

T-UES  
1504  
CH532a  
1999  
Ej. 1

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**“Estudio de los Fenómenos Electromagnéticos Provocados por Descargas Atmosféricas en Sistemas de Bajo Voltaje ( $v < 1000$  voltios) en El Salvador”**

**TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:**

**HECTOR ANTONIO CHICAS MORAGA**

**PARA OPTAR AL TITULO DE:**

15101196  
15101196

**INGENIERO ELECTRICISTA**



4638

**CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 1999**

*Recibido el 7 de agosto / 99*

# UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

## AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR:

**DR. JOSÉ BENJAMIN LÓPEZ GUILLEN**

SECRETARIO GENERAL:

**LIC. ENNIO ARTURO LUNA**

## FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

**ING. JOAQUIN ALBERTO VANEGAS AGUILAR**

SECRETARIO:

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUIN HERNANDEZ**

## ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

**ING. JOSÉ ROBERTO RAMOS LÓPEZ**

SECRETARIO:

**ING. GERARDO MARVIN JORGE HERNÁNDEZ**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**“Estudio de los Fenómenos Electromagnéticos Provocados por  
Descargas Atmosféricas en Sistemas de Bajo Voltaje ( $v < 1000$   
voltios) en El Salvador”**

PRESENTADO POR:

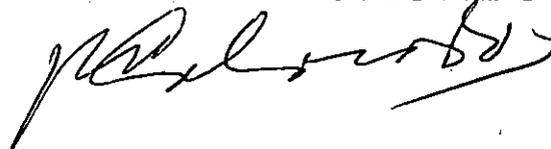
**HECTOR ANTONIO CHICAS MORAGA**

COORDINADOR:

**ING. JOSÉ ROBERTO RAMOS**

ASESOR:

**ING. RICARDO COLORADO**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 1999**



TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

COORDINADOR:

  
ING. JOSÉ ROBERTO RAMOS

ASESOR:

ING. RICARDO COLORADO



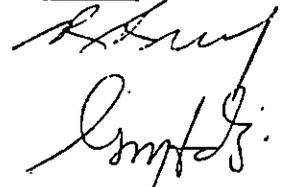


ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 27 de julio de 1999 en el local de Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las diecisiete horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

- 1- Ing. José Roberto Ramos López  
Director
- 2- Ing. Gerardo Marvin Jorge Hernández  
Secretario

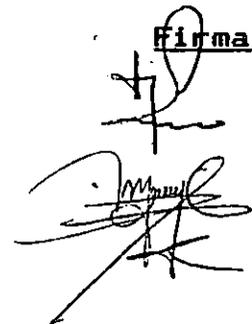
Firma



Y con el Honorable Jurado de evaluación integrado por las personas siguientes:

- 1- Ing. Armando Moisa
- 2- Ing. Armando Martínez Calderón

Firma



Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

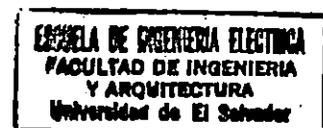
"Estudio de los Fenómenos Electromagnéticos Provocados por Descargas Atmosféricas en Sistemas de Bajo Voltaje ( $V < 1000$  voltios) en El Salvador"

A cargo de los Bachilleres:

CHICAS MORAGA, HECTOR ANTONIO

Habiendo obtenido el presente trabajo una nota final, global de 8.0

( OCHO PUNTO CERO )



## **AGRADECIMIENTOS:**

- A dios todopoderoso por haberme permitido culminar con mi carrera.
- A mi padre José Carlos Moraga por haberme brindado todo su apoyo económico y moral para finalizar este triunfo obtenido.
- A mi madre Delmi Guadalupe Chicas por haberme brindado todo el apoyo y cariño durante todos los logros académicos obtenidos y guiarme por el buen camino.
- A mis hermanos Carlos Humberto y Teresa de Jesús por brindarme sus apoyos incondicionales durante mis estudios.
- A mi hermana Dora Alicia (Q.D.D.G.), que aunque ya no esta con nosotros en vida, pero igual va por ti hermana.
- Agradezco también a mis amigos que me ayudaron para la elaboración de este documento (Raúl Pineda, Don Salvador Posada, Max, Arturo y a maestros de la E.I.E. que me ayudaron y alentaron a seguir adelante).
- Y en general agradezco tanto a mis padres como a mis hermanos y además les doy las gracias muy sinceras por este triunfo obtenido que también es de ellos.

## PREFACIO

Los efectos secundarios que una tormenta eléctrica causa en las redes primarias y secundarias son muy pocos conocidos en El Salvador. Los equipos sufren fallas con mucha frecuencia cuando están bajo la influencia de una tormenta eléctrica, las fallas sufridas (de los equipos) raras veces son asociadas con estos efectos producidos, se conoce la falla del equipo, pero se desconoce él por que del fallo ó su causa. Muchas de las empresas poseen sistemas de protección contra disturbios instalados muy modernos y algunos de ellos muchas veces no responden cuando se les demanda, es entonces cuando los equipos se dañan, sufriendo la mayor parte de daños los equipos con características muy sensibles a disturbios de naturaleza transitoria, dando por consecuencia el quedar fuera de servicio en forma permanente o temporal, dependiendo que tan severo haya sido el daño ocasionado.

La decisión de investigar acerca de este fenómeno atmosférico junto con sus efectos secundarios arrastrados por la tormenta eléctrica, se da por el desconocimiento que se tiene sobre este fenómeno natural, por la razón antes expuesta, es que se dio la necesidad de realizar tal investigación, además de la recopilación de información necesaria para conocer más de los diferentes fenómenos a los que se expone él ó los equipos cuando se encuentran funcionando bajo tales condiciones atmosféricas. Este documento contiene en su primer capitulo toda la información pertinente sobre la teoría del rayo, el mecanismo de descensos de las descargas, los mecanismos de los choques, así como aparatos utilizados para las mediciones de estos, cubriendo desde el klidonógrafo que fue el primer aparato construido para este propósito hasta los más sofisticados equipos como el dispositivo identificador de tormentas eléctricas (ESDI). Además se cubre información sobre los diferentes dispositivos usados para la captación de rayos tales como pararrayos aéreos tipo puntas franklin y los pararrayos con dispositivos de cebado.

En el segundo capitulo se aborda información sobre todos los efectos secundarios que van acompañados con la tormenta eléctrica, todos estos efectos que han sido investigados son de carácter electromagnético específicamente. Existen otros fenómenos que acompañan a la descarga eléctrica, pero no son parte de los objetivos perseguidos ya que pertenecen a otros tipos de radiaciones.

En el tercer capitulo de la investigación cuenta con información sobre las normas elaboradas por organismos internacionales que ayudan a reducir mucho los daños de los efectos secundarios que arrastra la tormenta eléctrica. Se incluyen normas para el uso de pararrayos tipo puntas franklin, normas para la protección de equipo electrónico sensible a los disturbios de naturaleza electromagnética tal es el caso de equipos de computo, sistemas de telecomunicaciones y otros equipos con características de construcción muy delicadas a cualquier variación generada en la red de alimentación debido a causas de origen atmosféricas.

Por lo tanto, estas normas se han elaborado con la finalidad de cuidar y proteger a los equipos antes mencionados, no olvidando que deben de proteger en primer plano al usuario de ellas, y a la vez recordar siempre que no existe equipo de protección capaz de contrarrestar en un 100% la descarga de los impactos directos, si no atenuarlos lo mayormente posible (un rayo), por que este sigue siendo un fenómeno de muy difícil predicción y poseedor de una gran cantidad de energía. La norma que mejor trata este fenómeno es la C62.41 - 1991, en la cual se hace un mejor estudio y más concienzudo sobre este fenómeno natural.

El trabajo de campo hecho, se usa con la finalidad de encontrar cual falla es más frecuente en los equipos electrónicos sensibles a disturbios, y cual de estos equipos (de computo, de telecomunicaciones, cajeros automáticos, etc.) son los que más daños sufren por este fenómeno climático muy intenso y además cual de los fenómenos producidos es el que más se produce durante la tormenta eléctrica. De la investigación de campo realizada, se ha encontrado que los fenómenos secundarios que más se producen cuando la descarga de un rayo ocurre, son los impulsos electromagnéticos y los impulsos electrostáticos, aunque debe de recordarse que los otros dos efectos se dan por añadidura de los anteriores. El decir cual de ellos se da con mayor frecuencia, lo expresan los datos recogidos de las encuestas pasadas las empresas consultadas.

Tomando en cuenta los datos obtenidos en las encuestas y asociándolos con los efectos producidos por las descargas de los rayos, entonces podemos afirmar de la veracidad de los datos obtenidos. Las gráficas presentadas muestran los resultados obtenidos del estudio de campo, en ellas se puede observar tanto la cantidad de equipos electrónicos que poseen las empresas (en porcentajes), así como cuales de ellos sufren daños con una frecuencia mayor y si estos se dan bajo una tormenta eléctrica (tanto la producción de fallas como también la estación del año) y sin olvidar el tipo de falla más común que ocurre.

Al final del documento se incluyen un ejemplo del uso de la norma NFC - 102 aplicándolo al edificio de administración académica central, en la cual después de haber hecho los cálculos de rigor que ofrece la norma, se obtuvo que existe la necesidad de instalar un pararrayos o una punta franklin en el edificio. También se anexarán algunos textos de interés.

# INDICE

## CAPITULO I

1- EL RAYO.....	1
1.1- DEFINICION DEL RAYO.....	1
1.2- COMO SE FORMAN LOS RAYOS.....	2
1.3- CARACTERISTICAS DE LOS RAYOS.....	5
1.4- VALORES NUMERICOS ESTIMADOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.....	6
1.5- COMO EVOLUCIONAN LAS DESCARGAS.....	7
1.6- ACUMULACION DE LAS CARGAS.....	8
1.7- DISTRIBUCION DEL CAMPO Y LA CARGA.....	9
1.8- MECANISMOS DE LAS DESCARGAS.....	10
1.9- INICIO DEL LIDER.....	10
1.10-MECANISMO DE CHOQUES DE LOS RAYOS.....	13
1.11-EQUIPOS PARA LA MEDICION Y DETECCION DE RAYOS.....	15
1.11.1- EL KLIDONOGRAFO.....	16
1.11.2- OSCILOGRAFO DE RAYOS CATODICOS.....	18
1.11.3- EL FULCONOGRAFO.....	19
1.11.4- LA CAMARA DE BOYD.....	20
1.12-DISPOSITIVOS AEREOS DE PROTECCION CONTRA EL RAYO.....	22
-PUNTAS FRANKLIN.....	23
-PARARRAYOS CON DISPOSITIVOS DE CEBADO.....	25

## CAPITULO II

2- EFECTOS QUE CAUSAN LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.....	26
2.1- EFECTOS DIRECTOS.....	26
2.2- EFECTOS SECUNDARIOS.....	27
PULSOS ELECTROMAGNETICOS.....	27
PULSOS ELECTROSTATICOS.....	29
CORRIENTES DE TIERRA.....	30
CARGAS LATENTES.....	31
2.3- EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LAS LINEAS SECUNDARIAS.....	32

## CAPITULO III

3- NORMAS INTERNACIONALES PARA LA PROTECCION DE EDIFICACIONES Y EQUIPOS ELECTRONICOS DE GRAN SENSIBILIDAD A FENOMENOS ELECTROMAGNETICOS.....	35
3.1- NORMA NFC – 102.....	38
3.2- NORMAS PARA LA PROTECCION DE DISTURBIOS EN SISTEMAS SECUNDARIOS.....	39
- ANSI/NFPA 75 – 1992.....	40
- IEEE/NFPA 141 – 1991.....	40
- IEEE/STD 1100 – 1992.....	41
- ANSI/NFPA 780 – 1992.....	42
- IEEE/NFPA 142 – 1991.....	42
- UL 497 – 1991.....	43
- IEEE STD C62.41 – 1991.....	43

## CAPITULO IV

4- DESARROLLO DEL TRABAJO DE CAMPO.....	53
4.1- DESARROLLO DE LA ENCUESTA.....	54
4.2- SELECCION DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	55
4.3- TABULACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION RECOPIlada.....	57
CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFIA.....	66
ANEXOS	
- CALCULO DE PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS USANDO LA NORMA FRANCESA NFC – 102	
- MAPA DE NIVELES ISOCERAUNICOS	
- ANEXO (A) DE LA NORMA NFC-102	

## LISTA DE GRAFICOS

GRAFICO		PAGINA
1	Porcentajes de empresas a encuestar.....	58
2	Cantidad de encuestas recibidas para el estudio realizado.....	59
3	Clases de equipos que poseen las empresas.....	59
4	Frecuencia de daños vrs. porcentaje de ocurrencia de fallas.....	60
5	Muestra la mayor ocurrencia de fallas durante una tormenta eléctrica.....	61
6	Diferentes tipos de equipos de protección instalados en las empresas encuestadas.....	62

## LISTA DE TABLAS

TABLAS		PAGINA
1	Porcentajes de corrientes en pararrayos de distribución por tipos de circuitos.....	6
2	Parámetros de las descargas atmosféricas.....	7
3	Sumario de estándares aplicables y formas de ondas adicionales por categorías de localización A, B y C.....	49
4	Distribución de voltajes y corrientes, utilizando una onda estándar para categorías tipo A y B (100 Khz, 0.5 $\mu$ seg.).....	49
5	Distribución de voltajes y corrientes esperadas en categorías tipo A y B, se usa una onda combinada estándar (1.2/50 – 8/20) $\mu$ seg....	50
6	Energía depositada en dispositivos en cascada con 3 Kamp. De onda como fuente de disturbio.....	52

