por la expresión  $Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$  y la relación  $u_r / u_d$ .

Si el apartarrayos se encuentre en el nodo de unión de varias líneas de transmisión,  $Z_2$  representa la impedancia en paralelo de todas ellas. Si se comparan las tensiones en ambos casos, se puede determinar la atenuación que sufre la tensión en función del número de líneas que parten del nodo de referencia. La atenuación será más fuerte mientras mayor sea la tensión nominal, ya que a valores más elevados la resistencia de derivación no lineal, denota valores más altos. La impedancia característica, por su parte, permanece invariable.

## 4.5 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTOS.

En los artículos anteriores se ha comentado que en los sistemas de distribución encontramos generadores, líneas de transmisión, subestaciones, y que en estos se pueden generar sobretensiones de diferente naturaleza, las cuales pueden ser origen interno (fallas a tierra, operaciones de maniobra, desconexión brusca de cargas) y sobretensiones de origen externo (descargas atmosféricas).

Del mismo modo se presentaron alternativas para limitar los valores críticos que pueden alcanzar estas sobretensiones en el sistema. Así, por ejemplo, fué analizado el apartarrayos, hoy en día el dispositivo más empleado para derivar a tierra las sobretensiones de diferente índole. En este apartado trataremos la coordinación del aislamiento, cuya importancia en la concepción del sistema es relevante, pues es precisamente ella la que en gran parte estipula y determina el costo de la inversión.

En función de que existen una gran cantidad de parámetros relacionados con este tema, y tomando en cuenta que los niveles de tensión en la actualidad son del orden de los 800 Kv, y con la mira de llegar a los 1 200 Kv, además sabiendo que el aire no es el único elemento donde ocurren los fenómenos en cuestión, pues existen otros medios de uso cada vez mayor, tales como SF<sub>6</sub>, nitrógeno, se procederá a definir sólo los términos más usuales empleados en este tema.

La coordinación de los aislamientos es un tema que debe tratarse con mucha profundidad ya que es un problema complejo e importante, pero dado que no es el objetivo fundamental de este artículo, sólo comentaremos algunos detalles al respecto.

**Definición:** La definición más acertada a este respecto dice que; se entiende por coordinación del aislamiento a todas aquellas medidas que tienen como finalidad evitar fallas en el sistema como consecuencia de las sobretensiones que se generan en el mismo, al igual que la circunscripción de estas sobretensiones en aquellos sitios del sistema donde causen el menor daño, siempre cuando sea económicamente viable y tratando en lo posible de que el suministro de energía no se vea interrumpido.

Cuando se presenta esta definición, la coordinación del aislamiento se limitaba a las sobretensiones de origen atmosférico, pues las tensiones comerciales no habían sobrepasado los límites de la extra alta tensión. Pero cuando las tensiones sobrepasan los 300 Kv nominales de transmisión, las sobretensiones de origen interno desempeñan un papel muy importante. Con esta definición se ilustra que; es preferible una falla en la línea de transmisión y no en una de las subestaciones, donde los daños serían mayores, pues ahí se encuentran concentrados equipos de alto costo.



Aislamientos autorrestaurables : A este grupo pertenecen aquellos aislantes que después de una descarga disruptiva recuperan totalmente sus propiedades dieléctricas. Este concepto se ha generalizado para aislamientos externos, por ejemplo el aire, cabe señalar que también se aplica a cavidades cerradas, por ejemplo llenas de SF<sub>6</sub>, como en el caso de los equipos encapsulados.

En los sistemas y equipos convencionales las fallas ocurren en la mayoría de los casos, como consecuencia de la contaminación, y por lo tanto la ruptura se da a través del aire y a lo largo de la superficie aislante, es decir, sin perforación

Aislamientos no autorrestaurables : La característica de ellos es que después de una falla no recuperan de nuevo totalmente todas sus propiedades dieléctricas . Ejemplos típicos que afectan al aislamiento interno son las fallas en los arrollamientos de los transformadores, reactores, caracterizadas por una perforación que le impide al aislante sólido recuperar sus propiedades.

Sin embargo , este tipo de falla también puede observarse en aislamientos externos, como en las mismas cadenas de aisladores ( perforación de la porcelana entre el espárrago y la caperuza metálica ). El aislante, en la mayoría de los casos, tiene que ser sustituido.

La coordinación del aislamiento tiene que diferenciar a ambos tipos, el autorrestaurable del no autorrestaurable, pues el primero se presta para la obtención de información estadística, por ejemplo llevando a cabo pruebas en los laboratorios de alta tensión, mientras que el segundo, característico del aislamiento interno de los equipos, no se ve expuesto a las variaciones atmosféricas debido al encapsulamiento.

La forma de onda de la tensión desempeña un papel muy importante en el comportamiento del aislamiento, ya que las diferentes sobretensiones no tienen los mismos tiempos de formación de cresta y de amplitud. Para esto sabemos que los laboratorios dedicados a realizar pruebas de alta tensión a los dispositivos eléctricos, tienen sus propias normas. Pero casi en forma generalizada los impulsos correspondientes a las sobretensiones externas y de maniobra se aplican en forma consecutiva un número determinado de veces, para así obtener un comportamiento probabilístico en el caso de los aislantes externos, la sobretensión a frecuencia de régimen suele aplicarse por espacio de 1 a 2 minutos. Con el objetivo de simplificar el costo de los equipos de prueba algunas normas sugieren la aplicación de tensiones continuas ( $f=0$ ) por espacio de tiempos mayores.

También se puede observar la prescripción de formas de onda que difieren de las que se han señalado. Esto obedece a las características particulares de los diferentes sistemas y a las formas en que se generan en los laboratorios de alta tensión. Las sobretensiones de maniobra, por ejemplo, pueden ser generadas con la ayuda de un generador de impulsos o excitando la cascada de corriente alterna en el primario.

Luego las sobretensiones , normalizadas o no, a la coordinación del aislamiento se le plantean las siguientes exigencias:

1.- Garantizar que el aislamiento del sistema soportará todas las sollicitaciones dieléctricas, tanto normales como anormales.

2.- Que exista una derivación a tierra, en forma inofensiva, de las sobretensiones que afectan al sistema y que, por consiguiente, ponen en peligro el aislamiento del sistema.

3.- Garantizar que las rupturas dieléctricas ocurran hasta donde sea posible en el aislamiento externo y no en el interno, de manera que los equipos costosos, tales como transformadores, reactores, no sufran daño alguno en sus aislantes sólidos y líquidos.

4.- Si no es posible cumplir con las exigencias anteriores, entonces tratar de que las fallas sucedan en aquellos sitios del sistema donde causen el menor de los daños.

El arte de manejar todas estas medidas consiste en mantener un sano equilibrio entre el costo del aislamiento que garantiza su cumplimiento, sin la interrupción del servicio, y el de los equipos encargados de la protección contra las sobretensiones, considerando la frecuencia y magnitud de éstas.

## CAPITULO 5.

### PROTECCIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO.

#### 5.1 CONCEPTOS BÁSICOS.

Los sobrevoltajes transitorios en los sistemas de potencia, ocurren cuando energía originada fuera del sistema es inyectada en las líneas que alimentan equipos sensitivos. También, el acoplamiento de transitorios en las líneas es una fuente de sobrevoltajes dañinos. Pero la causa más común de sobrevoltajes, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, son las descargas atmosféricas y el cierre o apertura de fuentes de energía (switches).

Los efectos de las descargas ya han sido comentados y tienen el potencial de inducir voltajes de línea a línea, a través de la tierra y por inyección directa en el sistema.

Los transitorios originados por switches en los sistemas de potencia emanan de la energía atrapada en cargas que serán desconectadas o de eventos que toman lugar en el interruptor al momento de abrir o cerrar. En general los transitorios aparecen cuando un cambio tiene lugar en el sistema. El cierre o apertura de un interruptor es un cambio abrupto. Durante el cierre de los elementos mecánicos del interruptor, los contactos del mismo pueden rebotar, o un pre-encendido puede ocurrir antes del cierre de los contactos. El más simple de los transitorios debidos al switchero es típicamente limitado a dos veces el valor de pico del voltaje normal, pero en algunas condiciones puede llegar a ser hasta tres veces el valor pico del voltaje.

Los más frecuentes tipos de onda de voltaje es una onda con oscilación decayente de 5 a 500 Hz. Mientras las formas de onda de un transitorio pueden tener infinidad de variedades, el IEEE en el estándar 587 ha designado una forma de onda como guía para circuitos de corriente alterna y bajo voltaje, ésta es representada como un transitorio de 0.5  $\mu$ seg-100 kHz. Esta no describe un transitorio de onda circular, se esta suponiendo lo más cercano a las condiciones reales de tal forma, que el ingeniero pueda probar y ver como sus equipos reaccionan ante esta. El cumplimiento de este estándar será parte de un logro de los fabricantes para proteger sus equipos adecuadamente.

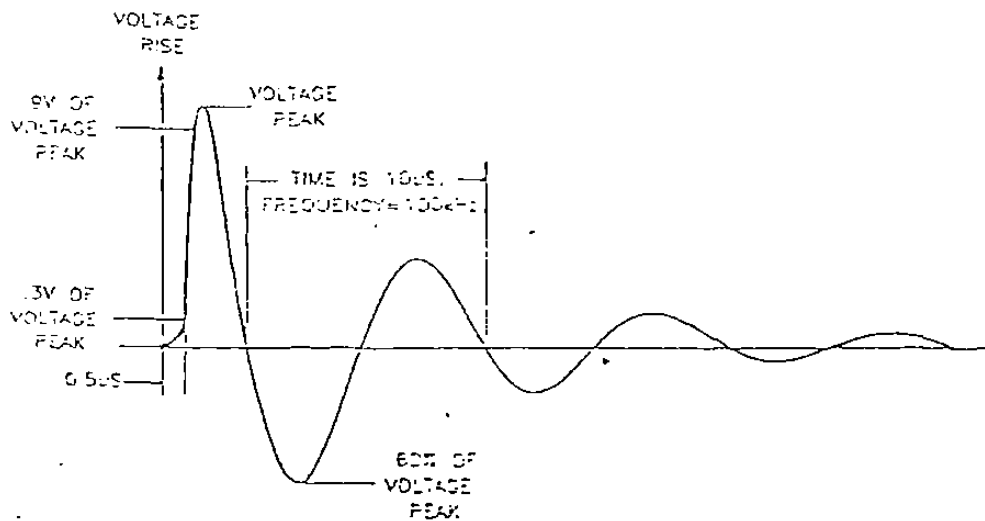


FIG. 5.1.1 IEEE 587 ONDA CIRCULAR 0.5  $\mu$ SEG. 100 KHZ.

No obstante las magnitudes de la onda de voltaje y su frecuencia de ocurrencia en circuitos no protegidos, son bien conocidos, sus formas de onda y energía contenidas no lo son tanto, esto confirma nuestra pretensión que las ondas de voltaje pueden dañar el equipo o causar mal funcionamiento tanto en sistemas industriales como en sistemas residenciales.

Con esto estamos diciendo que los transitorios ocurren dentro de nuestras instalaciones y por lo tanto en nuestras computadoras, pero la supresión de los mismos debe comenzar desde el exterior del edificio, esto es que mientras la descarga trata de arriar al cuarto de computadoras, antes, las desviamos, atrapamos o las corto-circuitamos. IEEE trata el transitorio desde la entrada del servicio eléctrico.(fig. 5.1.2)

Como ya se comentó necesitamos un supresor de transitorios que pueda manejar esta forma de onda y voltajes hasta los 6 KV y hasta 500 amperes. Aunque también sabemos que estos transitorios en una residencia, causados por cierre o apertura de interruptores pueden ser de 1200 volts o mayores y ocurrir una o más veces por semana, éstas golpean el disco duro y son capaces de incendiarlo. Estas son las razones por las cuales se deben proteger adecuadamente los equipos sensitivos.

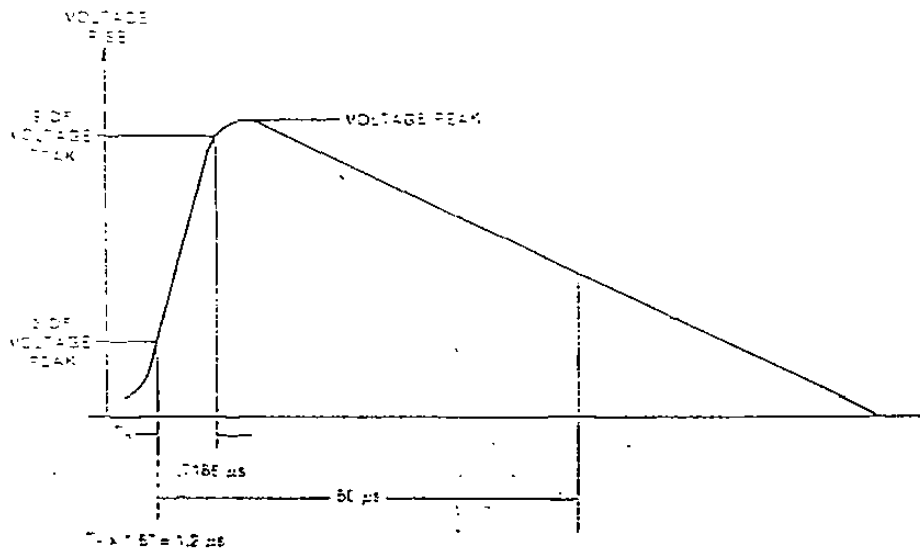


FIG. 5.1.2 IEEE FORMA DE ONDA EXTERNA.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DE PROTECCIÓN.

Varios dispositivos han sido desarrollados para proteger equipo electrónico de los transitorios. El término supresor de transitorios es un poco engañoso realmente estos atrapan, limitan o desvían. No pueden suprimir del todo pero pueden desviarlos a tierra o limitarlos a valores aceptables.

Hay dos clases básicas de dispositivos: el tipo desviadores y el tipo restrictores, éstos últimos no son muy complicados, simplemente ofrecen una alta impedancia a la frecuencia transitoria o alta resistencia a la propagación del transitorio. Esto se lleva a cabo con el uso de resistencias o inductancias en serie con el circuito. Los desviadores tienen propiedades que los hacen conducir bajo ciertas condiciones, permitiendo al transitorio encontrar un camino a tierra. Estos están conectados en paralelo de línea a tierra y toman dos formas básicas : pata de cabra ( crow bar ) y trampa de sobrevoltaje ( clamps ).