# CAPITULO I

## EL RAYO

### 1.1 DEFINICION DEL RAYO

El rayo es una gigantesca chispa eléctrica de gran magnitud que viaja entre la nube de tormenta y la tierra o entre las nubes mismas. Los niveles de energía que estas nubes de tormenta generan en una descarga eléctrica, siempre han sido difíciles de comprender, pero aún así los investigadores en este campo han persistido en estudiar y encontrar como este fenómeno natural se desarrolla, sus esfuerzos no ha sido en vano por que han logrado un gran avance en su estudio. Han encontrado que una única descarga del rayo puede alcanzar o ser capaz de generar miles de amperios (30,000 amperios o más) y además generar potenciales de unos 200 millones de voltios (siendo este un valor promedio) entre la nube de tormenta y tierra, y tener lugar en un tiempo aproximado de 0.033 microsegundos. [1 ]

En el área de potencia eléctrica, de la mayoría es del conocimiento que un cortocircuito en la línea de distribución interna en nuestros hogares y en la industria que sobrepase los 15 amperios puede iniciar rápidamente un incendio, ahora comparando estos niveles de corrientes y valores de voltajes generados respectivamente de 2000 y 100,000 veces del circuito promedio, es razón suficiente para que una descarga del rayo produzca daños cuantiosos en las redes primarias, secundarias o donde la descarga tenga lugar. Tomando en cuenta la intensidad de la descarga generada en la nube de tormenta, las descargas de los rayos están comúnmente diferenciadas como descargas **frías** o **calientes**. La diferencia entre ambos tipos de descarga está en la cantidad de potencia generada y la que disipan, el tiempo también determina el tipo de descarga ocurrida en el proceso de disipación. [2 ]

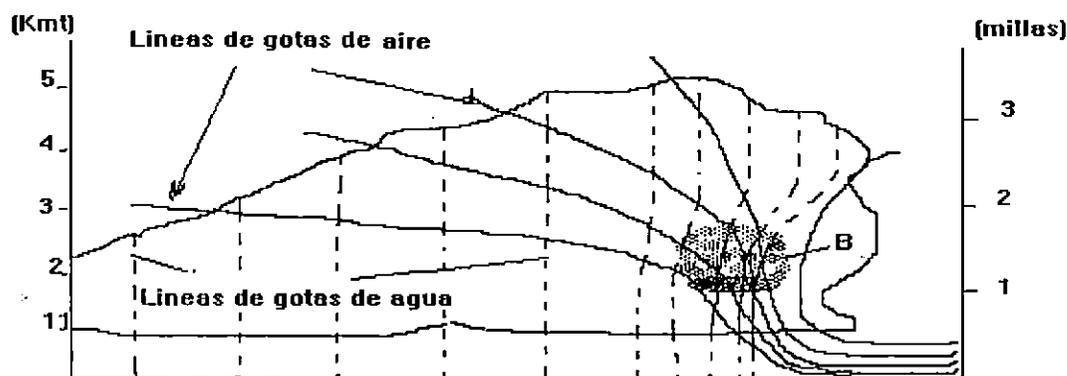
Los rayos que se caracterizan como *calientes* tienen altos valores de corrientes y largos tiempos de duración, de esta manera fácilmente encienden los materiales combustibles y provocar daños en el sitio donde tubo lugar la descarga del rayo. Los rayos catalogados como *fríos* por lo contrario a los *calientes* se caracterizan por bajos valores de corriente, altos valores de voltajes y cortos tiempos de duración; produciendo de esta forma los violentos efectos de rompimientos. Muchos destellos de los rayos consisten de múltiples descargas, haciendo entonces de este fenómeno natural uno con una grande y poderosa fuerza destructiva. El efecto secundario que precede a la descarga es conocido bien conocido como *trueno* (Estampido que acompaña al relámpago), que no es mas que la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande muy rápidamente. [3]

El aire en el canal de la descarga (diámetro aproximado del canal de un centímetro a varios decímetros) se calienta y se expande en forma de una onda de choque, posteriormente esta onda de choque se vuelve energía acústica produciendo así el *trueno*. Conociendo ahora que es un rayo y lo poderosamente destructivos que estos pueden ser, estudiaremos todos los mecanismos que acompañan a este fenómeno y que están íntimamente relacionados.

## 1.2 COMO SE FORMAN LOS RAYOS

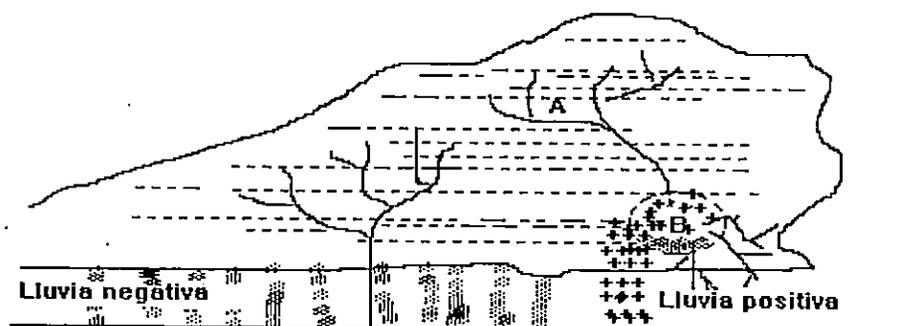
Existe un gran interés en todas las áreas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en descubrir como las cargas eléctricas se forman en las nubes de tormenta. La pregunta es aún controversial dado la dificultad de su análisis. Varias teorías sobre la formación del rayo han sido propuestas hasta la fecha, estas teorías corresponden a las escritas por los investigadores *C. T. R. Wilson* y *G. C. Simpson*, recibieron una mayor aceptación. Las teorías recientemente desarrolladas sobre el tema de las descargas atmosféricas, están basadas en las presentadas por estos dos investigadores. Ambas teorías postulan que las corrientes de aire ascienden por convección (transmisión del calor de los cuerpos en movimiento), y que además existe movimiento relativo de las gotas de lluvia, las cuales tienen medidas o diámetros diferentes. [1]

La teoría de Wilson depende de estas aplicaciones y sobre la presencia de una gran cantidad de número de iones en la atmósfera. La teoría de *G. C. Wilson* ha sido sustentada en parte por experimentos de laboratorio, esta teoría ha demostrado que las gotas de agua con un radio mayor que 2.5 mm tienen formas aplanadas cuando estas van camino a tierra. Las condiciones meteorológicas de una nube de tormenta de acuerdo a Simpson se muestra en la *figura 1*.



**Figura 1. Condiciones meteorológicas con una nube de tormenta de acuerdo a Simpson**

Las líneas sólidas en la figura representan las líneas de flujo del aire entrante, su distancia en parte será inversamente proporcional a la velocidad del viento. El aire entra a la tormenta por la derecha y pasa bajo la parte frontal de la nube donde el aire entra a la nube y toma una dirección ascendente. Las líneas punteadas muestran el camino general de las gotas de lluvia que caen a tierra, la distribución de la carga eléctrica establecida en la nube de tormenta durante su evolución, así como las diferentes áreas formadas durante el proceso, tal como se muestra en la figura 2.



**Figura 2. Condiciones eléctricas en una nube de tormenta**

La región B marcada en la figura 2 es un área donde la velocidad vertical del viento excede los 8 mts/seg. esta es la región de ruptura y de recombinación de las gotas de agua, aquí no puede haber acumulación de electricidad. Cuando una gota de agua se rompe, el agua de la cual están compuestas recibe una carga positiva y la correspondiente carga negativa la suministra el aire, esta carga es absorbida inmediatamente por las partículas de la nube, las cuales son llevadas a plena velocidad por las corrientes de aire existente dentro de la nube (despreciando claro el efecto del campo eléctrico en resistente separación).

La carga positiva del agua, sin embargo, no pasa fácilmente por la región B de la figura 2, las pequeñas gotas de agua que rápidamente se recombinan y caen otra vez solamente para romperse más, para luego recibir una nueva carga positiva adicional (proceso regenerativo). En este sentido la acumulación de agua en B es altamente cargada con electricidad positiva tal como se muestra con el signo (+) en la figura 2.

El aire con esta carga negativa pasa fuera de la región B dentro de la nube principal, el aire anterior también recibe una carga negativa. La región B estará descrita entonces como la región de separación, aquí la electricidad negativa es separada de la electricidad positiva. La densidad de la carga negativa obviamente será mayor justo al lado de la región de separación tal como se muestra en la figura 2 por los signos más (+) y menos (-) en la región alrededor de A.

En contraste con las dos teorías mencionadas, Wilson en primer lugar llega a la conclusión que la baja porción de una nube es negativamente cargada y que la porción superior de esta se carga con electricidad positiva. Mientras que las teorías de Simpson ya mencionadas, indican en primer lugar y contrario a la anterior teoría de Wilson, nos dice que una intensa carga positiva reside en lo mas alto de la nube y que las cargas negativas están distribuidas en todas partes del resto de la nube.

Estudios más recientes sobre el tema y tomando en consideración la teoría de Wilson, indican que las descargas atmosféricas se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera. Cuando el potencial entre la nube y tierra aumentan, se forman potenciales de hasta 300 millones de voltios entre las nubes de tormenta y tierra. La carga se forma en nubes de tormenta del tipo cumulonimbus (nubes bajas formadas por la aglomeración de nubes blancas en forma de cúpula), las cuales se caracterizan por estar formadas de columnas de aire caliente que ascienden por convección (transmisión del calor de los cuerpos en movimientos), esto provoca que la atmósfera se haga más inestable debido a grandes gradientes de temperatura. En el interior de estas nubes de tormenta el cual es recorrido por rápidas corrientes de aire ascendentes y descendentes que pueden alcanzan velocidades de hasta 300 kmts/hora. Por lo tanto, la carga eléctrica dentro de la nube se forma al separar estas fuertes corrientes de aire, de agua y hielo en partículas ionizadas. La carga se concentra en un disco con un diámetro aproximado de 10 kmts y una altura aproximada de 5 kmts. Esta carga en la mayoría de los casos es predominantemente negativa. [ 1 ].

A medida que se comienza a incrementar la carga y a incrementarse el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se comienza a rebasar el gradiente crítico (30 kv en aire seco y 10 kv en las condiciones de presión y presencia de gotas de agua existentes en las nubes), se presenta la ionización del aire y por lo tanto se van formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que en este caso es la tierra u otra estructura alta que se encuentre en el camino de descarga del rayo. En general, el aire cerca de la superficie de la nube es ligeramente cargado, esa carga y la acompañante fuerza del campo puede incrementarse considerablemente con los cambios en las condiciones meteorológicas, a menos que la fuerza de ruptura del aire el cual es alrededor de 30 kv/cm sea excedida en unos pocos lugares, en cuyo caso el voltaje es equilibrado por el rayo descargado a través de una larga distancia.

### 1.3 CARACTERISTICAS DE LOS RAYOS

#### 1- CORRIENTE DE CHOQUE:

Máxima	220,000 amp.
Mínima	200.00 amp.
Promedio	10,000 a 15,000 amp.

#### 2- TIEMPO DE SUBIDA:

$t_{sub}$ : 1 a 100 microsegundos

#### 3- POLARIDAD DEL RAYO:

Aproximadamente el 95% son negativos.

#### 4- VARIABILIDAD ANUAL:

Número máximo de golpes	50
Promedio	21
Mínimo	3

#### 5- CHOQUES DIRECTOS A LINEAS T

1 por milla por año con niveles cerámicos de entre 30 y 65.

#### 6- DESCARGAS DE CORRIENTE DEL RAYO EN PARARRAYOS DE DISTRIBUCION SOBRE LINEAS DE DISTRIBUCION PRIMARIAS. (zonas rurales y urbanas)

Datos máximos medidos para descargas de alrededor de 40,000 amp. aproximadamente

- 1% de grabaciones < 22,000 amp.
- 5% de grabaciones < 10,500 amp.
- 10% de grabaciones < 6,000 amp.
- 50% de grabaciones < 1,500 amp.

Probabilidad de corriente del rayo en pararrayos de distribución primaria (excluyendo corrientes de rayos abajo de 300 amperios (valor umbral) de mediciones y excluyendo interrupciones de descarga).[ 2 ]

7- El porcentaje de pararrayos de distribución localizados por año reciben corrientes de rayos menores y altas, tal como se muestra en la columna 4 de la tabla 1.

**Tabla 1. Porcentajes de corrientes en pararrayos de distribución por tipo de circuito**

<b>COL. 1</b> <b>Circuito urbano</b> <b>(%)</b>	<b>COL.2</b> <b>ckt. semi-urbano</b> <b>(%)</b>	<b>COL. 3</b> <b>Circuito rural</b> <b>(%)</b>	<b>COL. 4</b> <b>I. de descarga</b> <b>(amp.)</b>
20	35	45	1000
1.6	7	12	5000
0.55	3.5	6	10000
0.12	0.9	2.4	20000
		0.4	40000

Número de pararrayos de distribución por año (excluyendo operaciones repetidas o múltiples choques).

- Promedio sobre sistemas diferentes, rango 0.5 a 1.1 por año.
- Máxima grabación 6 por año.
- Máximo número de operaciones sucesivas de un pararrayos durante el choque del múltiple rayo

#### ***1.4 VALORES NUMERICOS ESTIMADOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS***

Dado que los rayos son dificultosos de medirlos debido a sus transitorios y naturaleza peligrosa, los valores o parámetros tomados no pueden fácilmente ser definidos. La fuerza del campo generado en condiciones atmosféricas normales es alrededor de 150 v/m, creciendo durante una tormenta en varios miles de voltios por metro, pudiendo alcanzar este campo un potencial entre 50 a 300 kv/m cercanos a tierra.

La fuerza del campo fluctúa muy marcadamente con el tiempo ocurriendo entre 5 y 20  $\mu$ s, este es el tiempo de duración de la descarga del rayo mismo. Esta fuerza del campo aparecerá en todas las direcciones con una dimensión aproximada de 2 a 4 kmts. manteniendo una aparente altura de entre 200 a 400 metros.

Datos tomados por aparatos o cámaras especiales han sido obtenidos, dando como resultados algunos parámetros que nos muestran la naturaleza peligrosa de estas descargas atmosféricas tal como se tabulan en la tabla 2 que a continuación se presenta.

**Tabla 2. Parámetros de las descargas atmosféricas**

PARAMETROS	EN EL ESPACIO LIBRE	EN LINEA
Voltaje (MV)	10-20-100	0.5-1-5
Fuerza del campo (Kv/m)	50-200-300	0.3-3-15
Tiempo de duración( $\mu$ s)		
Elevación frontal:	5-10-20	0.5-5-20
Disminución:		5-20-100
Fuerza de la I.(KA)	10-100-500	1-10-50
Comportamiento temporal	Sobreamortiguada	único o impulsos múltiples
Extensión espacial	0.2-2-4	10-30

### **1.5 COMO EVOLUCIONAN LAS DESCARGAS**

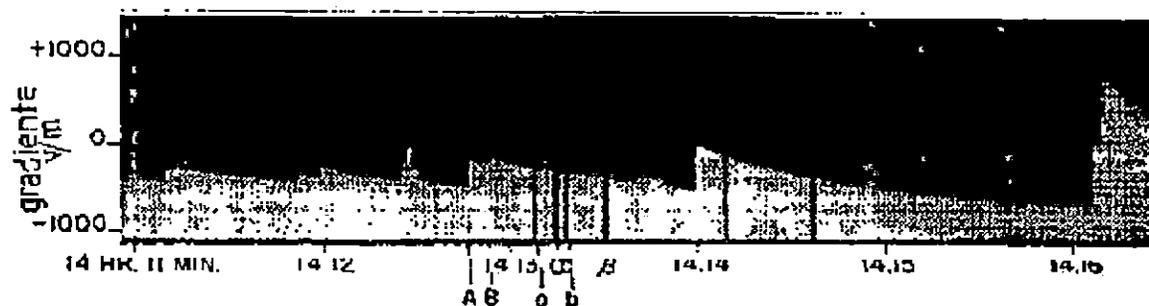
El camino de transformación progresiva de un rayo se inicia llevando a cabo una serie de descargas, produciendo a su paso un camino ionizado que le sirve al líder para el descenso. El líder es la primer componente del choque del rayo y es precedido por un "fluido piloto" el cual representa la propagación de las descargas sobre el aire virgen el cual tiene una baja ionización. Las corrientes asociadas con el flujo piloto son pequeñas, la mayoría anda en el orden de pocos amperios. Cuando el flujo piloto procede, este es acompañado por puntos de luminiscencia los cuales viajan dando saltos, aumentando cada vez mas los pasos del líder. La velocidad de estos pasos excede el 1/6 de la velocidad de la luz y una distancia de viaje o descenso de 50 a 100 metros por cada 50 microsegundos. Cada paso en sí es esencialmente fuerte, pero cada paso es reciente, en general cada paso toma una dirección diferente.

El cambio de dirección de cada unión aumenta el camino tortuoso característico del rayo, toman diferentes ramificaciones que salen del líder. Cuando el rayo comienza su descenso, la carga almacenada va en aumento a medida avanza, cuando este se detiene acumula mas carga la cual es transferida desde la nube, produciéndose un camino ionizado creando un nuevo avance del líder. Estos avances y reposos de este primer flujo de carga son los que se conocen como *líderes escalonados*.

Este "líder" avanza hasta llegar a cerrarse eléctricamente el camino a tierra, cuando este camino se cierra entonces la carga del choque se desplaza a una velocidad vertiginosa produciéndose la descarga de retorno de gran luminosidad, que luego con intervalos de 0.01 a 0.1 seg. se producen nuevos flujos de electrones. Son los líderes rápidos que al golpear tierra producen descargas menos enérgicas que la primera. La temperatura dentro del canal de la descarga formado, llega hasta 30,000 °C y la presión llega a alcanzar las 100 atmósferas. Las descargas de una nube pueden generar nuevas reparticiones de carga en la atmósfera, presentándose descargas horizontales entre varias nubes de tormenta. [ 3 ]

### 1.6 ACUMULACION DE LAS CARGAS

El grado con la cual las cargas se acumulan y se registra es relativamente lento y anda entre 5 a 20  $\mu$ s y sobrepasar algunas veces los 100  $\mu$ seg, tal como lo evidencian las mediciones de gradientes de tierra obtenidas por Wilson y otros. La figura 3, es una típica grabación obtenida por instrumentos de medición de rayos, esta fue obtenida por Wilson, podemos observar en ella que el proceso de cargado de la nube en efecto es lento y con un valor aproximado de 1 minuto por carga hasta llegar a completar una con carga mayor, repitiéndose el proceso varias veces, el tiempo de cargado dura aproximadamente 5 minutos según se observa en la figura.

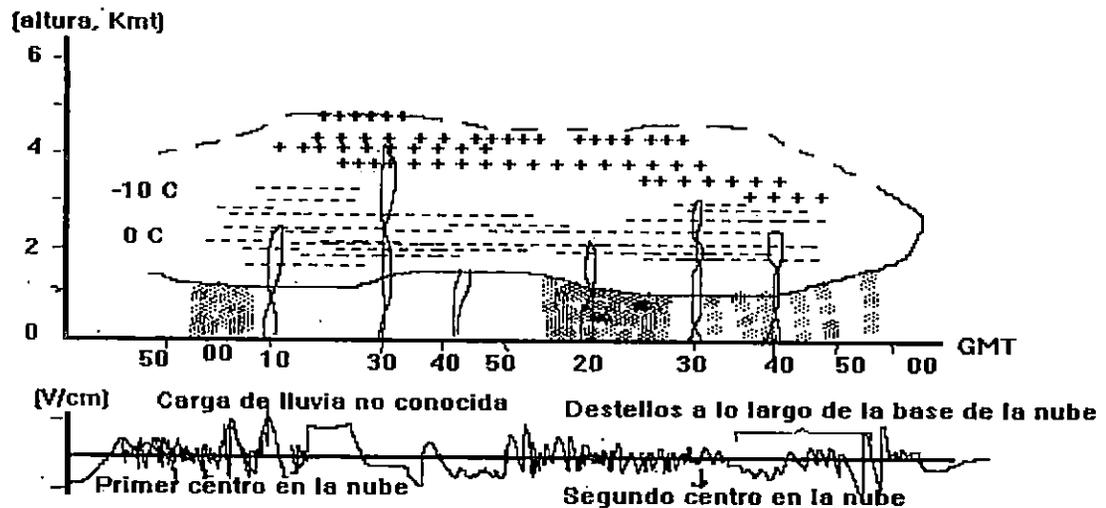


*Figura 3. Mediciones hechas por Wilson de un gradiente de tierra durante una tormenta eléctrica.*

Inmediatamente después de ocurrido el choque, el proceso de regeneración en la nube comienza nuevamente a restablecer el campo en una relación indicada por la razón de cambio del gradiente. En general la curva es exponencial y requiere de muchos segundos antes del proceso de cargado atendiendo un substancialmente valor constante.

### 1.7 DISTRIBUCION DEL CAMPO Y LA CARGA

Como se observa en la figura 4, tomada de la documentación de Simpson y Scrase, muestra como los campos y consecuentemente las densidades de carga son variables en una nube de tormenta eléctrica, se puede ver como el campo varía a medida la nube se encuentra a una altura suficientemente alta, media o poca altura.



*Figura 4. Gradiente eléctrico tomado por Simpson y Scrase con globos libres.*

El espesor de la columna vertical como podemos ver en la figura 4, es una medición del gradiente de potencial generado, la porción sombreada indica la existencia de un campo positivo y la porción no sombreada muestra un campo negativo. El gradiente máximo encontrado por los investigadores en este campo fue de 100 voltios por centímetro bajo condiciones del campo eléctrico generado por la nube de tormenta, ya que en condiciones normales atmosféricas este valor anda por los 150 v/m ó 1.5 v/cm. El campo generado entre la nube y la tierra es mas o menos independiente de la altura y varía en un rango de 50 a 100 v/cm. De esta forma el gradiente encontrado en la nube y la tierra es alrededor de 1,000,000 voltios por cada 100 pies de altura de la nube.

Tomando en consideración lo anterior podemos entonces determinar que los campos más intensos se encuentran en las regiones mas altas de la distribución de cargas, por lo tanto es común que estos potenciales generados en las nubes de tormenta anden cerca de los 20,000,000 de voltios aproximadamente. [1]

### ***1.8 MECANISMOS DE LAS DESCARGAS***

Las concentraciones del campo eléctrico en una nube en curso, deberán estar limitados por los límites de las propias nubes, en muchos casos serán mucho más pequeñas. Antes de la descarga, el gradiente eléctrico en la nube será mucho mayor que el de la tierra donde el gradiente nunca excederá los 100 voltios/cm. De este modo la descarga tenderá a ser iniciada en la nube mejor que en la tierra. Las bajas presiones en las altitudes elevadas, al igual que sí allí no hubieran gotas de agua, entonces decrecerá el gradiente de ruptura.

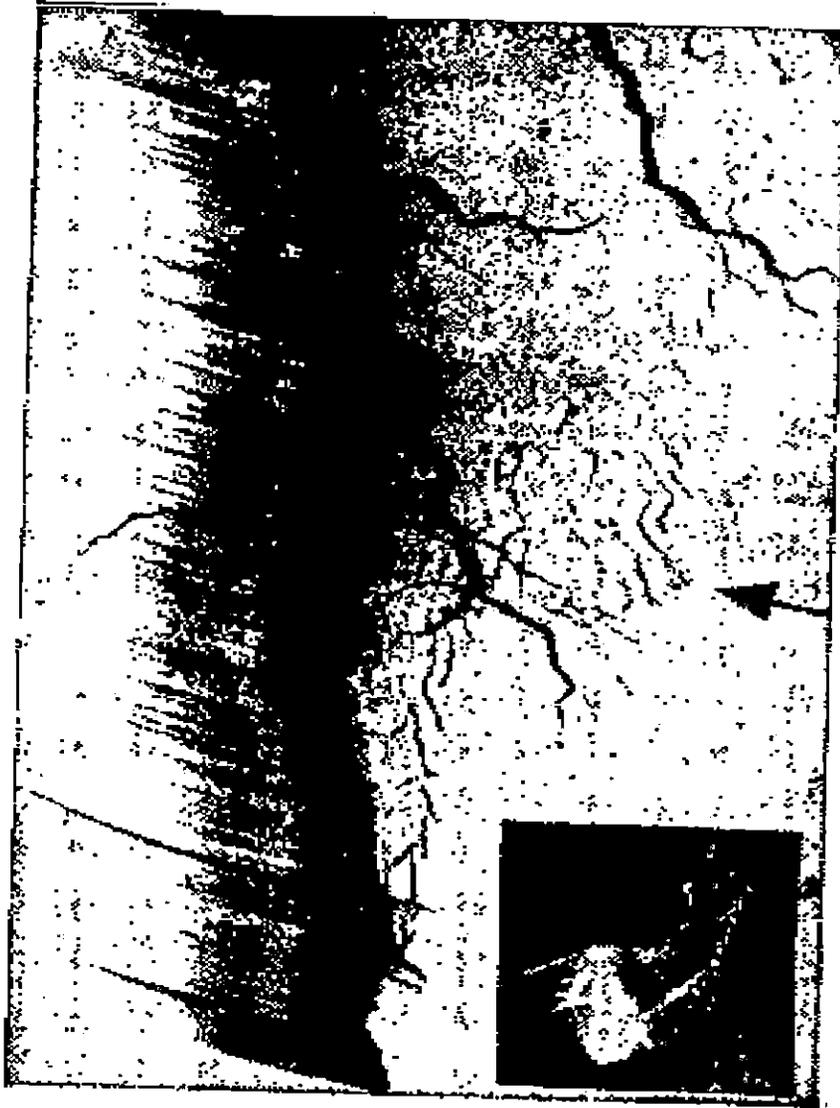
En otros casos, las pruebas indican que las descargas de los terminales positivos aparecen para requerir bajos gradientes, los que son descargados por los terminales negativos, y después mas descargas dadas salen de fuentes negativas de las nubes, esta propiedad deberá animar la iniciación de las descargas de la tierra. Uno de los investigadores McEachron, mostró que las descargas del rayo para una edificación elevada (de gran altura) el flujo inicial usualmente proceden de los edificios. Las evidencias, por lo tanto sugieren que los tipos de descarga con los cuales estos artículos están grandemente interesados (en estructuras bajas), las descargas iniciales pueden ser asumidas para moverse súbita y rápidamente desde la nube.

### ***1.9 INICIO DEL LIDER***

El líder es la primer componente del choque de un destello que es precedido por un flujo piloto el cual representa la propagación de la descarga dentro del aire virgen teniendo una muy baja ionización. Las corrientes asociadas con el flujo piloto son pequeñas, la mayoría anda en el orden de pocos amperios. En la figura 5 se muestran los diferentes pasos del líder obtenidos por medio de instrumentos, una porción de la carga en el centro donde los choques originados son bajos y distribuidos sobre este sistema entero de conductores temporarios formados por los diferentes pasos que el líder forma en su camino a tierra.