## PATA DE CABRA ( CROW BAR )

Estos dispositivos son simples de entender, cuando un sobrevoltaje ocurre, el dispositivo cambia de una alta impedancia a un dispositivo de baja impedancia, en estas condiciones ofrece una trayectoria a tierra, apartando la onda del equipo sensible, el cambio de estado en este dispositivo es inherente al mismo dispositivo. La mayor ventaja de estos dispositivos es su habilidad para manejar ondas grandes de corriente sin descomposición o sobrecalentamiento . Esto significa que la energía del transitorio deberá ser disipada en cualquier lugar del circuito, por supuesto que el propósito de este aparato es ver que la energía no sea consumida en la computadora. Cuando un dispositivo del tipo gap se incendia, crea su propio transitorio por switcheo dependiendo de la corriente y el tipo de carga, es posible que un evento de corta duración se convierta en uno de larga duración , sin embargo este dispositivo es simple y de bajo costo, que cuando se usa en combinación con otros métodos de supresión es una buena línea frontal de defensa.

Al ir aumentando el voltaje a través del gap, una pequeña conducción puede ocurrir mientras el voltaje de arqueo se alcanza. Este voltaje puede ser algunas veces entre 1500 y 3000 volts, esto puede tomar unos 10 nanosegundos para que el gap llegue a conducir ( fig.5.1.3 )

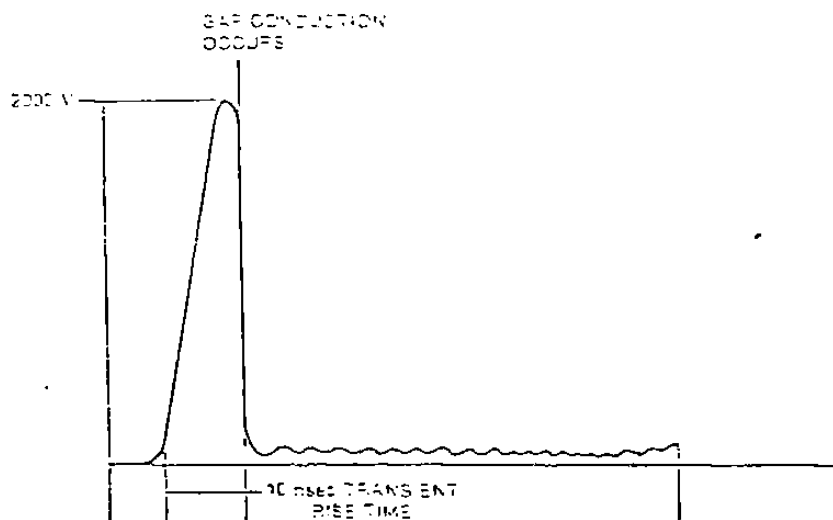


FIG. 5.1.3 DISPARO DEL GAP EN 10 NANOSEGUNDOS.

Cuando el punto de conducción es alcanzado el gas entre los puntos de conducción llega a su condición para conducir, y esta cesará después de que la corriente llegue a cero y permanezca ahí lo suficiente para la desionización de su trayectoria y recuperar su estado de aislamiento lo cual toma varios ciclos.

El problema con este proceso es que mientras el voltaje esta creciendo, la carga esta dejándose de proteger. El voltaje típico de conducción puede también ser afectado por el tiempo de descanso entre conducción, la naturaleza física del proceso hace difícil la producción de voltajes de arqueo al disminuir los niveles de voltajes. Esto es también función de las tolerancias de fabricación para distancias muy pequeñas en los gaps. Parte de estas limitaciones pueden ser aliviadas por la colocación del gap en un tubo lleno de gas teniendo menor voltaje de ruptura que el aire. (Fig.5.1.4)

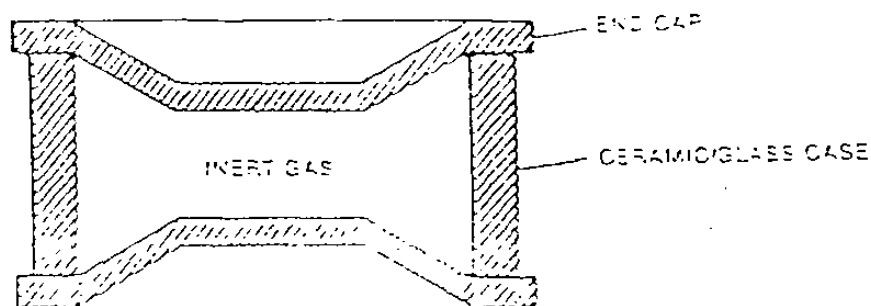


FIG. 5.1.4 DISPOSITIVO DE TIPO GAP.

Las compañías suministradoras de energía tienen sus procedimientos de instalación de apartarrayos en la entrada de los edificios, apartarrayos es un término ya pobre para designar estos dispositivos ya que su mejor función es desviar la energía que atrapan. Como la onda de voltaje se mueve hacia la carga es ampliamente atenuada por el transformador de servicio del edificio, el aislamiento entre el primario y el secundario del transformador sirve para amortiguar el transitorio a la entrada, este es el lugar ideal para colocar un dispositivo del tipo gap.

Sí el apartarrayos se coloca muy alejado en la línea, entonces sólo en algunos circuitos, por ejemplo los alimentadores de las computadoras, la onda podría encontrar otros caminos a través de varias clases de metales de la construcción del equipo de computo.

Si se coloca el apartarrayos en el secundario del transformador de servicios del edificio, esto condiciona a toda la potencia a entrar al edificio. Algunos fabricante recomiendan apartarrayos dentro de los cuartos de computadoras, aunque esta práctica no sea muy aceptada por que al desviar ondas de sobrevoltaje cerca de la computadora esta podría viajar a través de la tierra del equipo y causar daños irreparables en los microcircuitos.

## TRAMPAS DE SOBREVOLTAJE ( CLAMPS )

Los dispositivos que atrapan ondas de sobrevoltaje tienen un cambio de impedancia que depende del flujo de corriente a través de ellos o del voltaje que aparece en sus terminales, las trampas tienen características no lineales al cambiar sus condiciones más allá del nivel de trapeo. A diferencia de los dispositivos del tipo chispazo, la instalación de una trampa no afecta la operación del circuito a niveles de voltaje de estado estable por debajo del nivel de trapeo. Cuando el transitorio de voltaje comienza a crecer, un flujo de corriente nace a través del dispositivo resultando una trampa para el voltaje ya que la corriente va a crecer más rápido de como crece el voltaje. Este efecto puede ser logrado con cualquier dispositivo que tenga una impedancia no lineal.

## DIODO AVALANCHA.

Los diodos avalancha son parte de la familia del diodo zener que inicialmente se usaron como reguladores de voltaje. Especial atención en la construcción mejora su capacidad de trapeo de voltaje. Uniones de gran diámetro con una gran capacidad de disipación de calor, hacen del diodo avalancha un buen supresor, típicamente son usados en instalaciones de bajo voltaje, 5 a 15 volts en circuitos lógicos, sin embargo pueden construirse para manejar aún voltajes más elevados.



Los supresores a base de silicio pueden fabricarse para una amplia gama de características supresoras. (Fig. 5.1.5) Si se grafica el pulso de corriente contra el voltaje de trampeo, encontramos que la curva es sorprendentemente plana sobre el rango de voltaje útil del dispositivo. Aunque la unión PN del diodo es muy delgada, la capacitancia puede ser una consideración dependiendo de la aplicación, pero se minimiza colocando varios diodos en serie. La ventaja del diodo es su rápida respuesta a incrementos de corriente de elevación rápida.

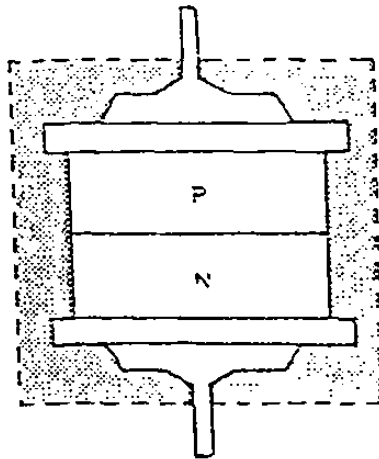


FIG. 5.1.5 SUPRESOR DE SILICIO.

## VARISTORES.

La función de los varistores es muy similar a un resistor variable, estos incluyen dos dispositivos con diferente construcción y tecnología. El primero hecho a base de carburo de silicio ha estado en la industria por algún tiempo y ha sido exitosamente usado como un dispositivo supresor de transitorios, pero recientemente otra tecnología ha desarrollado varistores de óxido de metal.

Las propiedades de los varistores de carburo de silicio fueron encontradas por casualidad y su proceso de conducción no lineal aún es sujeto de especulaciones.

## MOV's ( VARISTORES DE ÓXIDO DE METAL ).

Los varistores de óxido de metal han venido ha ser muy populares por su amplio rango de aplicaciones.El proceso de conducción en el MOV toma lugar en los límites de grandes granos de óxido de zinc formados en un delicado proceso y suspendidos en óxido de bismuto. Las uniones PN existen efectivamente en la interfase entre estos materiales ( Fig. 5.1.6 ).

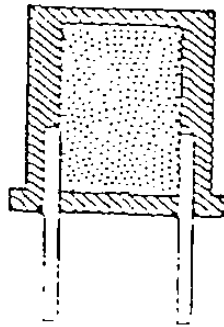


FIG 5.1.6 VARISTOR DE ÓXIDO DE METAL

Las características básicas de funcionamiento de un MOV son similares a las de los de carburo de silicio y la selección entre ellos depende de los voltajes de trampeo y de la capacidad para manejar energía . Los MOV's generalmente manejan grandes cantidades de energía, mientras que los de carburo de silicio son recomendables para atrapar ondas de menor voltaje.

## DEFECTOS.

Como ya se ha comentado, los dispositivos del tipo gap, actúan como un corto circuito y absorben pequeñas cantidades de energía, mientras los dispositivos de estado sólido como los MOV's absorben grandes cantidades de energía y debido al esfuerzo al manejar esta energía los dispositivos MOV's eventualmente fallan. Un fuerte golpe de esta energía o varios golpes ligeros de la misma, pueden causar el rompimiento de las uniones internas viniendo a ser un camino sólido para el flujo de corriente. Hay dos formas de tratar esta corriente y ambas involucran la colocación de un fusible en el circuito.

La figura 5.1.7 muestra los dos métodos de protección usando un fusible, en la fig. 5.1.7 A tenemos la necesidad de proteger equipo a cualquier costo, pues permitiríamos que el equipo saliera de servicio por una falla en el supresor. En la fig. 5.1.7 B tendríamos una operación continua. El dispositivo puede fallar cortocircuitándose y hacer que se dispare una protección interrumpiendo la potencia o señal de transmisión, si esta instalado en la línea de datos.

La colocación de un fusible en serie con el dispositivo asegura una operación continua y con una luz indicadora puesta en paralelo con el fusible de tal modo que el operador pueda ver que el dispositivo tenga que ser reemplazado.

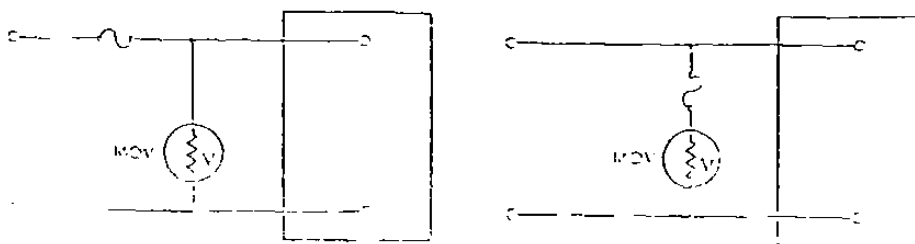


FIG. 5.1.7 DOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN USANDO FUSIBLES.

Esto hace resaltar un punto interesante. Hoy en día hay muchos productos para computadoras personales, como supresores de transitorios, contruidos dentro de la barra de potencia o dispositivos que se conectan a la caja de energía de la cual se alimenta la computadora, la mayoría de estos dispositivos no tienen forma de indicar si un golpe fuerte de energía lo ha puesto fuera de servicio. Normalmente los dispositivos de protección son MOV's o diodos de avalancha, y sabiendo que sobrevoltajes de 1200 volts se dan una vez cada dos semanas y no hay que indicar que el supresor haya operado, podemos pensar que aún están ahí y realmente ya la protección no existe. Por lo que para estar seguros de que se tiene protegido su equipo sensitivo, sería mejor que adquiriera dispositivos de calidad.

### 5.3 MÉTODOS DE ACOUPLE DE LOS SOBREVOLTAJES EN EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO.

Los mecanismos de acoplamiento para ondas de voltaje o corriente de gran crecimiento en un tiempo corto, pueden categorizarse como: de espacio libre o de alcance de campo.

#### 5.3.1 Acoplamiento de espacio libre:

La onda de energía en el acoplamiento de espacio libre, puede dividirse en dos rangos : de campo cercano y de campo alejado. El rango de campo cercano involucra a los conductores que están lo suficientemente cerca que pueden generar acoplamiento inductivo (magnético) o capacitivo. El rango de campo alejado involucra la radiación e intercepción de ondas electromagnéticas como el principal mecanismo de acoplamiento.

#### 5.3.2 Acoplamiento inductivo ( magnético ) ( campo cercano ).

Los circuitos electrónicos sensitivos que están físicamente cerca, pero no en contacto directo con una fuente de ondas de sobrevoltaje, pueden sufrir daños sin que aparezca un arco o descarga. Debido a la gran característica  $di / dt$  de la onda, los voltajes pueden ser electromagnéticamente inducidos en los conductores cercanos. Este efecto esta descrito en la fig.5.3.1 para el caso de ondas en el conductor de bajada a tierra de las puntas pararrayos. El voltaje inducido en ese instante es función de la geometría de la malla, la distancia del conductor de bajada y la razón del cambio de corriente.