### **RETORNO DEL CHOQUE**

Cuando el líder choca en tierra, una extremadamente y brillante luz de retorno del flujo se propaga de la tierra a la nube siguiendo por el camino principal dejado por el rayo o por el canal del líder descendente. La carga distribuida a lo largo del líder, es descargada progresivamente a tierra dando elevaciones de muy altas corrientes asociadas con las descargas del rayo, las corrientes varían entre 1000 y 20,000 amperios. La velocidad de propagación será alrededor del 10% de la velocidad de la luz.



*Figura 5. Diferentes caminos que toma el flujo piloto o líder escalonado.*

La formación de ese proceso de cargado es relativamente lento, requiriendo un tiempo en el orden de  $10,000 \mu\text{seg}$ . mientras que el proceso de descargado es rápido, requiriendo solo alrededor de  $50$  a  $100 \mu\text{seg}$  de este modo las cargas iguales se involucran en ambos estados, la diferencia es el tiempo en que ocurren estos dos estados.

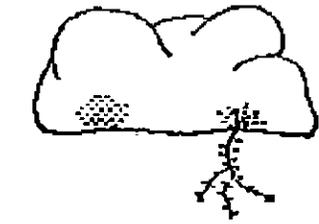


fig. 6-(a)

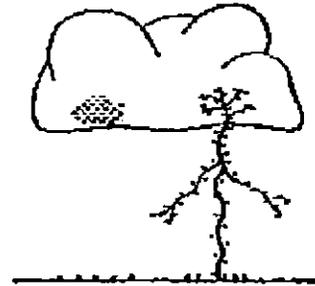


fig. 6-(b)

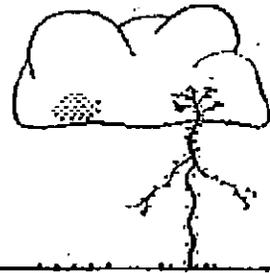


fig. 6-(c)

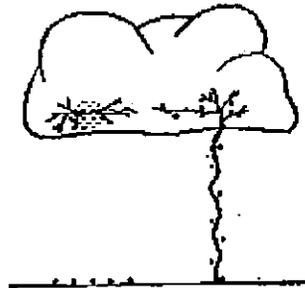


fig. 6-(d)



fig. 6-(e)

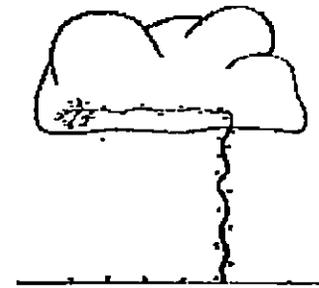


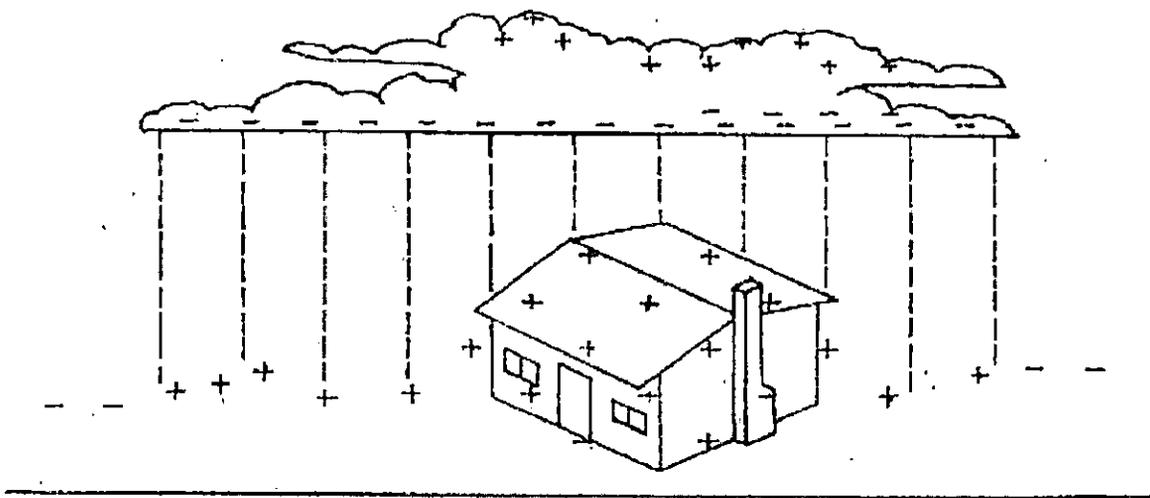
fig. 6-(f)

**Figura 6. Diferentes pasos del líder escalonado durante una tormenta eléctrica**

En la figura 6, se muestran los diferentes procesos antes mencionados que ocurren en la descarga de un rayo, en la fig. (a) muestra los centros de carga de la nube y los diferentes pasos del líder piloto que inicia el descenso, en (b) se completa el proceso de (a) hasta que el flujo piloto choca con tierra, en (c) se muestra la carga de retorno con el espacio cargado negativamente, en (d) se presenta el primer centro de carga completamente descargado, solo se muestra el camino ionizado dejado por la descarga del rayo. En (e) y (f) se muestran las descargas entre dos centros de carga y los flujos de las descargas de retorno.

### ***1.10 MECANISMOS DE CHOQUES DE LOS RAYOS***

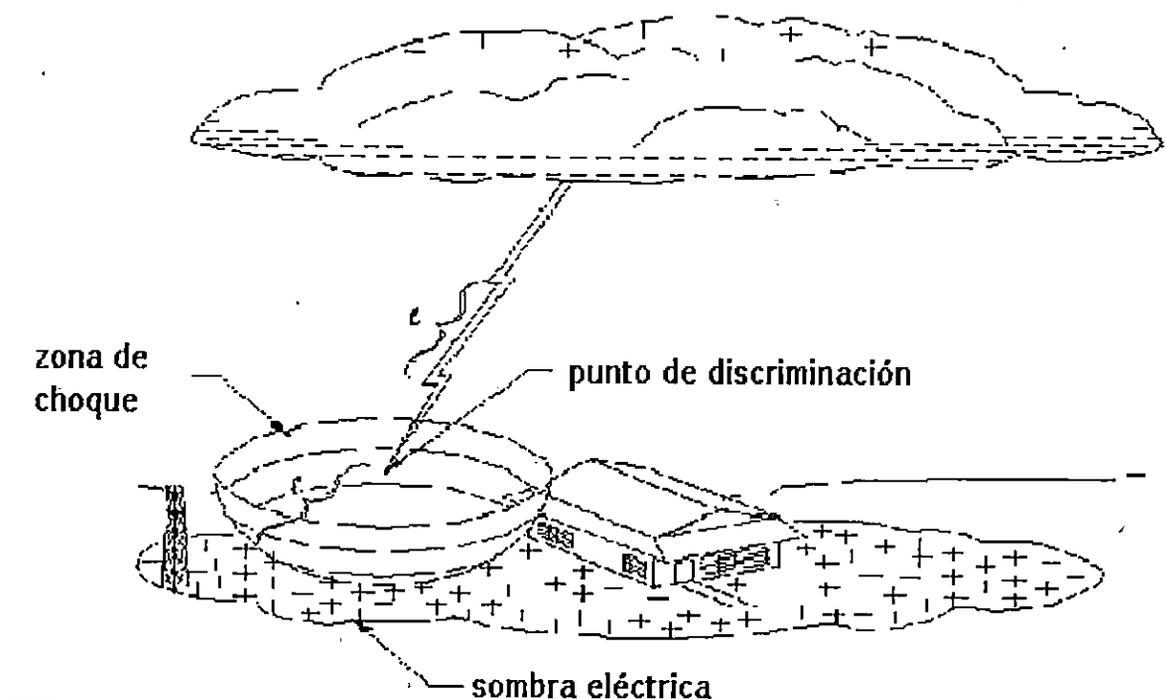
Las nubes de tormenta son cuerpos eléctricamente cargados suspendidos en una atmósfera que puede ser considerada como mejor o peor conductor. Durante una tormenta, la separación de cargas se realiza en la nube. El potencial en la base de la nube es generalmente asumido en alrededor de cientos de millones de voltios y el campo electrostático resultante alrededor de 10 kv por metro de elevación sobre la tierra. La acción de cargado (o separación de cargas) con la tormenta actúa como un acumulador, usualmente deja la base de la nube con una carga negativa, pero en raras ocasiones se puede observar lo opuesto. Este resultado de cargas induce una carga similar de polaridad opuesta sobre la tierra concentrada en esta superficie justo bajo la nube y sobre iguales medidas y formas de la nube, tal como se muestra en la figura 7.



***Figura 7. Separación de cargas en una nube de tormenta***

Como en una tormenta de gran intensidad, la separación de cargas continúa en la nube hasta que el aire entre la nube y tierra ya no pueden actuar como un aislador, es por lo tanto este el punto de rompimiento del rayo, variando con las condiciones atmosféricas existentes. Las bajas intensidades de los destellos son llamados "pasos del líder" (avance del rayo hacia un potencial de tierra) que se mueven de la base de la nube hacia la tierra, los pasos son de igual longitud y esa longitud es relativa a la carga en el interior de la nube y a la corriente en el choque del rayo.

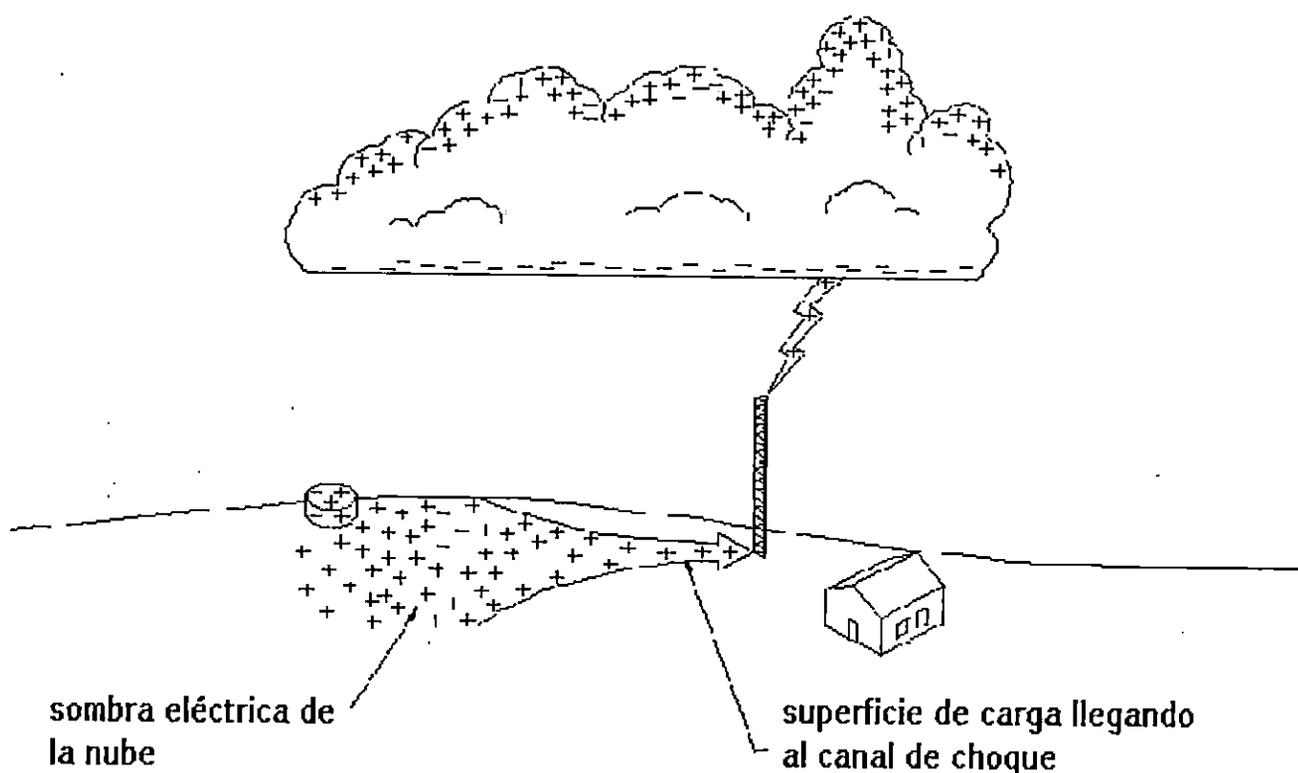
Los pasos son relativamente iguales y el tamaño es relativo a la carga en el interior de la nube y al pico de corriente en el choque. Estos pasos varían en longitud en alrededor de 10 mts sobre 160 mts por choque negativo. Como el líder se acerca a tierra, por lo tanto el campo eléctrico sufre estos incrementos con cada paso de este, finalmente alrededor de un paso de distancia de tierra (facilita el salto en tierra) una zona de choque es establecida, como se puede mostrar en la figura 8.



*Figura 8. Zona de choque establecida por el rayo*

Esa zona de choque es aproximadamente hemisférica en forma, con el radio igual a un paso de longitud. El campo eléctrico en esa zona es alto que crea movimientos descendentes de flujo hacia objetos altos en tierra. El primer flujo que alcanza el paso del líder cierra el circuito y comienza el proceso de neutralización de cargas.

Cuando estructuras altas intervienen entre la tierra y la nube, ellas están igualmente cargadas. Después de la corta salida de una porción de la separación del espacio aéreo, pueden disparar un golpe por que la estructura reduce una significativa porción del espacio aéreo intervenido. La neutralización de las cargas es causada por el flujo de electrones de un cuerpo a otro tal que no hay diferencia de potencial entre los dos cuerpos. El proceso creado da iguales resultados como si cortocircuitáramos los terminales de una batería. En la figura 9 se muestra como se da el proceso de neutralización de las cargas. [ 3 ]



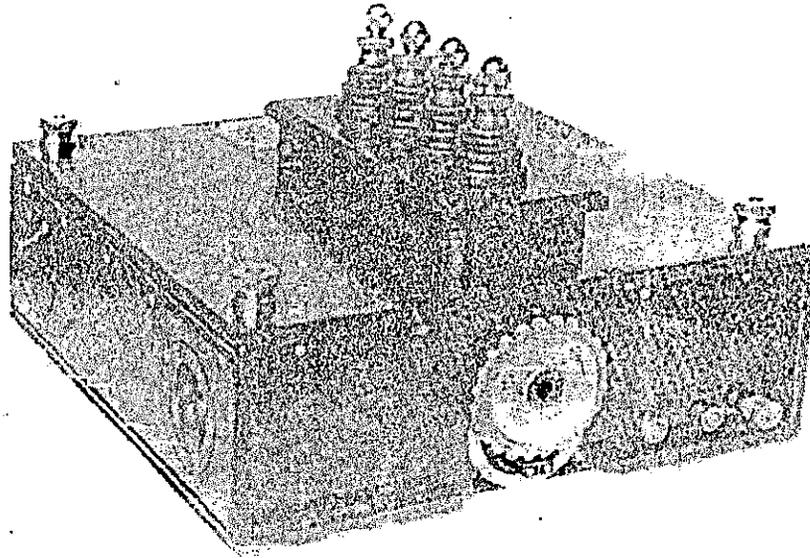
*Figura 9. Proceso de neutralización de las cargas*

### **1.11 EQUIPOS PARA LA MEDICION Y DETECCION DE RAYOS**

Para la medición de rayos, se han utilizado un incontable número de instrumentos tales como el *oscilógrafo*, el *klidonógrafo*, la *cámara de Boyd*, el *tubo de rayos catódicos*, *equipo de detección de rayos y tormentas (ESDI)*, etc. En la actualidad, debido a los rápidos avances tecnológicos se han construido modernos equipos como los enlaces magnéticos, registradores de campo eléctrico, goniómetros, contadores cigre, y otros. A continuación se desarrollaran algunos de estos instrumentos de medición.

### 1.11.1 *El klidonógrafo*

El primer instrumento de campo desarrollado para mediciones de ondas de voltaje fue el klidonógrafo, inventado por J. F. Peters en 1924. En 1777, el doctor G. C. Lichtenberg descubrió que las figuras pueden ser producidas en polvo de azufre por el campo electrostático de un electrodo cargado colocado muy cerca. Otros encontraron que las figuras de Lichtenberg también se producían sobre un plato fotográfico. Estas figuras son funciones de la magnitud, polaridad y formas de onda del voltaje impreso. El Klidonógrafo como se muestra en la figura 10, emplea esas características para la medición de ondas de voltaje.



*Figura 10. El Klidonógrafo*

El klidonógrafo consiste de un electrodo redondeado armado sobre la emulsión lateral de una película fotográfica o plato apoyado sobre una superficie liza del plato aislado detrás por un electrodo cubierto. En la figura 11, se muestran típicos klidonogramas obtenidos por diferentes tipos de voltajes. El mínimo voltaje crítico necesario para producir dibujos es cerca de 2 kv, así un alto voltaje centelleante ocurriera, confundirá la película.

Para varias polaridades tendrán diferentes características dentro de los dibujos tanto para voltajes negativos como positivos. Sin embargo para otras polaridades el radio de la figura tomará una forma diferente, podría ser simétrica o asimétrica según sea el caso.

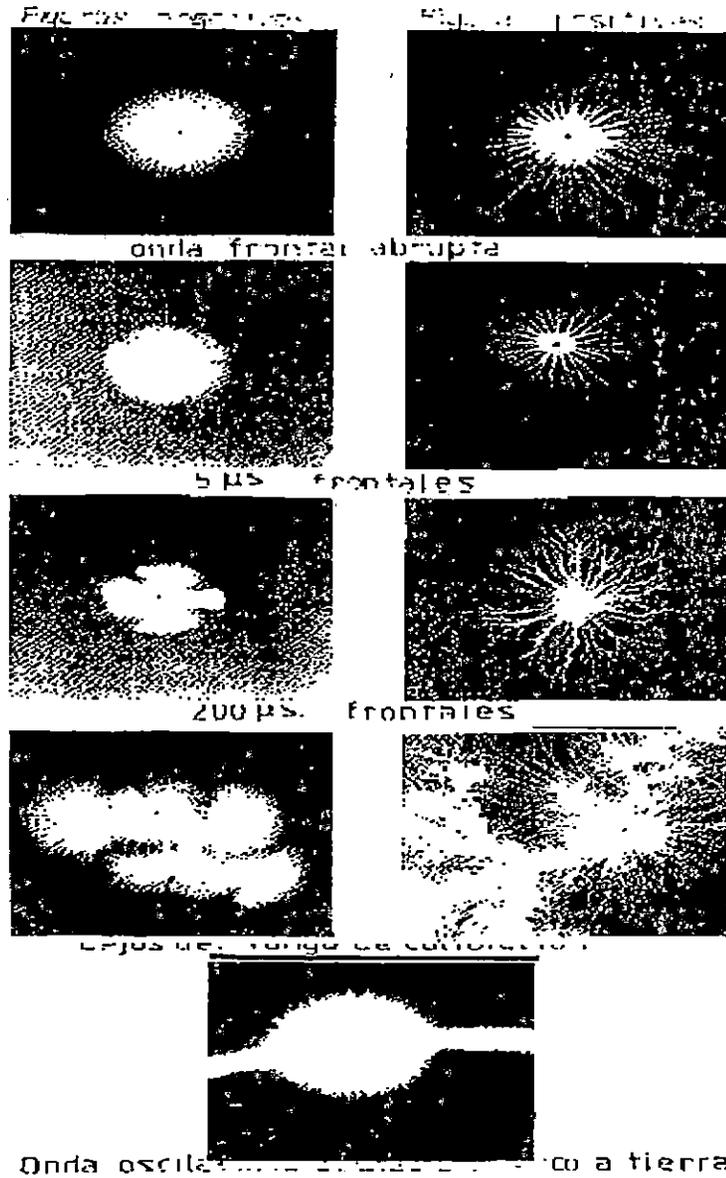


Figura 11. Figuras típicas tomadas por un klydonograma.

Las oscilaciones de onda producen superposición en las figuras por cada parte de la onda, habilitando una distinción para ser hecha entre voltajes unidireccionales y oscilatorios. El klidonógrafo fue construido con múltiples elementos para que simultáneamente se graben varios voltajes sobre una línea de transmisión. Este ha sido desarrollado también con un suave movimiento rotando la película coordinada con un reloj de grabación para habilitar mas que una onda para ser grabado junto con el tiempo de ocurrencia, se logra rápidamente moviendo la película que ha sido usada para mediciones de potencia-frecuencia, voltajes y ondas de rayos.

Para superar algunas desventajas en las mediciones, Foust desarrolló un instrumento teniendo dos elementos en paralelo, uno conectado en la polaridad opuesta a las otras para que una figura positiva sea siempre obtenida. En aplicaciones del klidonógrafo para la medición de voltajes sobre líneas de transmisión una capacitancia potencial es generalmente usada. El klidonógrafo a sido empleado en conjunto con una resistencia en paralelo por una medición de ondas y que también han sido usadas para medir la máxima relación de elevación de corriente de conductores de líneas de transmisión y torres por conectado de esto a través de una resistencia en serie con un lazo de alambre inductivamente acoplado con el circuito principal de corriente.

El klidonógrafo es un relativamente simple y caro dispositivo, el cual permite un uso grande de veces. Esto ha sido valioso en mejoramientos estadísticos de datos sobre la magnitud, la polaridad y frecuencia de ondas de voltaje sobre la línea de transmisión. Sin embargo, esta precisión es medida en magnitud solamente en el orden de 25 0 50% y ciertas interpretaciones refiriéndonos a la forma de onda que se han elaborado y que son cuestionables. [ 1 ]

### *1.11.2- El oscilografo de rayos catódicos*

Un rayo catódico consiste de un flujo de electrones emitidos de un frío cátodo y acelerado en un campo eléctrico en un tubo evacuador, fue primero producido por F. Braun en 1897. Wiechert desarrolló la bobina concentrada para rayo focal y el principio de deflexión electrostática y magnética. En 1913 Zenneck empleó el principio de emisión de rayos catódicos para grabar fenómenos eléctricos. Él fotografió trazos de los rayos imprimiendo sobre una pantalla fluorescente y deflectada una onda de pocos milisegundos de duración. Este método de grabación, sin embargo no fue manejado para disturbios producidos por los rayos.

Dufour, desarrolló el primer oscilógrafo de rayos catódicos capaz de hacer grabaciones de transitorios. Un oscilógrafo de este tipo fue primero usado para estudiar el comportamiento artificial de las ondas de los rayos sobre las líneas de transmisión en EUA por Westinghouse Electric Corporation en 1926, sobre 5 millas de líneas positivas.

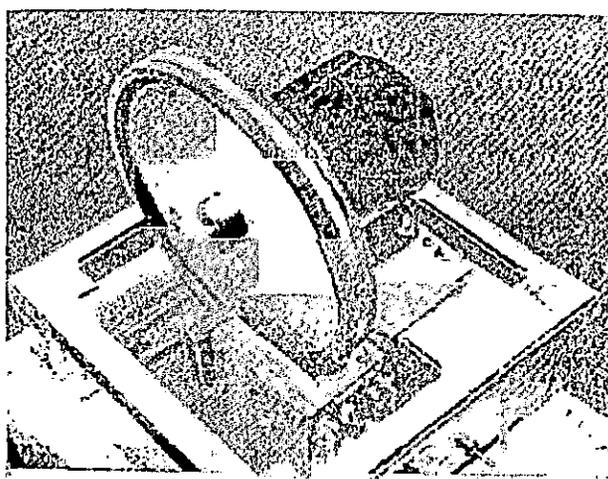
A menos que el rayo sea impedido de golpear la película hasta la ocurrencia del fenómeno del cual es deseado grabar, resultará una película opaca. Superando esta dificultad por medio de relés especiales, los cuales normalmente previenen que el rayo golpee en la película por encima de la ocurrencia de la onda del rayo alrededor del blanco del bloque. La Westinghouse Company a empleado este relé desarrollado en un oscilógrafo manejable para ambos campos y trabajo de laboratorio. Otros dos esquemas han sido usados para comenzar un oscilógrafo tipo Dofour y hacerlo manejable para el estudio de los rayos.

General Electric Company desarrolló un oscilógrafo en el cual el suministro del voltaje al cátodo fue un impulso de un pequeño generador de ondas, iniciado a través de un triple disparo por la onda a ser grabada. George desarrolló un cátodo-caliente con grid controlada en un tubo al vacío. El oscilógrafo del tipo anterior emplea un voltaje de cátodo de alrededor de 30 a 40 kv. Teniendo un suministro de potencia de un alto voltaje y siendo uno del tipo de bomba (pumped) para habilitar el corrido de la película. Ellos son relativamente caros y delicados en operación, requieren una constante atención de un operador. Estas consideraciones mayormente limitan su uso en el campo, especialmente en número suficiente para obtener datos de una naturaleza estadística.

### *1.11.3 El Fulconógrafo*

El oscilógrafo de rayos catódicos es el mejor instrumento disponible de punto fijo para la determinación de formas de ondas transitorias, al igual que como ondas de rayos. El costo y complejidad, limitan el uso en el campo. El klidonógrafo y medidor surge-crest tienen suministro de datos de este tipo sobre la magnitud y polaridad de corrientes y voltajes distorsionados. En número de componentes, forma de onda, y duración de los disturbios de igual o más importancia. Por lo tanto, con la vista de datos reunidos de esas propiedades de disturbios, La Westinghouse Corporation desarrolló un número de nuevos instrumentos de grabación.

El más importante de estos fue el Fulconógrafo, este es un dispositivo capaz de medir la forma de onda y duración de la cola de ondas de corrientes, pero bastante barato y simple hasta en la operación para ser usado en largos períodos en el campo. La parte esencial del fulconógrafo es un SLOTTED de aluminio de rueda rotativa. El fulconógrafo como se muestra en la figura 12, la rueda gira a 3450 rpm, y en la velocidad baja en aproximadamente 60 rpm. En el borde de cada uno están 408 laminaciones de un magneto permanente de acero de 9 mils de espesor, proyectado en cada uno de los lados. Las laminaciones pasan a través de estrechas bobinas tal como se muestra en la figura 13, durante el cual fluiría la corriente a ser medida. Como una particular colocación del boquete entre las bobinas, ellas están sujetas a la fuerza de magnetización radial proporcional a la corriente en ese instante.