Este acoplamiento no deseado de la fuente de ondas de energía en los circuitos sensitivos, es posible darse por la colocación de cualquier conductor que lleve una corriente y se encuentre en la proximidad de los circuitos.

El área encerrada por la malla de los circuitos sensitivos es un parámetro importante, a mayor área menores problemas de acoplamiento. La magnitud del voltaje inducido en los circuitos sensitivos no es función de la impedancia de los mismos, la magnitud del voltaje es igual para circuitos de alta o baja impedancia, y esto puede ser problemático para los de baja impedancia o circuitos sin protección contra sobrevoltajes .

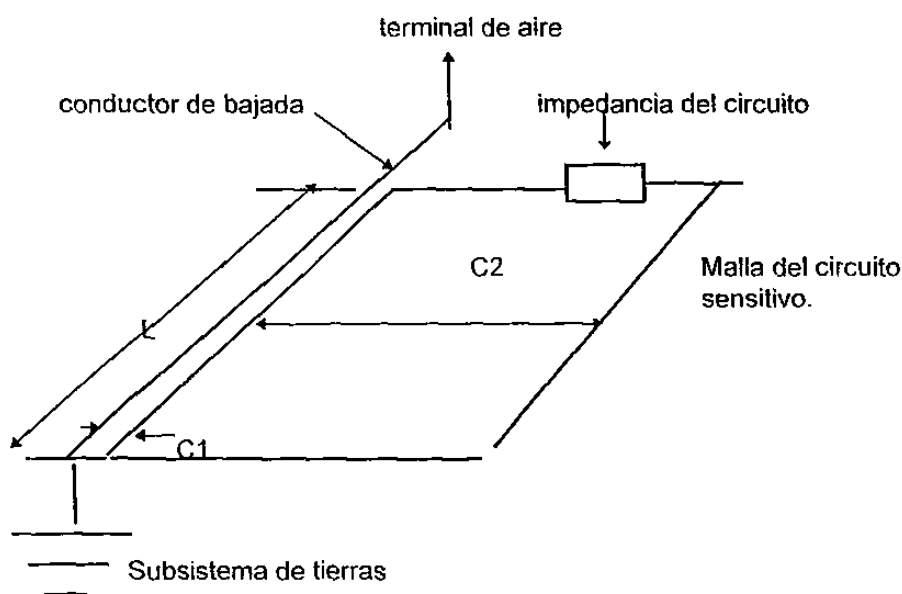


FIG.5.3.1 Acoplamiento inductivo de onda de corriente al equipo sensitivo adyacente.

### 5.3.3 Acoplamiento capacitivo ( electrostático ) (campo cercano ).

Este tipo de acoplamiento de la fuente de onda de energía, es un fenómeno electrostático, y puede darse entre circuitos muy próximos entre sí.

Los parámetros importantes son: el espaciamiento, el área mutua expuesta y la constante dieléctrica entre la fuente y el circuito sensitivo. Los niveles de acoplamiento dependen también de la amplitud y de la razón del cambio de voltaje, capacitancia de acoplamiento, capacitancia de dispersión del circuito sensitivo así como la impedancia del mismo.

En bajas frecuencias acopladas capacitivamente, el voltaje se incrementa con el incremento de la capacitancia de acoplamiento y con el crecimiento de la impedancia del circuito sensitivo. En altas frecuencias los voltajes de acoplamiento crecen con el incremento de la capacitancia de acoplamiento y con la disminución de la capacitancia de dispersión del circuito.

#### 5.3.4 Acoplamiento electromagnético (campo lejano ).

Para los circuitos sensitivos este acoplamiento ocurre cuando el circuito actúa como una antena receptora para la energía electromagnética. La corriente inducida de este modo aumenta con la intensidad del campo magnético en la vecindad del circuito y así mismo con la efectividad del circuito actuando como antena. La magnitud del campo es función inversa de la distancia de la fuente de radiación. La efectividad del circuito actuando como antena, depende de su longitud y geometría relativa a la longitud de onda de la señal de ruido. El circuito sensitivo exhibe la necesaria condición de resonancia al interferir las frecuencias del campo.

#### 5.3.5 Interacción con cables enterrados.

La medida y análisis de los voltajes transitorios inducidos por cables enterrados indican que son una función de los parámetros del cable o cables, profundidad, resistividad del suelo, forma de las terminales del cable, agregado a lo que puedan proporcionar elementos propios de la misma construcción del edificio, como tuberías de agua, líneas de potencia y otros conductores cercanos. Otros parámetros importantes son la longitud del cable y la capacidad dieléctrica del forro del cable. La resistividad del suelo es importante en la determinación de las ondas de voltaje inducidas por rayos, el voltaje de pico y la corriente del transitorio son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la resistividad del suelo.

Los cables enterrados muy profundamente, sufren menos el efecto de los golpes del rayo, debido a una gran atenuación de las ondas de alta frecuencia cerca de la superficie de la tierra, del mismo modo el hilo de guarda de las líneas aéreas sobre los cables enterrados, pueden reducir el impacto de las corrientes a tierra.

### 5.3.6 Interacción con cables aéreos.

El uso de conductores aéreos para interceptar descargas de origen atmosférico, para la protección de los cables que están por debajo de estos conductores, es una práctica común. Existen varias teorías que explican la zona de protección de estos cables de protección o hilos de guarda.

Los diferentes daños ocasionados por las descargas ya han sido estudiados, y las estrategias de protección básicamente consisten en desviadores de onda de corriente e hilos de guarda aterrizados. Los sistemas de distribución están formados de cables aéreos que forman mallas de formas geométricas diversas, en general,

El voltaje inducido de circuito abierto en estas mallas es una función del tamaño de la malla y de la razón del cambio del flujo magnético a través de la sección transversal de la malla. Dependiendo de la severidad de la onda y de la susceptibilidad del equipo sensitivo pueden darse tres tipos de daños:

Daños a la información o línea de datos, esfuerzos en la circuitería y destrucción de la misma. Las líneas de datos son susceptibles a interferencias de ondas de sobrevoltaje por conducción, acoplamiento inductivo o capacitivo y radiación electromagnética.

Esfuerzos en la circuitería son debidos a simples descargas u ondas por switcheo que a menudo causan daños que contribuyen a la falla de los aparatos. La tercer posible causa de daño es la destrucción total de la circuitería.

## 5.4 PRÁCTICAS RECOMENDADAS DE DISEÑO PARA EVITAR DAÑOS POR SOBREVOLTAJES.

Existen una gran cantidad de recomendaciones para que el diseño, selección e instalación de los modernos equipos electrónicos, como las que ofrece el IEEE para este particular. Las instalaciones de equipo sensitivo, grandes o pequeñas serán afectadas por una serie de códigos, estándares y regulaciones que le darán al proyecto las garantías de seguridad en el funcionamiento de las mismas.

Todas las recomendaciones irán dirigidas, sin duda, hacia la seguridad del personal que opera estos equipos así como a la conservación de los mismos. Desde la selección de un sistema trifásico contra un sistema monofásico, la correcta selección de los voltajes de operación, el cálculo correcto de los calibres de los cables alimentadores, el cálculo de la caída de tensión en los alimentadores, la selección de un sistema de energía ininterrumpida, la selección del sistema de tierras más adecuado para el aterrizaje seguro del equipo, así como el sistema de aterrizaje del edificio.

La correcta selección de los conduits y ductos abiertos o cerrados que llevarán conductores eléctricos, deberán respetar los lineamientos dados por el Código Nacional Eléctrico en vigor.

## 5.5 PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA LA INSTALACIÓN.

Diferentes recomendaciones son establecidas para la correcta instalación de los dispositivos protectores contra las sobretensiones, pero en particular comentaremos la denominada protección multietapa. Las trampas de sobrevoltaje son apropiadas para colocarse en diversos sitios desde la entrada de servicio hasta la propia computadora, incluyendo la línea de datos. Hay que asegurarnos que, puesto que las ondas serán llevadas a tierra, las trayectorias de diversificación no provoquen otro problema, también cuando estos dispositivos fallan pueden incendiarse, por lo tanto deberán encapsularse adecuadamente. La selección de uno u otro dispositivo debe ser apropiada al transitorio que va a proteger. La fig. 5.5.1 muestra una forma de protección multietapa. Esto se puede ver como tres etapas de protección, la primera etapa desvía impulsos que contienen una gran cantidad de energía a tierra. Unos cuantos nanosegundos de energía se fugarán pasando esta etapa, tubos de gas nos protegerán de esta gran cantidad de energía destructiva, pero esto requiere una elevada entrada de energía para disparar el tubo de gas y el disparo crea condiciones transitorias de voltaje y corriente suficientes para dañar el equipo de computo. La segunda etapa es un inductor o resistor, un inductor bien diseñado ofrece una impedancia despreciable a la onda senoidal de A.C. pero ofrece una alta impedancia a los transitorios de rápido crecimiento con el tiempo. Quince pies de alambre o más pueden tener el mismo efecto inductivo. Esta impedancia actúa como una barrera al transitorio atapándolo mientras los otros supresores tienen tiempo para reaccionar. RFI y el ruido ven la misma impedancia que un transitorio de rápido crecimiento.



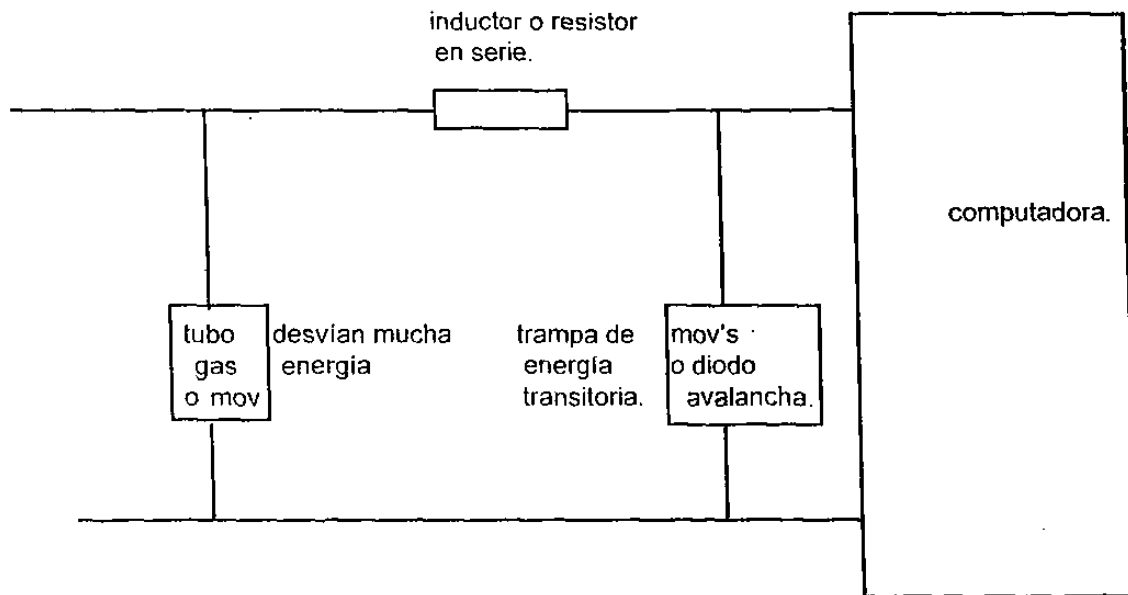


FIG. 5.5.1 Combinación típica de varios elementos para protección de transitorios.

### 5.5.1 Instalación de supresores:

Como se ha venido comentando, hay diferentes localizaciones apropiadas para la colocación de trampas de sobrevoltaje, esto incluye la entrada y salida de transformadores, moto-generadores, sistemas de energía ininterrumpida y sus

switches de paso automáticos, y las entradas al equipo de cómputo. Se debe enfatizar siempre en un buen sistema de aterrizamiento y en la adecuada colocación del supresor especialmente dispositivos del tipo pata de cabra (crow bar). La operación de este dispositivo consiste en pasar grandes cantidades de energía a tierra. En la fig. 5.5.2, podemos observar una línea de datos entrando al edificio, se han colocado apartarrayos multietapa cerca de la entrada del edificio y aterrizados a una varilla de tierra. El equipo de comunicaciones computarizado está conectado a una toma distinta de tierra.

Podemos ver que hay un camino a través de la línea de datos, a través de la comunicación I.C. la cual es alimentada de una fuente que está aterrizada a través del alambre verde de tierra. Aquí podemos observar también un camino a través de la tierra regresando al apartarrayos. La inductancia de la terminal verde de tierra podría ser lo suficientemente grande de tal manera que durante la conducción del apartarrayos la caída de voltaje a través de la inductancia de la terminal pueda ser mayor que lo que pueda soportar el I. C.

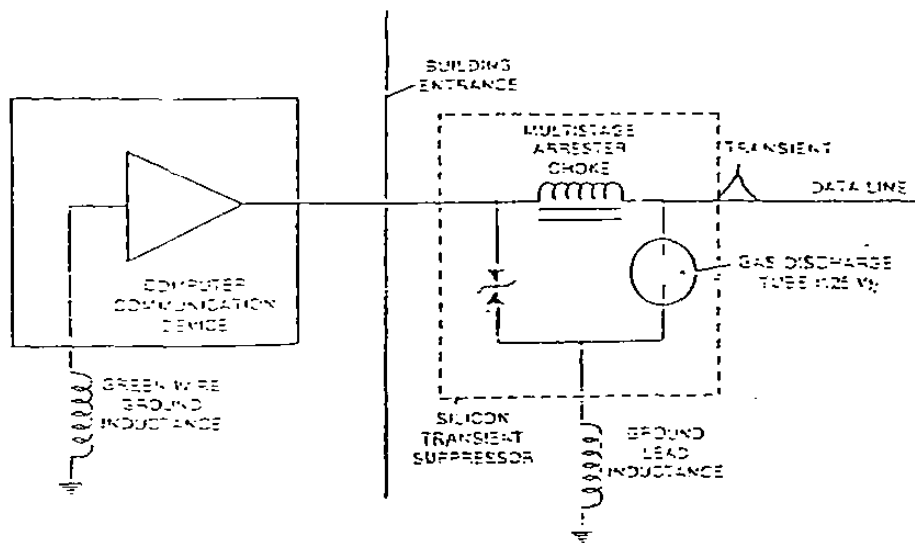


FIG. - 5.5.2 APARTARRAYOS SON A MENUDO PUESTOS EN LA LINEA DE DATOS DE ENTRADA AL EDIFICIO O CUARTO DE COMPUTO.