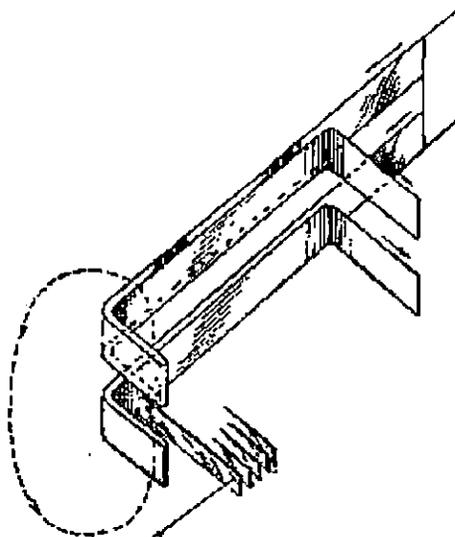


*Figura 12. El Fulconógrafo*

Para las mediciones de la retentividad o flujo residual en las laminaciones, es esto posible reconstruir un gráfico de la corriente como una función del tiempo. Los dispositivos funcionan de una manera similar a los medidores de variaciones de cresta, excepto que el tiempo ha sido introducido por la rotación de la rueda. Al colocarlo a una alta velocidad y una baja velocidad juntas en serie y marchando entonces continuamente, detallará las ondas y grandes períodos de tiempo que pueden ser cubiertos por el uso de uno o el otro separadamente. Las unidades de alta velocidad en una revolución dividida en 17,000  $\mu\text{seg}$ , sobre un intervalo de 43  $\mu\text{seg}$ , las unidades de baja velocidad en una revolución dividida en un segundo sobre un intervalo de 1/400 seg. Múltiples choques descargados raramente se atrasan mas que un segundo, o tienen de intercelar entre choques de mas de 0.5 seg. Estos factores hacen que esto sea posible con los datos suministrados por las dos ruedas para resolver una variación sobre múltiples componentes y para obtener la forma de onda y magnitud de cada uno. [ 1 ]

#### *1.11.4 La cámara de Boyd*

El rasgo esencial de la cámara de Boyd es que contienen dos lentes que están montados diamétricamente por los ejes alrededor del cual el sistema rota con respecto a la película. La combinación de estos movimientos de los lentes y la propagación de los choques produce dos películas distorsionadas de los choques entre los cuales, por superposición uno puede deducir la dirección y la velocidad de propagación del choque del desplazamiento entre puntos correspondientes sobre las dos imágenes. La velocidad en revoluciones de la cámara de Boyd es de 300 rpm, la cual permite una resolución de la fotografía de 0.3  $\mu\text{seg}$ .



*Figura 13. Construcción de bobinas del fulconógrafo*

#### **1.11.5 DISPOSITIVOS DE IDENTIFICACION DE TORMENTAS ELECTRICAS (ESDI)**

Dentro de los sistemas de medición modernos existentes para la localización de rayos, se han desarrollado aparatos capaces de identificar, detectar y monitorear una tormenta eléctrica. La compañía MCI a desarrollado este sistema al cual denominó SARA (Surge Activity Risk Abatement). El sistema SARA utiliza un programa combinado que utiliza un aterrizaje perfecto, un supresor de rayos y ondas, y tres sistemas de monitoreo.

Estos son:

- 1.- El ESDI ( Electric Storm Identification Device)
- 2- El NLDN (National Lightning Detection Network)
- 3- El BMI (Distributed Power Monitoring System)

Entre los beneficios y objetivos de la integridad de estos sistemas de potencia tenemos:

- *Prevenir fallas inducidas por rayos, afectando la operación y daños a los componentes del sistema.*
- *Reunir y enviar datos que revelan la degradación del equipo antes que afecte la operación de este.*

- *Recopilar la base de datos de la información usada para analizar el funcionamiento del sistema.*
- *Monitorear los eventos ocurridos en el país.*
- *Utilidad auditiva de funcionamiento.*

El sistema SARA reconoce un trato real a MCI para la facilidad y tráfico que vienen en las actividades de ondas y para un grado menor de interferencia de ruido o por incompatibilidades electromagnéticas.

### ***ELECTRICAL STORM IDENTIFICATION DEVICE (ESID)***

El ESID es un dispositivo que es capaz de detectar actividades de rayos producidos entre nube-nube y entre nube-tierra. Para MCI, los receptores omnidireccionales centellean cuando la actividad eléctrica se encuentra a un radio de 30 millas, se escucha el sonido de un **beep** cuando la actividad eléctrica esta a un radio de 5 millas, estas son algunas de las alarmas de aviso que este sistema posee. Las funciones de este sistema son fácilmente removibles en una forma manual y automática según se desee. Además el sistema SARA tiene acceso a las bases de datos del sistema de alarmas, y es capaz de correlacionar un evento, esta es una facilidad no muy habitual del equipo. La empresa MCI puede además programar el sistema ESI para que este transfiera automáticamente la potencia de un generador cuando el suministro de potencia no es suministrado, ya sea por una salida debido a una descarga eléctrica directa sobre la línea de alimentación o quedar fuera por otras razones. [11]

### ***1.12 DISPOSITIVOS AEREOS DE PROTECCION CONTRA EL RAYO***

Dado que la naturaleza destructiva del rayo permanece latente cuando una tormenta eléctrica se forma, es razón suficiente para proteger equipos o algún otro sistema expuesto a este fenómeno. Benjamin Franklin fue el primero que descubrió la forma de como protegernos de los rayos y esta fue por medio de una barra colocada en un punto elevado de una estructura al cual le llamó "*Punta franklin*" (Lightning rod).

Cuando la descarga de un rayo ocurre, este choca sobre la tierra en un punto que se encuentre considerablemente alto, ya que la descarga eléctrica busca descargarse en un punto donde el potencial sea opuesto al generado en la base de la nube de tormenta y de esta manera poder descargar toda su energía almacenada. Bajo este principio o comportamiento del rayo el de buscar un punto para descargarse, ha surgido numerosos tipos de lightning rod (pararrayos aéreos) para disipar toda esta potencia destructiva natural. Dentro de los tipos de pararrayos que estudiaremos a continuación están:

- a- Las puntas Franklin (puntas simples)
- b- Los PDC (pararrayos con dispositivo de cebado)

### a) LAS PUNTAS FRANKLIN

Su funcionamiento esta basado sobre la base del modelo electrogeométrico, donde el punto de impacto de la descarga viene determinado por el objeto sobre el suelo que primero se encuentra a la distancia de impacto del rayo del trazador descendente. Como entre la nube de tormenta y la tierra se forma un gran potencial generado, y el cual es aumentado a medida estas nubes de tormenta se elevan, entonces el potencial formado es capaz de romper el aislamiento del aire, y es entonces cuando debe de actuar un pararrayos (lightning rod) para drenar todo este potencial generado en la nube, esta energía almacenada es equivalente a la energía de una pequeña bomba atómica (según los investigadores de este fenómeno natural).

#### COBERTURA DE UN PARARRAYOS (LIGHTNING ROD)

Si la estructura a proteger se encuentra a una distancia  $D$  cualquiera del trazador descendente, entonces a estas distancias entre el punto de encuentro de los trazadores descendentes y ascendentes se les llama "Distancia de cebado". Esta distancia de cebado es equivalente a un paso dado por el líder del rayo en su descenso y rompimiento del aire virgen a un potencial opuesto, a este paso del líder o como lo llaman en la NF C 17-102 (norma francesa) "Distancia de cebado" o paso del líder son iguales. Una forma de representar lo antes mencionado se bosqueja en la figura siguiente. [11]

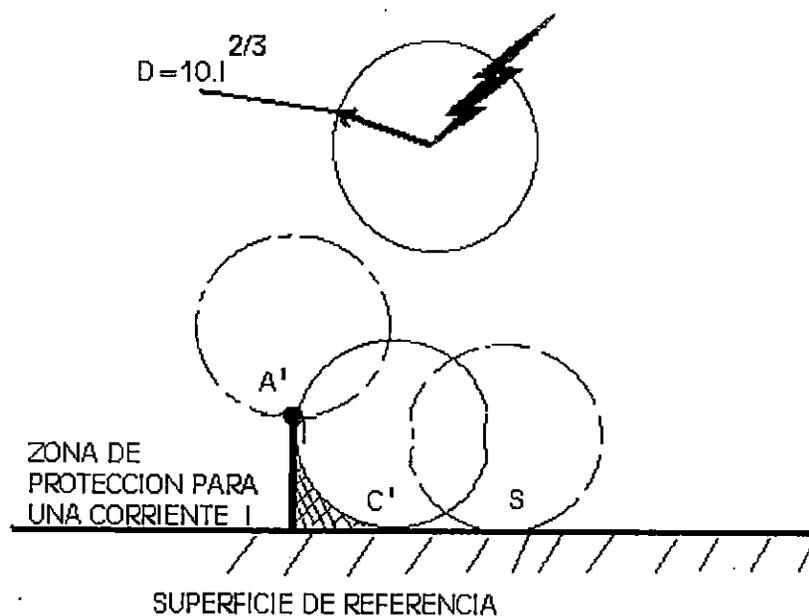


Figura 14. Distancia de cebado de una punta franklin

- Si la esfera entra en contacto únicamente con la punta vertical (A') entonces este punto será el área de impacto del rayo.
- Si la esfera entra en contacto con la superficie de referencia sin tocar la punta, el rayo tocará únicamente el suelo.
- Si la esfera de protección entra en contacto con la punta simple y la superficie de referencia simultáneamente, entonces habrá dos puntos de impacto posibles: A' y C', protegiendo por lo tanto por completo la zona sombreada en la figura 13 que es el objetivo de estos dispositivos aéreos.

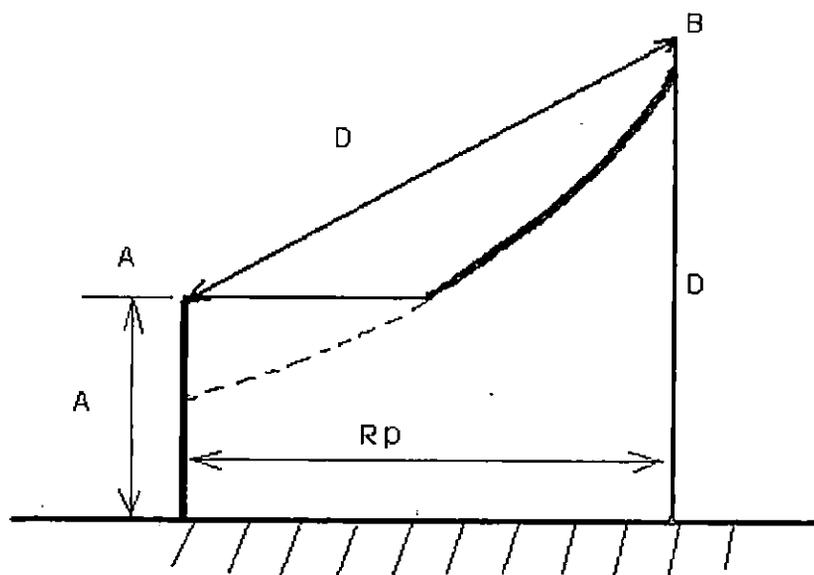
La distancia de cebado D viene generalmente dada por la siguiente ecuación:

**Ecuación 1** 
$$D_{(m)} = 10 * I^{(2/3)}$$

Donde:

I: pico de corriente del primer arco de retorno.

En la figura 14 se representa el uso de esta ecuación.

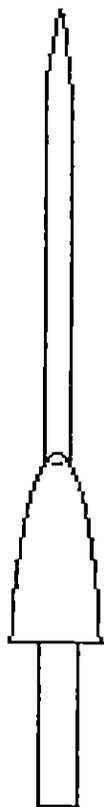


**Figura 15.** Este gráfico muestra la zona de impacto del rayo y el uso de la ecuación para encontrar la distancia de cebado del rayo

**b) PARARRAYOS CON DISPOSITIVOS DE CEBADO**

En cuanto a los pararrayos con dispositivo de cebado recién salidos al mercado, ya que no tenemos información técnica que respalde su funcionamiento acertado, no haremos mucho énfasis en este dispositivo, solo la información comercial proporcionada para su comercialización.

En la información proporcionada, se dice que este es un dispositivo que produce impulsos de alta tensión y que estos están en función del fuerte campo magnético que se genera bajo la nube de tormenta que anda alrededor de entre 10 y 20 Kv. por metro. Debido a este fuerte campo es que este tipo de pararrayos emite impulsos que pueden alcanzar los 20 metros a partir de la punta del mismo y su eficacia depende de cuan alto este sea instalado, por lo tanto al iniciarse las descargas este dispositivo atrapa al rayo antes que este choque a tierra o que este tome una fuerza extrema capaz de producir daños.



**Figura 16. Pararrayos con dispositivo de cebado (PDC)**

## CAPITULO II

### **2.0 EFECTOS QUE CAUSAN LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS** (Tormentas eléctricas)

Cuando se forma una tormenta eléctrica, el área o la sombra proyectada bajo la nube de tormenta está expuesta a los diferentes fenómenos asociados que la acompañan debido a las grandes concentraciones del campo eléctrico que se generan bajo ésta. Como la nube de tormenta no se encuentra estática, si no que esta se mueve debido a los fuertes vientos producidos por los cambios de presión, entonces los daños causados por esta, pueden alcanzar grandes extensiones y por consiguiente producir muchos daños a su paso.

Estas grandes concentraciones del campo eléctrico producen radiaciones de energía electromagnética u otras formas diferentes de energía. Por definición, la radiación electromagnética es la transmisión de energía en forma de ondas, la cual tiene una componente eléctrica y una magnética. La forma de onda electromagnética más familiar son las ondas de radio, además está simplemente caracterizada por la frecuencia y la forma de onda. Todas las ondas electromagnéticas se propagan a través del espacio vacío con una velocidad aproximadamente igual a la velocidad de la luz ( 299,792.4562 Kts/seg ), pero para efectos de calculo se toma la velocidad con un valor aproximado de 300,000 Kmt/seg, el cual es un valor aceptable.

La radiación producida ó emitida durante una tormenta eléctrica, produce en el ambiente donde el fenómeno eléctrico tiene lugar efectos que van adheridos a la descarga eléctrica, estos efectos pueden ser:

- Efectos directos o primarios
- Efectos secundarios

#### **2.1 EFECTOS DIRECTOS**

El efecto directo que un rayo o descarga atmosférica puede ocasionar, es fácilmente palpable, lo que se quiere decir es que cuando un rayo choca en un punto determinado se puede observar la destrucción que éste causa en el lugar de la descarga, destruyendo el lugar donde el impacto tubo lugar y provocando muchas veces que se incendie el lugar del impacto de este. Debido a la naturaleza destructiva del rayo, en el lugar del impacto la destrucción es inminente y este a su vez puede producir otros efectos secundarios asociados que acompañan a la descarga.

Según investigaciones realizadas, la industria del petróleo es la que más ha sufrido éstas actividades eléctricas debido a los impactos directos de los rayos, pero hoy en día además de la industria petrolera existen otras áreas donde los efectos de los rayos están ocasionando pérdidas debidos a daños al equipo. Estas áreas son: las áreas de computo y la área de las telecomunicaciones. Estas industrias han reportado grandes pérdidas debido a este fenómeno atmosférico, sus costos andan en el orden de varios millones de dolares anuales. Además del área petrolera, el campo traviesa no esta exento de este tipo de destrucción natural u otros lugares no considerados, principalmente las áreas boscosas y especialmente los arboles, donde la altura de ellos juega un papel importante, esto es debido a que el rayo por su naturaleza eléctrica busca descargar toda su energía en un punto que se encuentre lo más cercano a tierra por lo que los arboles de gran altura ayudan a que su distancia de aislamiento entre la nube y la tierra se acorte. Lo dicho se puede demostrar, ya que es común que en un bosque encontremos arboles muy altos marchitos después de que en el lugar ha habido una actividad eléctrica de gran magnitud.

## **2.2 EFECTOS SECUNDARIOS**

Los efectos secundarios producidos por una tormenta eléctrica no son fácilmente comprendidos, ya que estos efectos no podemos verlos ni tocarlos pero que están presentes durante la tormenta. Estos efectos secundarios son los causantes de numerosas fallas existentes en los equipos electrónicos sensibles a cambios ambientales (disturbios con características electromagnéticas) tales como redes de computadoras, equipos de comunicación, y otros. Estos efectos de naturaleza electromagnética son provocados por los enormes potenciales generados por las nubes de tormenta. Dentro de estos efectos secundarios producidos por la tormenta eléctrica tenemos:

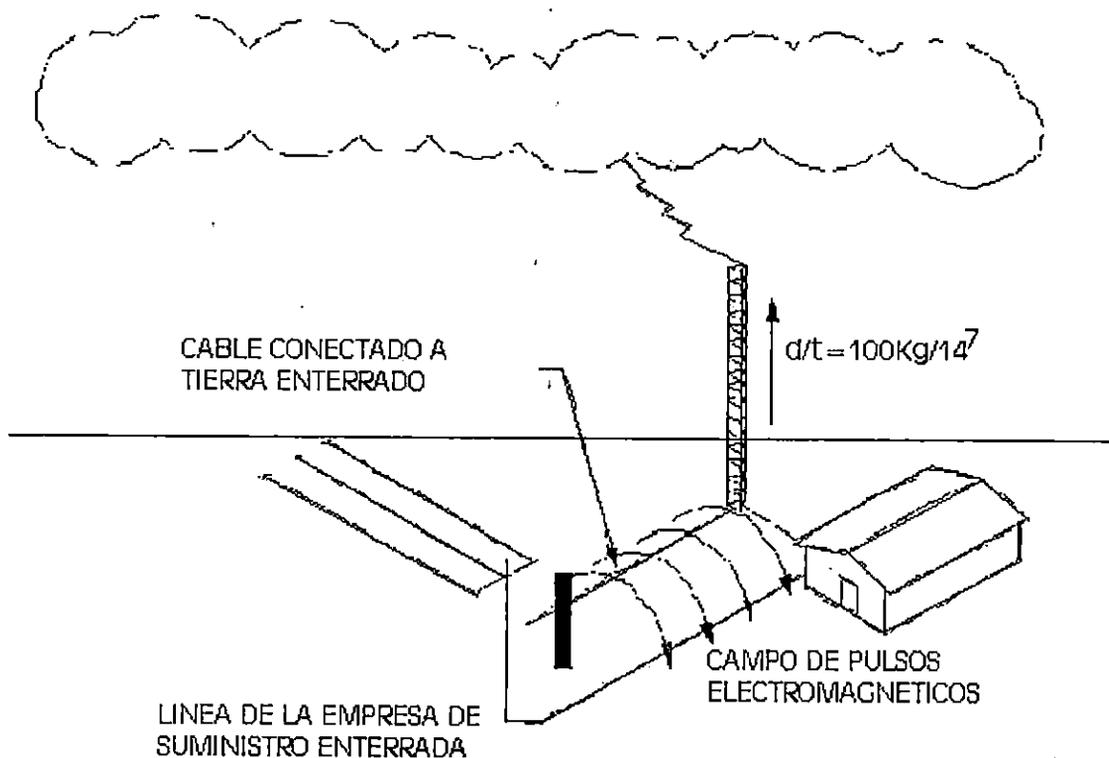
- Pulsos electromagnéticos (EMP)
- Pulsos electrostáticos
- Transitorios de corriente a tierra
- Cargas latentes (Bound charge)

### ***PULSOS ELECTROMAGNÉTICOS***

El pulso electromagnético generado por la tormenta eléctrica es el resultado de los campos magnéticos transitorios formados por los flujos de corrientes que se producen a través del canal del choque generado durante la descarga del rayo. Después de que el canal del choque se establece entre la nube y el potencial cero que es la tierra, entre ellos queda un canal conductivo parecido a un alambre de un diámetro que anda alrededor de 1 cm de diámetro.

Entonces es aquí cuando la neutralización de la corriente del rayo se inicia a un tiempo muy rápido y con una razón que depende del diámetro del canal del choque dejado por el rayo, y de la impedancia formada, además depende de la carga generada dentro de la nube. La razón de elevación de estos puntos varía por ordenes de magnitud, los niveles medidos andan arriba de 510 k amp/ $\mu$ seg, del que se toma un promedio práctico de 100 K amp/ $\mu$ seg (0.1 amp /seg). Los transitorios de corriente que fluyen a través de un conductor los cuales producen un campo magnético relativo, se elevan en una relación rápida por lo que los picos de corriente alcanzan cientos de miles de amperios y algunas veces el pulso magnético generado puede ser totalmente significativo.

Este proceso da como resultado un voltaje inducido dentro de muchos y mutuamente acoplados cables en tierra o líneas secundarias de distribución eléctrica, siendo estos voltajes producidos muy significativos. Siguiendo el proceso que acompaña la descarga del rayo y a la enorme cantidad de carga que se genera en el retorno para transferirlo a la nube, este proceso genera una gigantesca onda de antena, produciendo de esta manera fuertes ondas de pulsos electromagnéticos, por lo que un rayo (EMP) puede propagarse y afectar grandes distancias ó extensiones. En la figura 16 se muestra este efecto. [ 2 ]



**Figura 16. Canal de choque de un Pulso Electromagnético (EMP)**

Algunos datos de los choques recopilados del retorno de un rayo son:

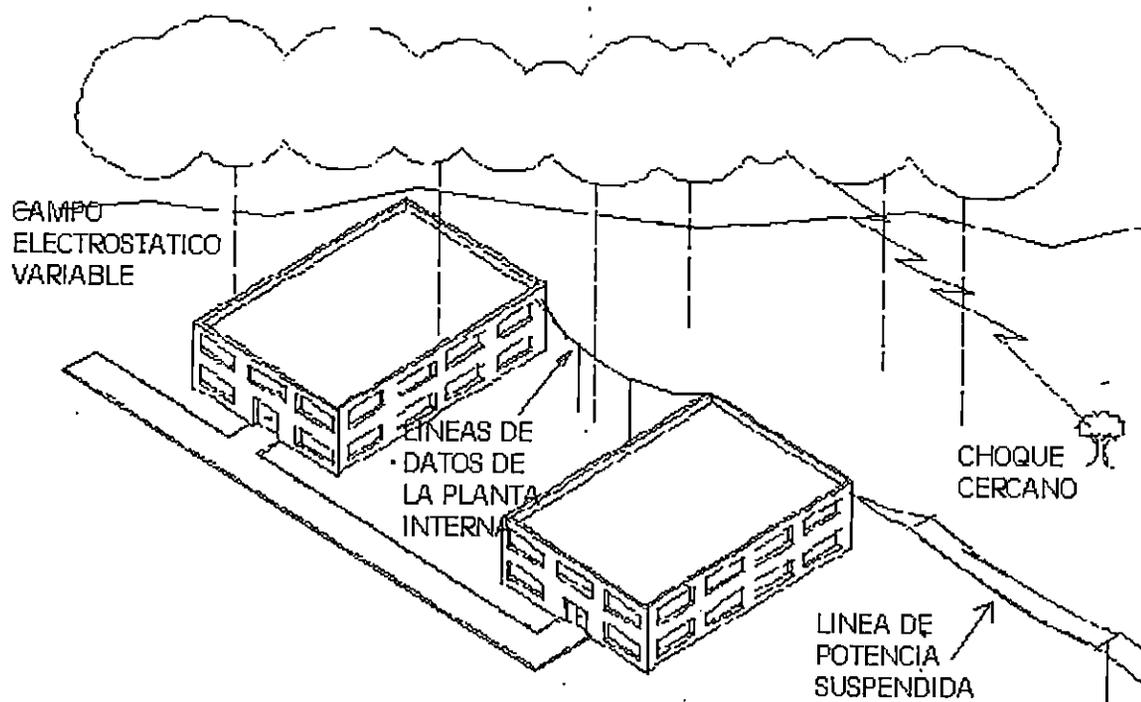
- Corriente de retorno (5 - 200) Kamp.
- $di/dt = (7.5 - 500)$  Kamp/mseg.
- Velocidad =  $1/3.c$  ( $c =$  velocidad de la luz)

### ***PULSOS ELECTROSTÁTICOS***

Los transitorios atmosféricos o electrostáticos son el resultado directo de la variación del campo electrostático que acompaña a una tormenta eléctrica debido a la turbulencia que en ella se genera. Muchos de los cables suspendidos cerca de la tierra se encuentran inmersos en un campo electrostático y a la vez pueden ser cargados a un potencial relativo que esta en función de la altura (veces la altura del campo de fuerza).

Por ejemplo, una línea eléctrica suspendida a una altura promedio de 10 mts. cerca de tierra en un campo electrostático promedio durante una tormenta eléctrica tomará un potencial de entre 100 Kv y 300 Kv con respecto a tierra. Cuando la descarga del rayo ocurre (choque), esa carga se mueve hacia abajo de la línea buscando un camino hacia tierra. Muchos equipos conectados a las líneas suministran y facilitan un camino requerido a tierra, a menos que este camino este propiamente protegido, si no este será destruido en el proceso de suministrar un camino de neutralización. Este fenómeno es conocido también como *transitorios inducidos atmosféricamente*. La elevación y la caída del voltaje electrostático esta también relacionado al pulso electromagnético (EMP).

De acuerdo a la teoría del campo electromagnético, las cargas estáticas se construyen sobre la superficie de la nube y de muchos objetos altos que se encuentran sobre la tierra, las densidades de cargas estáticas producidas, son proporcionales a las magnitudes de estos campos magnéticos. Las altas densidades de carga, los altos riesgos de una finalización de un descendente paso del líder (choque del rayo a tierra), un objeto metálico erigido (por ejemplo un asta de bandera, una torre de radio o televisión, o un objeto cualquiera muy alto sobre la tierra), especialmente esos que tienen puntos cortos, están inmersos en estos campos los cuales tienen una considerable diferencia de potencial con respecto a tierra. Si el objeto no está aterrizado, este puede causar chispas, y en algunas localidades peligrosas este puede iniciar el fuego o trastornar el equipo electrónico sensible como redes de computadoras, sistemas de comunicaciones, de datos, de habla y voz.