El voltaje que el I. C. ve es la suma del voltaje de trapeo del apartarrayos y la caída de voltaje a través de la terminal de tierra de la inductancia. Si el transitorio es atrapado por el supresor digamos a unos 30 volts, la impedancia a tierra del dispositivo puede ver unos 200 volts desarrollados a través de ella debido al flujo de corriente. El I. C. verá 200 volts entre la línea de datos y tierra y con esto borra el I. C. La solución a este problema es conectar la terminal de tierra de los supresores de transitorios a un punto de tierra del sistema de tierras del edificio, esto mantendrá alejada la onda de corriente de la computadora. Si esto no es posible la práctica indica que la línea de datos entra al edificio en las cercanías de la computadora. Si este fuera el caso, lo más lógico sería enlazar la tierra de los supresores de transitorios a un punto del plano de tierra de la computadora. Con esto realizado, la caída de 200 volts será vista igual por la computadora y el supresor, esto significa que ambos el I. C. y la línea de datos están referenciados a 200 volts, ahora el I. C. sólo verá los 30 volts atrapados en la línea de datos. A nuestro equipo no le interesa si están referenciados a un plano de tierra de 20 000 volts, cuando este voltaje está equilibrado entre los gabinetes, el equipo opera adecuadamente, y la tierra mantendrá un adecuado camino en el circuito. Extrañamente este plano de tierra de 20 000 volts ha ocurrido durante tormentas eléctricas, y en esas condiciones las luces podrán parpadear pero la computadora seguirá trabajando como si nada pasara.

## 5.6 TIERRA DE EQUIPO.

Se define como tierra de equipo a la continua y permanente unión de todas las partes metálicas expuestas no portadoras de corriente, de equipo fijo (conduits, charolas, cubiertas de paneles, cubiertas metálicas de motores) y la conexión de este sistema al de electrodos de tierra del edificio ya sea en el equipo de servicio o en el secundario de un transformador de un sistema interior separado.

### OBJETIVOS:

1) Asegurarse de que no exista la posibilidad de electrocutamiento del personal en el área, limitando el voltaje a tierra de cualquier parte metálica no diseñada para conducir corriente en condiciones normales de operación.

2) Evitar daño térmico. Proveer una capacidad adecuada de conducción de corriente (en magnitud y duración), para aceptar la corriente de falla a tierra permitida por el sistema de protección de sobrecorriente, sin crear incendio o explosión en el edificio.

3) Asegurar el desempeño óptimo del sistema de protección. Facilitar la rápida apertura de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes en caso de una falla a tierra.

En un sistema eléctrico que contenga circuitos sensitivos, puede haber varios subsistemas conectados a un sistema de tierras. Las partes metálicas no portadoras de corriente deben estar puestas a tierra según se ha comentado anteriormente.

La circuitería electrónica que provee el control de la potencia tiene un punto de referencia cero llamado "común". Cuando un gabinete de control está aterrizado, significa que está conectado a la tierra del sistema de distribución del edificio, además es necesario que el común del equipo electrónico esté conectado a la tierra del sistema de distribución del edificio en una forma especial, generalmente a través de una capacitancia.

Mantener un conductor de tierra de equipo muy cerca de los conductores de fase de corriente alterna es absolutamente esencial, para asegurar una mínima impedancia en el camino de retorno de la corriente de falla a tierra. Cuando un conductor de tierra de equipo es mantenido físicamente cerca del conductor de fase que alimenta la corriente de falla a tierra ( ejem. que el conductor de tierra de equipo esté en el mismo conduit, cable, charola, canalización o que su trayectoria sea muy cerca de los conductores de fase ), entonces la impedancia del circuito de falla tiene reactancia inductiva mínima debido a la cancelación mutua de los campos magnéticos alrededor de los conductores. Bajo estas condiciones de impedancia mínima, el voltaje a tierra y la corriente de corto circuito es la máxima posible para abrir los dispositivos de protección.

## 5.7 REQUISITOS DEL CÓDIGO NACIONAL ELÉCTRICO.

Como ya se ha mencionado, la instalación de aparatos eléctricos de cualquier índole, esto incluye los que contienen circuitos eléctricos sensitivos, deberá cumplirse con una serie de códigos, estándares o limitaciones para que la instalación de los equipos sea segura para la operación del personal así como para el equipo. Deberá observarse el Código Nacional Eléctrico del cual hemos incluido algunas recomendaciones al respecto.

Equipo que tiene que ser aterrizado:

Toda cubierta metálica que rodea conductores debe estar puesta a tierra.

Las partes metálicas expuestas ( que normalmente no conducen corriente ) de equipo fijo o conectado por métodos fijos de cableado. Esto incluye: paneles o gabinetes eléctricos, motores ,elevadores y grúas.

Las partes metálicas expuestas ( que normalmente no llevan corriente ) de equipo conectado por intermedio de cables de uso rudo, deben estar aterrizados.

Métodos de puesta a tierra : El circuito de retorno a tierra desde circuitos sensitivos, equipos y cubiertas metálicas de paneles y conductores debe

A) Ser permanente y continuo.

B) Tener la capacidad suficiente ( en magnitud y tiempo ) de conducir en forma segura cualquier corriente de corto circuito a tierra que este disponible.

C) Tener una impedancia lo suficientemente baja para limitar el voltaje a tierra y facilitar la operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente.

Con cada circuito eléctrico extendiéndose desde el equipo de servicio hacia el interior del edificio, se debe llevar un conductor de tierra de equipo junto con o rodeando los conductores de fase.

El conductor de tierra de equipo puede ser uno o más de los siguientes:

A) Conductor de cobre dentro del conduit, charola o canalización junto con los conductores de fase.

B) Conductor de cobre llevado afuera del conduit que contiene los conductores de fase, pero firmemente atado a él.

C) Conduit de metal rígido rodeando los conductores de fase.

D) Conduit de metal intermedio rodeandolos conductores de fase.

E) Conduit de metal flexible cuando el conduit y las conexiones están aprobados para uso como conductor de tierra de equipo y si es de menos de seis metros de longitud.

F) Charolas y canalizaciones metálicas sosteniendo los conductores de fase.

Si no se usa el conduit como conductor de tierra entonces debe llevarse un conductor de cobre junto con los conductores de fase en el conduit. Este conductor adicional debe entonces conectarse a la estructura metálica de los equipos. El calibre del conductor deberá seleccionarse de acuerdo con el Código Nacional Eléctrico.

La filosofía a seguir es que existan dos sistemas de distribución y el común del equipo electrónico. En las estructuras de cada equipo de control deberían estar estas dos tierras presentes con las siguientes características:

1.- El común del equipo sensitivo debe ser conectado a un electrodo de tierra artificial de varilla exclusivo y separado del sistema de electrodos del edificio.

2.- La cubierta metálica del gabinete de control debe ser conectada al sistema de tierras del edificio.

3.- El común del equipo de control debe unirse a la cubierta metálica del gabinete de control por medio de una capacitancia con buenas características de respuesta en alta frecuencia (0.47 microfaradios es un valor típico ). Esto minimizará los efectos en los circuitos cuando hay disturbios generados externamente en el sistema de tierras

# CAPÍTULO 6.

## PARARRAYOS

### 6.1 CONCEPTOS BÁSICOS.

El pararrayos es el dispositivo diseñado para la protección de sistemas eléctricos de potencia, edificios públicos, edificios de manufactura, y demás contra las descargas eléctricas que golpean directamente a los mismos. El propósito de la instalación de este dispositivo es la de salvaguardar personas y propiedades de los daños que puedan causar las descargas. El presente capítulo indica las medidas a adoptar para diseñar, con los conocimientos y la tecnología actuales, un sistema de protección contra el rayo mediante pararrayos y marca las directrices para la realización del sistema de protección.

No deberá olvidarse que ningún sistema o dispositivo puede evitar la formación de rayos.

Una instalación de protección contra el rayo concebida y realizada conforme a lo que estipulan los reglamentos y códigos vigentes, no pueden, como todo proceso en el que intervienen elementos naturales, asegurar la protección absoluta de las estructuras, de las personas o de los objetos; no obstante, la aplicación de esos reglamentos reduce en forma significativa el riesgo de daño, debido a impactos de rayos, en las estructuras protegidas.

La decisión de dotar a una estructura de un sistema de protección contra el rayo depende de los factores siguientes: la probabilidad de impacto en la estructura, su gravedad y que consecuencias serían aceptables. La elección tendrá en cuenta los parámetros contenidos en la guía de evaluación o cálculo de riesgo.

Entre las estructuras en las que será necesaria la instalación de un sistema de protección contra el rayo se pueden citar :

- Edificios o zonas abiertas con concurrencia de público.
- Edificaciones de gran altura y ,en general, construcciones elevadas ( chimeneas, depósitos de agua, faros ....)
- Construcciones y depósitos en los que se manipulen y/o contengan materiales peligrosos (explosivos, inflamables, tóxicos ...).
- Edificios que contengan equipos o documentos especialmente vulnerables o valiosos (instalaciones de telecomunicaciones , computadoras, archivos, museos, monumentos históricos, patrimonios culturales.. .) y, en general, estructuras utilizadas para fines comerciales , industriales, agrícolas, administrativos o residenciales.

El sistema de protección se compone de :

- A) Terminales de aire.
- B) Conductores de bajada.
- C) Terminales de tierra.
- D) Conductores de interconexión.

Una terminal de aire es el componente del sistema de protección que intenta interceptar la descarga atmosférica. Como fenómeno eléctrico, el rayo puede tener las mismas consecuencias que cualquier otra corriente que circule por un conductor eléctrico, los efectos de los parámetros característicos del rayo son :

- Efectos térmicos.
- Efectos electroquímicos.
- Efectos electromagnéticos.
- Efectos electrodinámicos.

Junto con algunos efectos acústicos y ópticos. Al dimensionar las diferentes partes que componen el sistema de protección contra el rayo, se deberán considerar los efectos térmicos y electrodinámicos en forma especial, ya que tienen una influencia en el medio de descarga a tierra. El estudio previo para la instalación de protección contra el rayo comprende dos aspectos:

- a) Estudio del riesgo de caída de rayos y la selección del nivel de protección.
- b) Emplazamiento de los diferentes elementos de la instalación.

## 6.2 NIVEL DE RIESGO.

Esta guía de riesgo está preparada para asistirnos en el análisis de varios criterios para determinar el riesgo de pérdidas debidas a los rayos. Como una guía no es posible que cubra todos los casos a considerar, de tal forma que en el caso de estructuras especiales deberán realizarse consideraciones especiales.

Si la estructura está en una situación de riesgo, el índice R podrá calcularse de la siguiente manera:

$$R = \frac{A+B+C+D+E}{F}$$



Donde los valores del numerador se encuentran en las siguientes tablas, mientras los valores del denominador ( F ) corresponden a la frecuencias de descargas de rayos el la zona donde se encuentra la instalación y para esto tendrá que consultarse un mapa isoceráunico. Y con el resultado de este cálculo se hará una comparación con la siguiente tabla, para determinar el nivel de riesgo.

valor de R	valor de riesgo
0-----2	ligero
2-----3	ligero a moderado
3-----4	moderado
4-----7	moderado a severo
mayor que 7	severo.

Tabla 6.2.1

Valor de A Tipo de estructura	valor del indice
Residencia familiar con menos de 465 m <sup>2</sup> de construcción.	1
Residencia familiar con más de 465 m <sup>2</sup> construcción	2
Residencias, oficinas, fábricas con alturas menores a 15 m pero: cubriendo áreas menores a 2323 m <sup>2</sup>	3
cubriendo áreas mayores a 2323 m <sup>2</sup>	5
Residencias , oficinas, fábricas de 15 a 23 m de altura	4
Residencias, oficinas, fábricas con alturas de 23 a 46 m	5
Residencias, oficinas o fábricas con alturas mayores a 46 m	8
Edificios municipales, bomberos, policía	7
Hangares	7
Estaciones de generación eléctrica, centrales telefónicas	8
Bibliotecas, museos, estructuras históricas	8
Edificios en granjas	9
Clubs de golf	9
Lugares de concentración pública, escuelas	

teatros, iglesias, estadios	9
Estructuras delgadas como chimeneas, campanarios de iglesias, capiteles, torres de control	10
Hospitales, enfermerías, hogares de discapacitados	10
Edificios de manufactura, manejo o almacenamiento de materiales peligrosos	10

## Valor de B

Naturaleza de la estructura	tipo de techo	valor del índice
No - metálica	madera	5
	compuesto	3
	metal no- continuo	4
	metal elect--continuo	1
Madera	madera	5
	compuesto	3
	metal no - continuo	4
	metal elec--continuo	2
Concreto reforzado	madera	5
	compuesto	3
	metal no- continuo	4
	metal eléct-- continuo	1
Estructura metálica	madera	4
	compuesto	3
	metal no- continuo	3
	metal eléct --continuo	1

nota : compuesto del techo ; asfalto, brea, losa, pizarra.....

## Valor de C

Localización relativa	valor del índice
Estructuras en áreas de estructuras altas	
Estructura pequeña cubriendo áreas menores a 929 m <sup>2</sup>	1
Estructuras grandes cubriendo áreas mayores a 929 m <sup>2</sup>	2
Estructuras en áreas de estructuras bajas	
Estructuras pequeñas cubriendo áreas menores a 929 m <sup>2</sup>	4

Estructuras grandes cubriendo áreas mayores a 929 m <sup>2</sup>	5
Estructuras extendiéndose hasta 15.2 m sobre estructuras o terrenos adyacentes	7
Estructuras extendiéndose más que 15.2 m sobre estructuras o terrenos adyacentes	10

Valor de D  
Topografía

Localización	valor del índice
En la llanura	1
En un costado de la colina	2
En la cima de la colina	3
En la cima de la montaña	5

Valor de E

Ocupantes y contenidos	valor de índice
Materiales no-combustibles , desocupados	1
Equipos residenciales	2
Muebles ordinarios o equipo	2
Ganadería	3
Concentración de personas menor a 50	4
Material combustible	5
Concentración de personas 50 o más	6
Materiales o equipos valiosos	7
Servicios esenciales, policía, bomberos	8
Líquidos combustibles o gases	8
Equipo de operación crítica	9
Contenido histórico	10
Explosivos o ingredientes explosivos	10

Valor de F  
Frecuencia de rayos

Nivel isoceráunico (ver mapa ) del índice	valor
0- 5	9
6- 10	8
11- 20	7
21- 30	6
31- 40	5
41- 50	4
51- 60	3
61- 70	2
más de 70	1

La guía de evaluación de riesgo está destinada a ayudar al responsable del estudio en el análisis de los diferentes criterios que permitirán evaluar el riesgo de daños debidos a la descarga, determinar la mejor protección y el nivel de protección requerido.

En este capítulo se tratará la protección, mediante pararrayos, contra los impactos directos del rayo en estructuras estándar

### 6.3 PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS ESTÁNDAR.

Antes de dar los pormenores acerca de este particular, como son las reglamentaciones y códigos establecidos por el Código vigente, es necesario establecer algunos conceptos fundamentales para la mejor comprensión del tema.

**Descarga eléctrica atmosférica a tierra:** Descarga eléctrica de origen atmosférico entre una nube y la tierra, que puede comprender más de un rayo.

**Rayo :** Impacto simple o múltiple de la descarga a tierra.

**Punto de impacto:** Punto en el que el rayo incide sobre el terreno, una estructura o una instalación de protección contra el rayo.

**Zona protegida :** Volúmen protegido por el pararrayos.

**Densidad de impactos :** Número de impactos por año y km<sup>2</sup>.

**Densidad de arcos:** Números de arcos de retorno por año y km<sup>2</sup>. Un impacto está constituido por término medio por varios arcos.

Sistema de protección contra el rayo ( SPCR ) : Sistema completo que permite proteger estructuras , edificaciones y zonas abiertas contra los efectos del rayo. Consta de un Sistema Externo y de un Sistema Interno de Protección contra el rayo.

nota : En ciertos casos el SPCR podrá estar formado solamente por el sistema externo o por el sistema interno.

Instalación exterior de protección contra el rayo ( IEPR ) : Una instalación de protección contra el rayo esta formada por uno o más pararrayos, uno o más conductores de bajada y una o más tomas de tierra.

Instalación interior de protección contra el rayo ( IIPR ) : Una instalación interior de protección contra el rayo comprende todos los dispositivos que reducen los efectos electromagnéticos de la corriente de la descarga atmosférica en el interior del espacio a proteger.

En seguida enunciaremos algunos de los términos más comunes que se emplean cuando se utilizan tanto pararrayos de tipo estándar o puntas Franklin, así como los modernos dispositivos pararrayos denominados Pararrayos con Dispositivo de Cebado ( PDC ).

Pararrayos con dispositivos de cebado : Pararrayos provisto de puntas captadoras, equipado con dispositivo de cebado que genera un avance en el dispositivo de cebado, evidenciado cuando es comparado con un PDC de referencia con su dispositivo de cebado anulado, de la misma geometría y en las mismas condiciones de ensayo.

Avance en el cebado ( $\Delta t$ ) : Ganancia media en el instante de emisión del rayo ascendente de un PDC en comparación con el de un PDC de referencia de la misma geometría, obtenidos mediante ensayos. Se mide en microsegundos.

Componente natural : Elemento conductor situado en el exterior, embebido en la pared o en el interior de una estructura y que puede ser utilizado para reemplazar, en todo o en parte, una bajante, o para completar una IEPR.

Barra equipotencial : Elemento o dispositivo que permite conectar al sistema de protección contra el rayo los componentes naturales, las masas y las tomas de tierra, así como los blindajes y conductores de protección de las líneas eléctricas de telecomunicaciones y de otros cables.

Union equipotencial : Unión eléctrica que pone al mismo potencial las masas y los elementos conductores.

Conductor de equipotencialidad : Conductor que permite realizar una unión equipotencial.

Chispa peligrosa : Arco eléctrico provocado por una corriente de descarga en el interior del volumen a proteger.

Distancia de seguridad: Distancia mínima requerida, entre dos elementos conductores, para evitar la formación de chispas peligrosas.

Armaduras de acero interconectadas : Componentes naturales en el interior de una estructura, que, si garantizan una continuidad eléctrica inferior a 0.01 ohm, pueden ser utilizados como conductores de bajada.

Conductor de bajada : Parte de la instalación exterior de protección contra el rayo destinada a conducir la corriente del rayo desde el PDC hasta la toma de tierra.

Unión de comprobación de tierras : Dispositivo de desconexión de la toma de tierra del resto de la instalación.

Toma de tierra : Elemento conductor o conjunto de elementos conductores en contacto directo con la tierra y que asegura una unión eléctrica con esta.

Electrodo de tierra : Conductor o conjunto de conductores enterrados que sirven para establecer una conexión con tierra y dispensar en ella la corriente de la descarga atmosférica.

Resistencia de la toma a tierra : Es la resistencia entre un conductor puesto a tierra y un punto de potencial cero.

Protector contra sobretensiones : Dispositivo destinado a limitar las sobretensiones y a derivar las corrientes asociadas a tierra. Contiene, al menos, un componente no lineal. Por ejemplo, para la protección de líneas de acometida eléctrica, de transmisión de datos, líneas telefónicas, instalaciones de televisión, emisores y receptores de radiofrecuencia.

Sobretensión transitoria de origen atmosférico: Sobretensión de corta duración oscilatoria o no, generalmente con una gran amortiguación.

Nivel de protección: Clasificación de una instalación exterior de protección contra el rayo, según su nivel de riesgo.

Superficie de captura equivalente: Superficie de suelo plano sometido al mismo número de impactos que la estructura considerada.

**Conductor de equipotencialidad :** Conductor que permite realizar una unión equipotencial.

**Chispa peligrosa :** Arco eléctrico provocado por una corriente de descarga en el interior del volúmen a proteger.

**Distancia de seguridad:** Distancia mínima requerida, entre dos elementos conductores, para evitar la formación de chispas peligrosas.

**Armaduras de acero interconectadas :** Componentes naturales en el interior de una estructura, que, si garantizan una continuidad eléctrica inferior a 0.01 ohm, pueden ser utilizados como conductores de bajada.

**Conductor de bajada :** Parte de la instalación exterior de protección contra el rayo destinada a conducir la corriente del rayo desde el PDC hasta la toma de tierra.

**Unión de comprobación de tierras :** Dispositivo de desconexión de la toma de tierra del resto de la instalación.

**Toma de tierra :** Elemento conductor o conjunto de elementos conductores en contacto directo con la tierra y que asegura una unión eléctrica con esta.

**Electrodo de tierra :** Conductor o conjunto de conductores enterrados que sirven para establecer una conexión con tierra y dispensar en ella la corriente de la descarga atmosférica.

**Resistencia de la toma a tierra :** Es la resistencia entre un conductor puesto a tierra y un punto de potencial cero.

**Protector contra sobretensiones :** Dispositivo destinado a limitar las sobretensiones y a derivar las corrientes asociadas a tierra. Contiene, al menos, un componente no lineal. Por ejemplo, para la protección de líneas de acometida eléctrica, de transmisión de datos, líneas telefónicas, instalaciones de televisión, emisores y receptores de radiofrecuencia.

**Sobretensión transitoria de origen atmosférico:** Sobretensión de corta duración oscilatoria o no, generalmente con una gran amortiguación.

**Nivel de protección:** Clasificación de una instalación exterior de protección contra el rayo, según su nivel de riesgo.

**Superficie de captura equivalente:** Superficie de suelo plano sometido al mismo número de impactos que la estructura considerada.

### Instalación exterior de protección contra el rayo.

Se deberá realizar un estudio para determinar el nivel de protección a emplear, el emplazamiento de el/los PDC(s), el trazado de la/s bajante(s) y la ubicación y el tipo de la/s toma(s) de tierra.

Este estudio previo comprende dos partes:

- a) Estudio del riesgo de caída de rayos y la elección del nivel de protección.
- b) Emplazamiento de los diferentes elementos de la instalación.

La información generada de este estudio debe contener :

- las dimensiones de la estructura.
- la posición geográfica relativa de la estructura.
- la frecuencia de ocupación de la estructura y si los ocupantes son personas con movilidad limitada o no
- el riesgo de pánico.
- la dificultad de acceso.
- la continuidad de servicio.
- el contenido de la estructura
- la forma e inclinación de los techos
- la naturaleza de los techos, muros y estructura interna.
- las partes metálicas del techo y los elementos metálicos exteriores importantes, como conductos de gas, aire acondicionado, escaleras, antenas, depósitos de agua
- cañerías y bajantes pluviales.
- las partes salientes del edificio y la naturaleza de los materiales que las constituyen .
- los puntos más vulnerables del edificio.
- la disposición de los conductos metálicos (agua, electricidad, gas.....)
- los obstáculos cercanos que puedan influir en el trayecto de la descarga, por ejemplo líneas eléctricas aéreas, vallas metálicas, árboles.
- la naturaleza del ambiente, que puede ser particularmente corrosivo ( ambiente salino, industria petroquímica, cementera ).

Los puntos más vulnerables de la estructura son las partes salientes, en particular las torres, veletas, objetos puntiagudos, chimeneas, tuberías, las masas metálicas ( extractores de aire, dispositivos de limpieza de fachada, barandales...) casetas sobre el techo.

### Dispositivos de captación.

Un pararrayos con dispositivo de cebado ( PDC ) está compuesto por una o más puntas captadoras, dispositivos de cebado y un eje sobre el que se soporta el sistema de conexión del conductor de bajada.



Para determinar la zona protegida por un PDC se utiliza un modelo electrogeométrico, como se explicará más adelante, y el avance en el cebado como se ve en el siguiente apartado. El PDC se instalará preferentemente en la parte más elevada de la estructura que lo soporta. Será en todo momento el el punto más elevado de la zona que protege.

Avance en el cebado: Un PDC se caracteriza por su avance en el cebado. Esto se evidencia en las pruebas de evaluación.

Tales pruebas comparan un pararrayos con dispositivo de cebado y un PDC de referencia con su dispositivo de cebado anulado de la misma geometría y en las mismas condiciones de prueba. Este avance en el cebado determina el cálculo de los radios de protección, este se expresa:

$$\Delta t = TPR - TPDC$$

donde:

TPR es el instante de iniciación promedio de un rayo ascendente en un pararrayos con dispositivo de cebado.

TPDC es el instante de iniciación promedio de un rayo ascendente en un pararrayos con dispositivo de cebado.

Las pruebas de evaluación del avance de cebado en un PDC, se realizan en el laboratorio de alta tensión simulando las condiciones naturales mediante la superposición de un campo permanente, que representa el campo ambiente existente en el momento de la tormenta, y de un campo de impulsos, simulando la aproximación del rayo descendente.

Posicionamiento de pararrayos con dispositivo de cebado.

Zona protegida: La zona protegida está delimitada por una superficie de revolución que está definida por los radios de protección correspondientes a las diferentes alturas  $h$  consideradas y cuyo eje es el mismo que el del PDC fig. 6.3.1

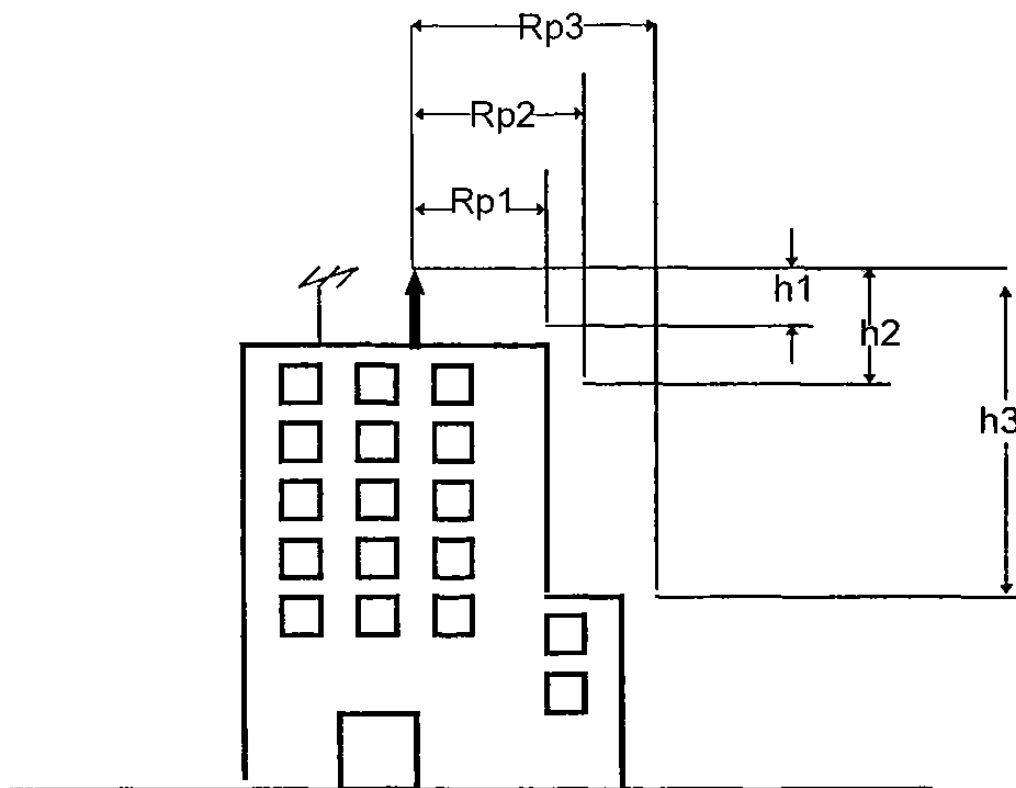


FIG. 6.3.1 Radios de protección.

Donde  $h$  es la altura de la punta del PDC, con relación al plano horizontal que pasa por el punto más alejado perteneciente al elemento a proteger.

RP es el radio de protección del PDC, para la altura considerada.

El radio de protección de un PDC depende de su altura ( $h$ ) en relación con la superficie a proteger, de su avance en el cebado y del nivel de protección elegido.

$$RP = \sqrt{2Dh - h^2 + \Delta L(2D + \Delta L)} \quad \text{para } h \geq 5 \text{ m}$$

RP es el radio de protección

$h$  es la altura de la punta del PDC en relación al plano horizontal que pasa por el vértice del elemento a proteger.

D: 20 m para el nivel de protección I

45 m para el nivel de protección II

60 m para el nivel de protección III  
 $\Delta L : \Delta L \text{ (m)} = v \text{ (m / } \mu \text{ seg)} \cdot \Delta t \text{ } \mu \text{ seg}$ , donde  $\Delta t$  es el avance en el cebado obtenido de las pruebas de laboratorio.

#### Elección y posicionamiento del PDC.

Para cada instalación de un sistema de protección contra el rayo, se realiza un estudio previo para determinar el nivel de protección requerido.

Seguidamente se determina el radio de protección RP necesario para la cobertura de la estructura, con la ayuda de la ecuación, para  $h \geq 5$  m o de las gráficas 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4 para  $h < 5$ , para los niveles de protección I, II, III. Cuando se utilizan las gráficas, se hallará el radio de protección RP eligiendo, dentro de la curva seleccionada, la altura  $h$  necesaria y el  $\Delta L$  del PDC considerado.

**Materiales y dimensiones :** Las partes del PDC por la que fluye la corriente del rayo serán de cobre, aleación de cobre, aleación de aluminio o acero inoxidable. La punta, al igual que el cuerpo de la punta, tendrá una sección conductora superior a 120 mm<sup>2</sup>.

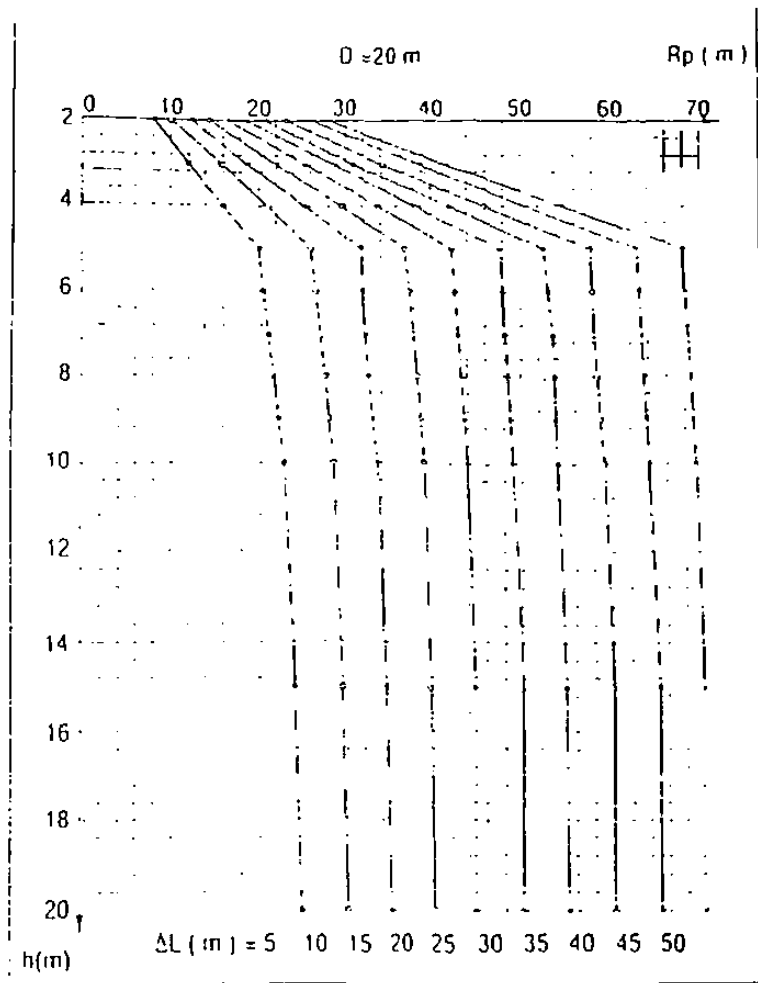
**Montaje :** La punta de un PDC debe estar situada al menos dos metros por encima de la zona que protege, incluyendo antenas, torres de enfriamiento, techos, depósitos. El conductor de bajada será fijado al PDC por medio de un sistema de conexión que se encuentre en el mástil. Este estará constituido por un dispositivo mecánico de adaptación que asegure un contacto eléctrico permanente. Aquellos PDCs que protejan zonas abiertas serán instalados sobre soportes específicos tales como postes de iluminación, pilares o cualquier otra estructura cercana que permita al PDC cubrir la zona a proteger.

**Conductores de bajada :** Los conductores de bajada están destinados a conducir la corriente del rayo desde los dispositivos de captación hasta las tomas de tierra. Se situarán en el exterior de la estructura, pero de no ser esto posible, el cable de bajada podrá ir dentro de un tubo destinado especialmente para tal efecto, que recorra la pared en toda su altura o sólo en parte.

**Número de bajantes :** Cada PDC estará unido a tierra por al menos una bajante. Serán necesarias al menos dos bajantes en los casos siguientes

- si la proyección horizontal del conductor es superior a su proyección vertical
- en el caso de instalaciones sobre estructuras superiores a 28 m.

Las bajantes deberán colocarse sobre dos fachadas distintas, siempre que esto sea posible. Ver fig. 6.3.5



GRAFICA.- 6.3.2

$D \text{ (m)}$ : Distancia de cebado o radio de la esfera ficticia

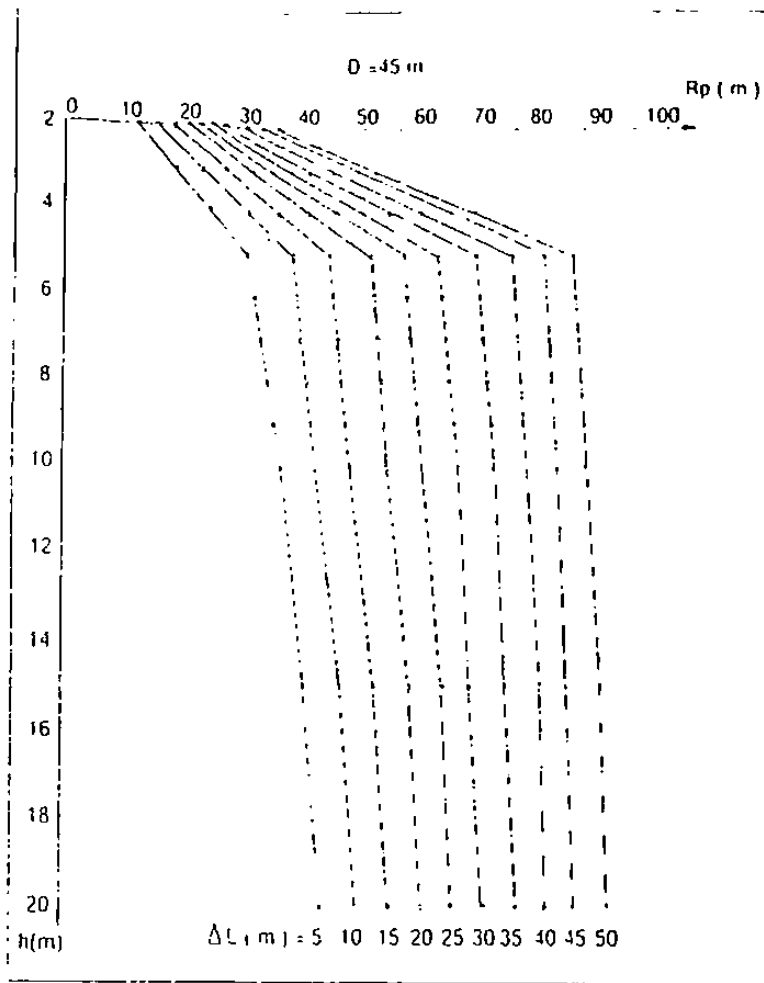
$\Delta L \text{ (m)}$ : Avance en el cebado del pararrayos considerado

$h \text{ (m)}$ : Diferencia de altura entre la punta del pararrayos y el plano horizontal considerado

$R_p \text{ (m)}$ : Radio de protección al nivel del plano horizontal considerado

**RADIO DE PROTECCIÓN DE PARARRAYOS CON DISPOSITIVO DE CEBADO  
NIVEL DE PROTECCIÓN 1**

$D \text{ (m)}$											
20											
$\Delta L \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
$h \text{ (m)}$	$R_p \text{ (m)}$										
20	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
25	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
30	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
35	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
40	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
45	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
50	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
55	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	
60	25 00	30 00	35 00	40 00	45 00	50 00	55 00	60 00	65 00	70 00	



GRAFICA.- 6.3.3

$D \text{ (m)}$ : Distancia de cebado o radio de la esfera ficticia

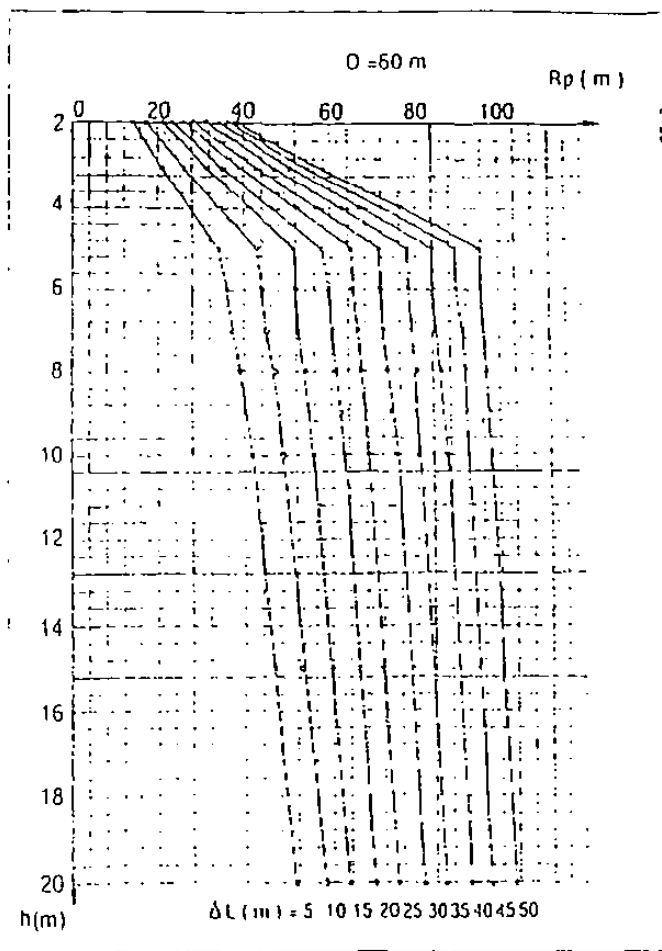
$\Delta L \text{ (m)}$ : Avance en el cebado del pararrayos considerado

$h \text{ (m)}$ : Diferencia de altura entre la punta del pararrayos y el plano horizontal considerado

$R_p \text{ (m)}$ : Radio de protección al nivel del plano horizontal considerado

**RADIO DE PROTECCIÓN DE PARARRAYOS CON DISPOSITIVO DE CEBADO  
NIVEL DE PROTECCIÓN 2**

$D \text{ (m)}$										
45										
$\Delta L \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$h \text{ (m)}$	$R_p \text{ (m)}$									
20	43.30	48.99	54.54	60.00	65.18	70.71	75.99	81.24	86.46	91.65
25	45.83	51.23	56.57	61.85	67.08	72.28	77.46	82.61	87.75	92.87
30	47.70	52.92	58.09	63.25	68.37	73.48	78.58	83.67	88.74	93.81
35	48.99	54.08	59.16	64.23	69.28	74.33	79.37	84.41	89.44	94.47
40	49.75	54.77	59.79	64.81	69.82	74.83	79.84	84.85	89.86	94.87
45	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00
50	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00
55	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00
60	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00



GRAFICA.- 6.3.4

$D \text{ (m)}$ : Distancia de cebado o radio de la esfera lítica

$\Delta L \text{ (m)}$ : Avance en el cebado del pararrayos considerado

$h \text{ (m)}$ : Diferencia de altura entre la punta del pararrayos y el plano horizontal considerado

$R_p \text{ (m)}$ : Radio de protección al nivel del plano horizontal considerado

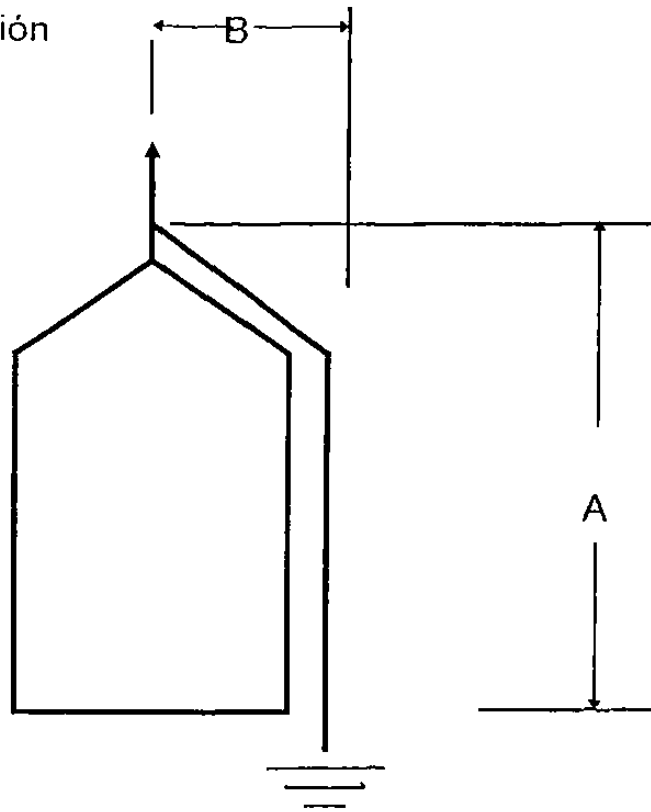
**RADIO DE PROTECCIÓN DE PARARRAYOS CON DISPOSITIVO DE CEBADO  
NIVEL DE PROTECCIÓN 3**

$D \text{ (m)}$										
60										
$\Delta L \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$h \text{ (m)}$	$R_p \text{ (m)}$									
20	51.23	57.45	63.44	69.28	75.00	80.62	86.17	91.65	97.08	102.47
25	54.77	60.62	66.31	71.94	77.46	82.92	88.32	93.67	98.99	104.28
30	57.66	63.25	68.74	74.16	79.53	84.85	90.14	95.39	100.62	105.83
35	60.00	65.38	70.71	75.99	81.24	86.46	91.65	96.82	101.98	107.12
40	61.85	67.08	72.28	77.46	82.61	87.73	92.87	97.98	103.08	108.17
45	63.25	68.37	73.48	78.58	83.67	88.74	93.81	98.87	103.92	108.97
50	64.23	69.28	74.33	79.37	84.41	89.44	94.47	99.50	104.52	109.54
55	64.81	69.82	74.81	79.84	84.85	89.86	94.87	99.87	104.88	109.89
60	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.00	105.00	110.00

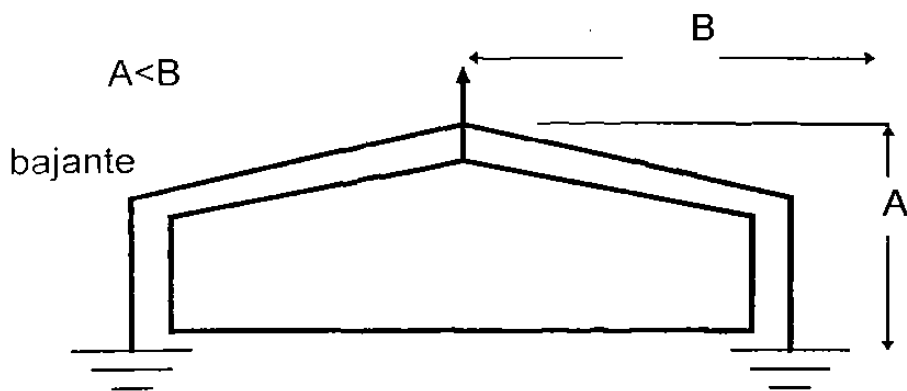
A: proyección  
vertical

B: proyección  
horizontal

bajante



$A > B$   
1



$A < B$

2

FIG. 6.3.5 NÚMERO DE BAJANTES.

## 6.4 PROTECCIÓN DE TANQUES ALOJANDO MATERIALES FLAMABLES.

Las estructuras usadas en el almacenamiento de líquidos y gases flamables prácticamente los autoprotege del golpe directo de las descargas atmosféricas. Pero una mayor protección que en mayor o menor grado les ayudaría a mejorar la seguridad de los mismos, sería la aplicación de varillas, mástiles y alambres aéreos.

La protección de estas estructuras y sus contenidos, contra la descarga, deben involucrar lo siguiente:

- El almacenamiento de líquidos y gases flamables en estructuras totalmente metálicas , esencialmente herméticas.
- La cerradura o protección de vapor o gas debe ser contra entradas de flama.
- El mantenimiento de los contenedores debe ser bueno y mantenerlo lejos de los potenciales de peligro.
- Evitar, hasta donde sea posible, la acumulación de mezclas de aire-vapor combustible sobre estas estructuras.
- Evitar la formación de chispas entre los conductores metálicos y los puntos donde pueda haber un escape o acumulación de gases o vapores flamables.
- La localización de estructuras no protegidas en lugares de menor exposición en vista de la descarga. Deberán evitarse las posiciones elevadas.
- En conexión con estructuras no protegidas, el establecimiento de zonas de protección a través de el uso de varillas de tierra, mástiles, o equivalentes.

La selección de conductores, tanto en materiales, formas y tamaños, así como los detalles de las terminales de aire, conductores de bajada, interconexión de las masas metálicas, las conexiones a tierra deberán cumplir con los reglamentos en vigor.

La experiencia que se ha tenido en la industria petrolera, recomienda el uso de hojas de acero de 3 /16 pulgadas de espesor, para la construcción de los tanques y recipientes de almacenamiento , hojas de acero de 3 /16 pulgadas de espesor son susceptibles de ser perforadas por el golpe directo de la descarga, por lo cual se recomienda se protejan con terminales de aire.

La zona de protección generada por el pararrayos o el mástil de material conductor, es un cono que depende de la altura desde la parte más alta del mástil, hasta la superficie de la tierra. Se considera un radio de protección de base HM igual a la altura del mástil o pararrayos, si el área a proteger es importante, y se considera de 2HM o más, si es menos importante.



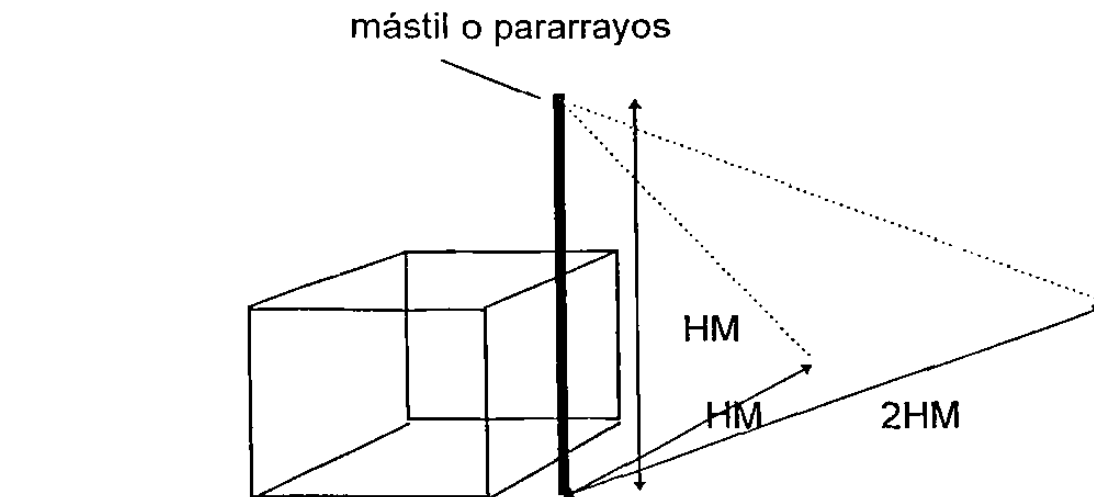


FIG. 6.4.1 CONO DE PROTECCIÓN DE UN CONDUCTOR VERTICAL.

Mástiles separados de la estructura que están protegiendo, estarán un mínimo de seis pies de la estructura protegida, y el claro deberá ser incrementado en un pie por cada diez de altura de estructura más grande que quince pies, para evitar el golpe lateral de la descarga. El mástil deberá estar perfectamente aterrizado y conectado a nivel de terreno al sistema de tierras de la estructura que protege. Donde sea posible, se podrá usar la tubería de agua enterrada que da servicio a la estructura como un conductor natural a tierra, pero si este acceso no es posible, un sistema de electrodos de tierra separado y diseñado para propósitos generales, deberá ser utilizado para aterrizar el mástil.

Aún en caso de este sistema de electrodos no estuviera accesible, la mínima separación entre el mástil y la estructura deberá incrementarse a 10 pies para resistencias de tierra de 10 ohms o menores.

La zona de protección de cables de tierra aéreos se considera como un prisma triangular. La mitad de la base del trozo de triángulo (HM) es igual a la altura del punto más bajo del alambre aéreo de tierra, si la estructura protegida es importante, y dos o más veces si esta es menos importante.

Los mástiles empleados pueden ser de madera, y con una terminal de aire colocada en la punta de éste. La terminal de aire se extenderá por no menos de dos pies sobre la punta del poste y conectarse a los electrodos de tierra. En caso de emplear cable metálico como retenida este podrá usarse como conductor de bajada. Para mástiles metálicos, la terminal de aire y el conductor de baja no son necesarios, pero los mástiles deberán ser aterrizados.

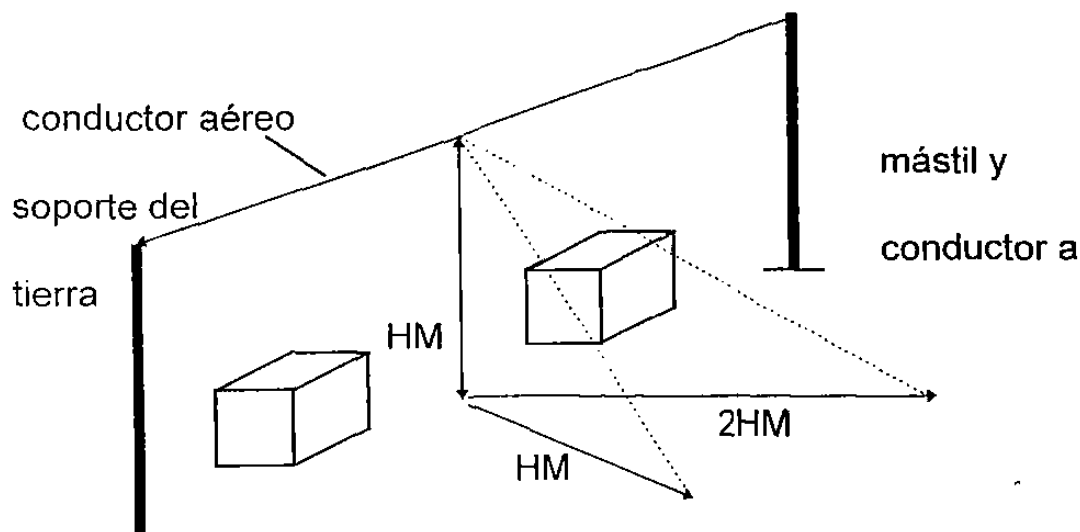


FIG. 6.4.2 ZONA DE PROTECCIÓN DE UN CONDUCTOR DE TIERRA AÉREO.

### 6.5 DISEÑO DE LAS TERMINALES DE AIRE.

Las terminales de aire deberán sujetarse al techo de la estructura, puntas de mástiles por medio de una base adecuada, y atornillada firmemente. El área de la sección transversal de la base deberá ser al menos equivalente al área de la sección transversal del conductor en ese punto.

Las terminales de aire deberán tener al menos el equivalente en peso y dureza al de un tubo de cobre que tiene un diámetro externo de 5 /8 pulgada y un espesor igual al # 20 AWG (0.032 pulgadas).

Las terminales de aire pueden ser de cualquier forma, de sección sólida o tubular.

La altura de las terminales de aire deberán estar a cuando menos diez pulgadas sobre el objeto a proteger.

La construcción de las terminales de aire empleará materiales que soporten la degradación por corrosión debido al medio ambiente.

Cuando las partes del sistema de protección se encuentren sujetas a daños mecánicos éstas deberán protegerse con una cubierta o tubo hechos de madera o de algún otro material no conductor, si se emplea tubería metálica para proteger el cable, éste deberá ser conectado eléctricamente en ambas terminales del tubo.

**Localización de las terminales de aire :**

En el caso de salientes no metálicas, como torres chimeneas y ventiladores las terminales de aire deberán anclarse al objeto que van a proteger sin separarse más de dos pies del mismo.

A lo largo de caballetes, parapetos y salientes de techos planos las terminales de aire se colocarán espaciadas en intervalos que no excedan de 25 pies para puntas de 24 pulgadas de longitud o más grandes.

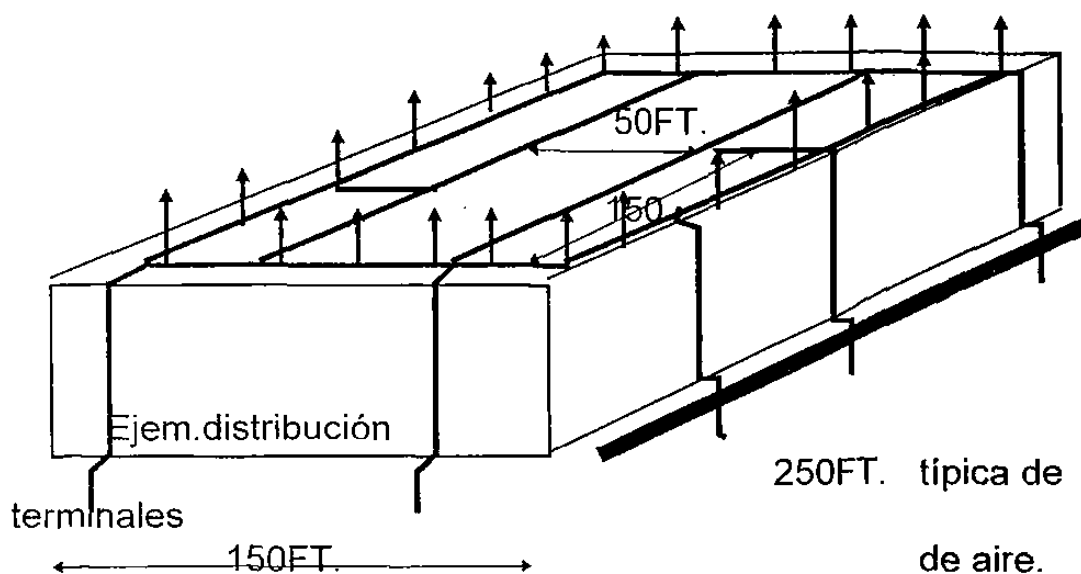
Para menos de 24 pulgadas se recomienda recortar los espaciamientos.

Los salientes metálicas y partes del edificio como ventiladores, chimeneas, y otros objetos que están sujetos a descargas, pero que no les resultan en daños graves deberán llevar una terminal de aire, que será conectada al conductor del pararrayos con un material metálico del mismo peso por unidad de longitud que el conductor principal.

Recorrido de los conductores: Los conductores correrán a lo largo del techo, bajarán en las esquinas y por los lados del edificio de tal forma que traten de constituir algo cercano a una red que encierre el edificio. Los conductores correrán a lo largo del perímetro, de los parapetos, y salientes del plano del techo y serán conectados a formar una malla cerrada.

Obstrucciones : Conductores horizontales correrán alrededor de chimeneas, ventiladores y obstrucciones similares en un plano horizontal y sin vueltas abruptas.

No se permiten curvar los conductores cuando abrazan una porción del edificio tal como en un alero, deberá tener un radio de cuando menos 8 pulgadas. El ángulo en cualquier vuelta no deberá exceder los 90 grados y los conductores mantendrán, de ser posible trayectorias rectas.



## 6.6 ÁREA DE PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS ALTAS.

La zona de protección es el espacio localizado por la proyección del área de un cono que se genera desde la parte más alta de la terminal de aire, con un cierto ángulo, con respecto del plano de la tierra.

Para estructuras que no exceden de los 7.6 m. de altura su zona de protección se determina por un cono formado por la relación dos a uno.

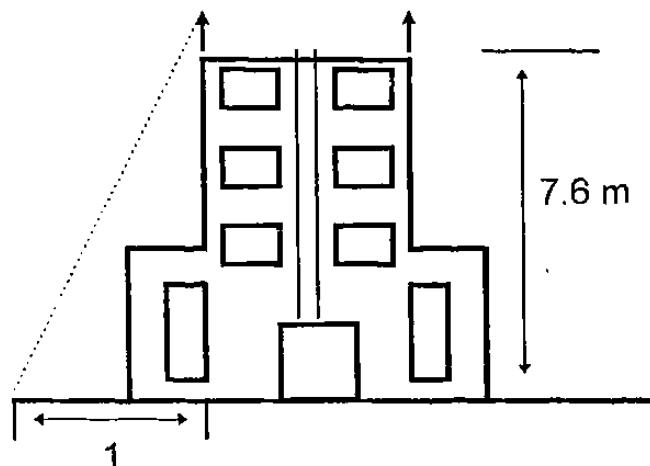


FIG 6.6.1 Cono de protección estructuras de no más de 7.6 m

Estructuras mayores que 7.6 m pero que no exceden de 15 m la zona de protección la determina un cono formado por la relación 1 a 1.

La zona de protección para estructuras mayores a 15 m pero que no excedan de 30 m , es el espacio localizado bajo la superficie de una esfera de 45 m de radio, cuando es tangente a la tierra y está descansando en la punta de la terminal de aire del sistema.

## 6.7 CONDUCTORES DE BAJADA.

Los conductores de bajada deberán colocarse lo más separados posible y de preferencia diagonalmente opuestos. Para la colocación de los conductores de bajada es necesario considerar desde la localización de las terminales de aire, tamaño de la estructura , la trayectoria más directa, localización de las tuberías de aguas y donde las condiciones de las tierra sean más favorables.

Deben colocarse no menos de 2 conductores de bajada y sus respectivas tierras, se instalarán en cualquier clase de estructura, incluyendo torres de campanarios, excepto donde sea permitido un solo conductor de bajada.

Estructuras que tienen perímetros que excedan los 250 pies , deberán llevar un conductor de bajada adicional por cada 100 pies ó fracción de perímetro.

Cuando determine el perímetro de una estructura, mida solamente el perímetro del área del techo que requiere protección, techos bajos o proyecciones que están bajo una zona de protección , deben ser excluidos.

Estructura de forma irregular puede necesitar conductores de bajada adicionales para proveer un camino doble a tierra por cada terminal de aire.

Conductores de bajada que están a lo largo o dentro de columnas de concreto reforzadas con acero o en columnas de acero deben estar conectadas al fierro de refuerzo o a las columnas de acero en ambos extremos. En el caso de que las columnas sean muy largas, se necesitarán conexiones adicionales en intervalos que no sobrepasen los 60 metros. Estas conexiones deben ser hechas con conectores aprobados o soldando. Estos conductores deben estar atados a la estructura por lo cual corren en intervalos de no más de un metro. Las abrazaderas que sujetan los conductores a la estructura deben fijarse usando clavos, tornillos....

El material de la abrazadera debe ser igual que el del conductor, no ser quebradizo y soportar las corrosión. No se debe usar una combinación de materiales que cause una junta electrolítica que en presencia de humedad puede acelerar el proceso de oxidación.

Protegiendo conductores de bajada: Conductores de bajada que se encuentren en escuelas, entradas de vehículos, pistas de aterrizaje, áreas de ganado, veredas públicas y áreas similares, deben estar protegidos para evitar daños físicos o movimiento. Si el conductor está protegido dentro de un conduit metálico, entonces el conductor debe tener un punto de unión al

final y al principio con el conduit, estos conductores deben estar protegidos en una distancia mínima de 1.8 m sobre el nivel de la tierra.

## 6.8 TERMINALES DE TIERRA.

Cada conductor de bajada debe finalizar en una terminal de tierra de preferencia esta sería la tubería metálica de agua o cualquier otra estructura grande metálica enterrada.

La conexión a tierra será hecha en todo caso en forma cuidadosa y permanente, y con la debida consideración al carácter del suelo que la circunda.

Donde una tubería metálica de agua entra al edificio una terminal de los conductores de bajada, podrá conectarse ahí, de preferencia en un punto inmediatamente fuera de la cimentación de los muros.

No se debe conectar a tuberías de agua de plástico o de algún otro material no conductor.

Electrodos de tierra en suelos profundos : Cuando el suelo es lo suficientemente profundo, se pueden colocar electrodos artificiales de tierra en forma de tubos, varillas o el mismo conductor metido en la tierra a una distancia no menor a 10 pies.

Cuando el suelo es poco profundo para manejar varillas de 10 pies, o si el terreno contiene mucha arena, grava o roca , podrán utilizarse placas o mayor longitud de conductor enterrado. En caso de que la cama de rocas este muy cerca de la superficie, la conexión a tierra puede hacerse cavando zanjas o trincheras circundando el edificio y enterrando en ellos las colillas de las terminales de los conductores de bajada.

Donde el suelo es muy seco o no se permita excavar a una profundidad de un pie, junto con los conductores colocados radialmente, un conductor similar deberá enterrarse de tal modo que encircule la estructura a ser protegida y conectar todos los conductores de bajada juntos.

Una apropiada conexión a tierra es esencial para que funcione adecuadamente el sistema de protección de pararrayos y cada esfuerzo será dirigido a proveer un amplio contacto con la tierra.

Esto no significa que la resistencia de un contacto a tierra tenga que ser baja, sino más bien que la distribución de metal en la tierra o en la superficie en casos extremos, será tal que permita disipación de una descarga del rayo sin causar daños.

Una baja resistencia de contacto a tierra es deseable, por supuesto, pero no necesaria, puede presentarse un caso extremo en el que un lado del edificio esté cimentado sobre terreno suave y arcilloso, y el otro lado esté cimentado sobre roca. En el primer caso, si la resistividad del terreno es normal, estará entre 200 a 5 000 ohms -centímetro la resistencia de la conexión a tierra hecha con un conductor de 10 pies de longitud enterrado,

será de 20 50 ohms, pero la experiencia dice que esta resistencia no tendrá problemas para disipar la energía de una descarga sin causar daños graves.

Las varillas de conexión a tierra no deberán tener menos de 2.4 metros de largo y 12.7 milímetros de radio y pueden ser de fierro recubierto electrolíticamente de cobre o de acero inoxidable.

No usar los electrodos de tierra del sistema de distribución eléctrica, sin embargo, estas deben estar conectados entre sí.

Todas las terminales de tierra deben estar unidas entre sí formando una malla y esta estar unida al sistema de tierras del edificio.

# CAPÍTULO 7.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 7.1 CONCLUSIONES

Una vez revisado en contenido de este texto, podemos resumir lo siguiente:

Los sistemas eléctricos de distribución o de potencia todo el tiempo se ven expuestos a los fenómenos del sobrevoltaje en sus diferentes formas de presentación, ya sea estática, por resonancia, por switcheo, por descargas atmosféricas y demás, pero esto no excluye a nuestros modernos equipos electrónicos que son bastante sensibles a este problema, y que de resultar dañados, los costos que representan son muy elevados, por lo que es muy importante tener en cuenta que la protección adecuada de los mismos redundará en un diseño confiable, duradero y al menor costo posible.

En el caso de los sistemas de distribución o de potencia, la protección de los equipos contra las sobretensiones debe tener en cuenta, el valor del voltaje de operación normal y en función de este hacer una adecuada selección de los apartarrayos, que serán los dispositivos de protección, considerando las reglas a seguir dadas en este escrito. Designar o calcular el lugar más adecuado de colocación de estos dispositivos, que como regla práctica, hemos llegado a considerar, que, la mejor colocación de los apartarrayos es estando lo más cerca posible del equipo que se va a proteger.

Junto con esto debe diseñarse un adecuado sistema de tierras, sobre todo en subestaciones de potencia, donde las corrientes generadas por los sobrevoltajes son generalmente elevadas, y pueden causar algún daño grave al personal que opera en la subestación. Y un adecuado y correcto diseño, selección e instalación del sistema de tierras, aunado a la correcta selección de los apartarrayos, como dispositivos derivadores de la sobretensión, traerá consigo una operación continua y duradera de la subestación, pero sobre todo que el personal estará adecuadamente protegido.

En cuanto a los sistemas electrónicos, es increíble el número de veces que en una semana, nuestro sistema puede estar expuesto a sobrevoltajes de diferente naturaleza por lo que una adecuada selección de los equipos de protección para estos aparatos sensibles, nos dará como resultado una continuidad en el servicio, evitará la destrucción de los mismos y/o la pérdida de información que se pudiera tener almacenada.



## 7.2 RECOMENDACIONES:

En cualquiera de los casos, ya sean sistemas eléctricos de distribución o de potencia, o los sistemas electrónicos sensitivos, existe ya una serie de reglas que debemos tratar de cumplir al pié de la letra. Esto quiere decir que en el caso de nuestro país existe un Código Nacional Eléctrico, en forma genérica se le llama Norma Oficial Mexicana (NOM) para el uso de la energía eléctrica, el cual siempre deberá ser consultado al momento de diseñar, calcular e instalar sistemas eléctricos.

Sin despreciar las recomendaciones que los mismos fabricantes de los equipos nos proporcionan en los manuales de instalación y mantenimiento de los mismos.

## BIBLIOGRAFÍA.

- NOM 001                   SEMP 1994 INSTALACIONES  
DESTINADAS AL SUMINISTRO Y USO  
DE LA ENERGIA ELECTRICA
- I.E.E.E.                    INSTITUTE OF ELECTRICAL AND  
ELECTRONICAL ENGINEERS STD. 1100-  
1992.POWERING AND GROUNDING  
SENSITIVE ELECTRONIC EQUIPMENT
- I.E.E.E.                    RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA  
ATERRIZAR SISTEMAS DE POTENCIA  
INDUSTRIALES Y COMERCIALES. STD.  
142-1982.
- N.F.P.A.                   NATIONAL FIRE PROTECTION  
ASSOCIATION. N.E.C. 70 1996.
- SIEGERT C. LUIS A.        ALTA TENSIÓN Y SISTEMAS DE  
TRANSMISIÓN.  
LIMUSA 1988.
- BEEMAN DONALD          INDUSTRIAL POWER SYSTEM  
HANDBOOK.  
MC. GRAW HILL 1955.

DATOS BIOGRÁFICOS.

EGRESADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN EN JUNIO DE 1972.

TITULADO EN LA CARRERA DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA.

TÉSIS DE RECEPCIÓN : FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS A UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA TIPO WANKEL. PRESENTADA EN OCTUBRE DE 1972.

DESDE JUNIO DE 1971 COMENCÉ A LABORAR EN LA MISMA FACULTAD COMO AUXILIAR TÉCNICO EN EL DEPTO. DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, Y ES AHÍ DONDE NACE EL INTERÉS POR ESTUDIAR LOS DIFERENTES TÓPICOS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA.

EN 1973 INGRESÉ A LA PLANTA DE MAESTROS DE LA FACULTAD, DONDE LABORO A LA FECHA.

EN LA MISMO AÑO LABORÉ EN UNA EMPRESA LLAMADA TAPONES DE MÉXICO S.A. DE C.V. DESEMPEÑÁNDOME COMO JEFE DE PLANTA.

LABORÉ EN DIFERENTES PERÍODOS EN DICOMSA INGENIERÍA S.A. COMO DISEÑADOR DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

DESARROLLANDO EL MISMO TRABAJO, CON ARMOR INGENIERÍA S.A.

HE DESARROLLADO SERVICIOS PERICIALES EN EL ÁREA DE ELECTRICIDAD EN LA AGENCIA DEL MINISTERIO PÚBLICO ADSCRITA AL MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS GARZA NUEVO LEÓN.

ASESOR TÉCNICO EN LA SECRETARÍA DEL TRABAJO DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

DE 1990 A 1997 LABORÉ COMO JEFE DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE LA F.I.M.E.

ACTUALMENTE ASESOR EN EL PROYECTO DE AHORRO DE ENERGÍA DE LA U.A.N.L.

EGRESADO EN 1973 DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA DE LA UANL.

TITULADO DE LA CARRERA DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA.

TESIS PRESENTADA PARA TITULACIÓN : EL ANALIZADOR DE TELEVISIÓN.

TRABAJADOR EN LA FIME DESDE SEPTIEMBRE DE 1971. INICIÁNDOME COMO AUXILIAR TÉCNICO EN EL DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

DESEMPEÑE EL PUESTO DE JEFE DE ACADEMIA DEL DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DESDE SEPTIEMBRE DE 1984 HASTA MARZO DE 1988.

LABORÉ COMO MAESTRO EN EL CBTIS # 74 DESDE MARZO DE 1981 HASTA SEPTIEMBRE 1985

SOY MAESTRO DE TIEMPO COMPLETO EN LA FIME DESDE MAYO DE 1982 A LA FECHA.

ACTUALMENTE ESTOY LABORANDO EN EL PROYECTO DE AHORRO Y ENERGIA DE LA UANL.

TAMBIEN ACTUALMENTE DESEMPEÑO EL PUESTO DE JEFE ACADEMICO DEL DEPARTAMENTO DE MAQUINAS ELECTRICAS EN FIME.

CUENTO CON LA DICHA DE TENER A MI LADO A MI ESPOSA MARIA EUGENIA Y A MIS HIJOS SILVIA EUGENIA Y ARTURO JAVIER CON QUIENES HE COMPARTIDO GRAN PARTE DE MI VIDA PROFESIONAL.

TAMBIEN CUENTO CON EL CARIÑO Y APOYO DE UN FAMILIAR MUY QUERIDO, MI TIA GODFREY