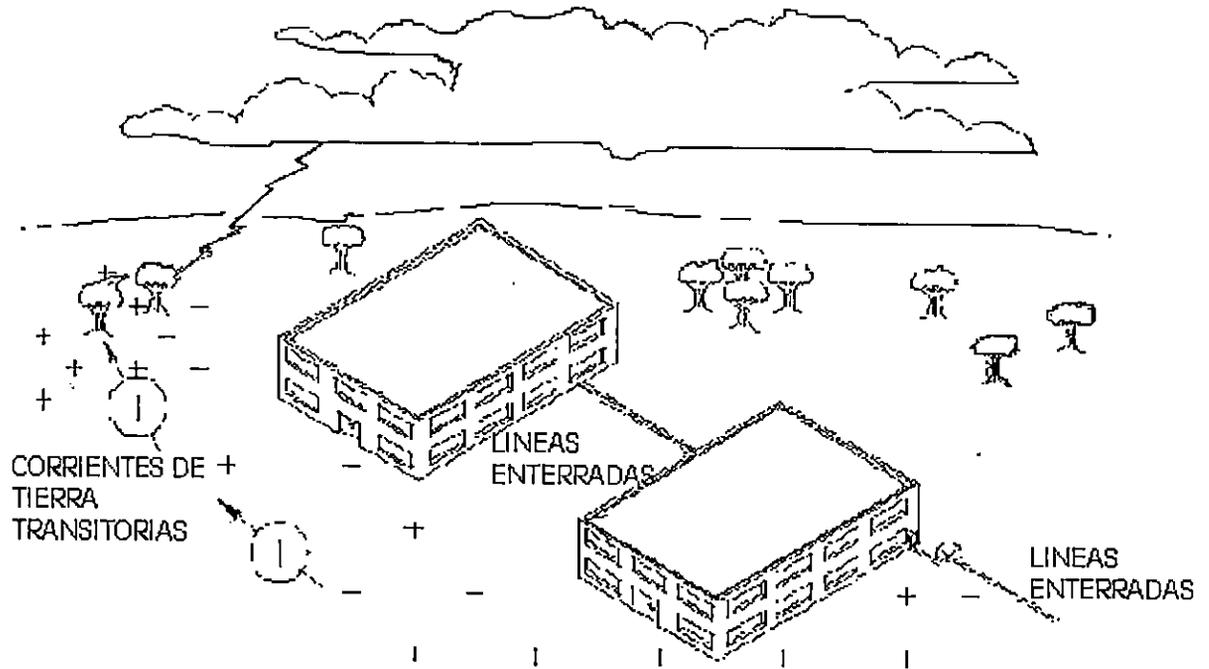
*Figura 17. Pulsos electrostáticos*

De acuerdo a la teoría del campo electromagnético, las cargas estáticas se construyen sobre la superficie de la nube y de muchos objetos altos que se encuentran sobre la tierra, las densidades de cargas estáticas producidas, son proporcionales a las magnitudes de estos campos magnéticos. Las altas densidades de carga, los altos riesgos de una finalización de un descendente paso del líder (choque del rayo a tierra), un objeto metálico erigido (por ejemplo un asta de bandera, una torre de radio o televisión, o un objeto cualquiera muy alto sobre la tierra), especialmente esos que tienen puntos cortos, están inmersos en estos campos los cuales tienen una considerable diferencia de potencial con respecto a tierra. Si el objeto no está aterrizado, este puede causar chispas, y en algunas localidades peligrosas este puede iniciar el fuego o trastornar el equipo electrónico sensible como redes de computadoras, sistemas de comunicaciones, de datos, de habla y voz. [ 2 ]

### **CORRIENTES DE TIERRA**

Los transitorios de corrientes de tierra son el resultado directo de los procesos de neutralización que siguen la finalización del rayo. El proceso de neutralización está acompañado por movimientos en la carga a lo largo y cerca de la tierra, la localización donde la carga fue inducida y en el punto donde el impacto o choque del rayo finalizó.

Muchos conductores enterrados con o cerca de la carga, suministran un camino más conductivo donde este fue inducido a un punto cercano al término del choque. Además se induce un voltaje en estos conductores que están relacionados con la carga y también están relacionados a la proximidad de los choques finales.



**Figura 18. Transitorios de corrientes de tierra**

A este voltaje inducido le es llamado **“transitorio de corriente de tierra”**. Estos podrán ser encontrados en alambres, tuberías de agua u otras formas de conductores. Si los cables están acorazados, entonces el cableado interno experimenta la primera derivada del flujo de corriente. Como el proceso de la descarga es rápido (20  $\mu$ seg) y la razón de elevación es a pequeños picos de 50 nanosegundos, entonces el voltaje inducido será muy alto, por lo tanto la finalización del choque de retorno del rayo sobre la tierra puede causar los siguientes efectos:

- Esta puede causar arqueo a través de la tierra que se encuentra adyacentes a tuberías de agua potable o de gas, cables y sistemas aterrizados, 50 Kv de gradientes de ruptura son usualmente asumidos.
- Las ondas de corriente son acopladas por tierra, por lo tanto se acopla por la tierra de los equipos electrónicos y en el cual causa una no uniforme distribución del punto de referencia de tierra sobre el sistema aterrizado. Por ejemplo, dos bornes de 10 mts con

una resistencia de aterrizaje de 31.18 ohms están separados por 5 metros, por lo tanto unos 75 amperios de corriente serán inyectados sobre una de las varillas, las otras tendrán una elevación del voltaje de aproximadamente 188 voltios.

### ***CARGAS LATENTES (Bound charge)***

La causa más común de estas cargas latentes, esta relacionado al problema de las estaciones de petróleo, donde este fenómeno secundario del rayo produce fuego, y donde es conocido como " Bound charge y arqueo en el secundario " (BC/SA). Para comprender el riesgo de los BC/SA, es necesario comprender como las cargas latentes son formadas y como este fenómeno produce un arqueo en el secundario de las redes de distribución, y su correspondiente producción de fuego. En el interior de la nube de tormenta se induce sobre toda la base de la nube una carga, esta carga (en amperios - segundos) latente generada por lo tanto está relacionada a la carga en el interior de la tormenta. Desde que los productos del petróleo se almacenan en contenedores metálicos, esos contenedores y otros toman una carga y un potencial relativo a tierra. En las redes secundarias estas producciones de chispa y arqueos pueden producir variaciones en el voltaje suministrado, por lo que, si un equipo se encuentra conectado sin protección alguna, este está propenso a sufrir daños no considerados.

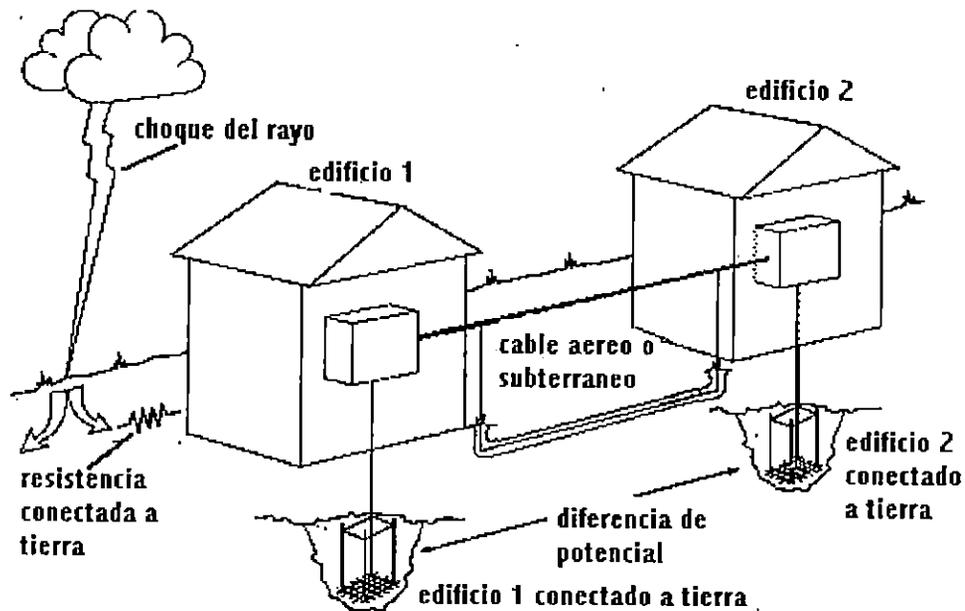
Como la tierra es normalmente negativa con respecto a la ionosfera, cuando una parte de la carga de la tormenta interviene entre ésta y la tierra, entonces la carga inducida positiva reemplaza a la carga negativa normalmente con una muy alta carga positiva. Los tanques contenedores que se encuentran bajo una tormenta (que es el ejemplo más clásico para explicar este fenómeno) se encuentran a un potencial de tierra, el cual es igual a los alrededores, antes de los choques de rayos positivos, pero instantáneamente negativo después del choque. El arco secundario resulta en este caso del pronto arrebató del cambio de la carga (20  $\mu$ seg) de las paredes del tanque y los estados o no cambiados de los productos contenidos en esta carga. Muchas formas de aterrizaje pueden emplear una influencia no significativa sobre el potencial BC/SA y muchas formas convencionales de protección que no pueden prevenir estos fenómenos, porque allí no existe un camino disponible para la descarga. La razón es que los tanques y los puntos de toma de tierra no están al mismo potencial antes del choque del rayo. [ 2 ]

### ***2.3 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LAS LÍNEAS SECUNDARIAS***

Conociendo los efectos secundarios que acompañan a una descarga eléctrica, y los que se producen en la atmósfera con características electromagnéticas, entonces podemos enumerar los efectos que producen en las redes secundarias de distribución una descarga eléctrica; analizando cada uno de los efectos por separado tenemos:

- Con respecto a los Pulsos electromagnéticos, estos inducen voltajes en las líneas secundarias suspendidas y el cableado interno de una planta u edificio, provocando de esta manera variaciones en magnitud del voltaje en el sistema que ésta alimentando. Estas variaciones que se inducen son debido al fuerte campo magnético generado bajo la nube de tormenta. Y como ya se mencionó, los pulsos electromagnéticos son los que producen e inducen en las líneas de distribución secundarias disturbios que ocasionan daños a equipos electrónicos que son de naturaleza electrónica muy sensible. Esta inducción del voltaje en las líneas se logra concretizar cuando se completa la descarga del rayo, ya que en el hilo conductor de plasma (parecido a un alambre que se encuentra conectado en sus extremos a una fuente) formado entre la nube y tierra, pasa una corriente la cual forma un campo magnético muy fuerte, es entonces cuando por inducción se inyecta a los tendidos de cables secundarios y primarios corrientes que producen en estas variaciones del voltaje provocando por consiguiente fluctuaciones en las líneas.
- En segundo lugar tenemos los disturbios provocados por los pulsos electrostáticos, que es el más dañino de los efectos secundarios listados. Esta peligrosidad se debe a que las cargas se acumulan sobre distintos cuerpos metálicos, edificaciones, arboles, torres para radio y televisión, equipos cualesquiera, líneas de transmisión y de distribución tanto primaria como secundaria, y hasta en personas. La causa más común que provocan éstas cargas estáticas acumuladas en los cuerpos en general son chispas o arcos que saltan entre los equipos y tierra, este salto de arcos puede causar incendios en lugares donde se almacenan materiales inflamables, explosiones, y otros, pudiendo resultar muchas veces con pérdidas de vida. En equipos electrónicos puede causar choques eléctricos dentro de las etapas de que consta el dispositivo, los cuales no están preparados para soportar disturbios tan rápidos, dañando por consiguiente al mismo, Debido a sus diseños demasiado complejos electrónicamente hablando, estos equipos son muy sensibles a cualquier disturbio de esta naturaleza.
- Luego tenemos las corrientes de tierra (Current Eart), la cual no es mas que la corriente que circula por la propia tierra cuando la descarga de un rayo tiene lugar en las proximidades de la planta o estructuras o sobre ellas. En la figura 19 se muestra este efecto. En la figura se observa como una descarga del rayo que desciende a tierra y choca con esta, induce una corriente en la superficie de la tierra, la cual circula viajando hasta un lugar donde pueda drenarse a un potencial que se encuentre más cercano a cero o viajar por algún equipo que se encuentre en su camino y que le proporcione el camino buscado. Estas corriente circulando por tierra pueden llegar a la circuitería electrónica de los equipos, pudiendo dañarlos y además puede golpear al usuario de estos sistemas (maquinas), si es que la intensidad de esta corriente del rayo es lo suficientemente fuerte o intensa como para provocarlo.
- Los Bound Charge o cargas latentes, son en alguna medida las causantes de provocar daños al sistema secundario, este daño puede suceder por medio del salto de arcos entre estas líneas de electricidad, por ejemplo arqueo entre líneas del secundario que

no es mas que el salto de una chispa debido al fuerte magnetismo registrado bajo la tormenta eléctrica. Este efecto también está ligado a la energía estática existente bajo la nube de tormenta.



*Figura 17. Golpe de una descarga eléctrica en tierra*

Todos los efectos antes mencionados, inducidos directa o indirectamente, producen en las líneas secundarias efectos no esperados tales como: variaciones en el voltaje de alimentación, saltos de arcos debido a la estática, inducción de corrientes en las superficies de la tierra y además causan arqueos entre las líneas del tendido secundario. Es por estas razones que no deben de pasar desapercibidos al ojo humano, por que son la causa de la mayor producción de daños cuantiosos en equipos sensibles electrónicos y pérdidas de vida. Aunque estos fenómenos no son visibles, ellos son capaces de dañar en forma irreversible un equipo determinado o que este cumpliendo una función de trabajo muy especial (por ejemplo en un hospital).

## CAPITULO III

### **3 *NORMAS INTERNACIONALES PARA LA PROTECCIÓN DE EDIFICACIONES Y EQUIPOS ELECTRÓNICOS DE GRAN SENSIBILIDAD A FENOMENOS ELECTROMAGNETICOS.***

La peligrosidad de las descargas eléctricas (rayos) debido a sus efectos primarios y secundarios, han producido reacciones en el área de la Ingeniería Eléctrica, reuniendo sociedades para investigar la manera mas segura de diseñar dispositivos y normas que puedan contrarrestar estos efectos, minimizándolos hasta el punto de no causar daños a los sistemas. Aunque el rayo es un fenómeno natural de una muy difícil predicción (fenómeno aleatorio), la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), IEEE (Instituto de Electricidad e Ingeniería Electrónica), NPFPA (Asociación Nacional de Protección contra Incendios), ANSI (Instituto Nacional Americano de Estándares), NF (normas francesas para protección del rayo con el uso de pararrayos), UL (Laboratorio de garantía o asegurador), NEMA (Asociación de Fabricantes de Estandares Nacionales Eléctricos) y otros, están interesadas en elaborar normas que ayuden al diseño de sistemas que protejan equipos con características electrónicas, así como mecánicas, ya sea que los protejan desde el aire (antes que choquen las descargas de los rayos en la estructura que se protege), como también a los disturbios inducidos vía la tierra de los sistemas, siempre provocados por estas descargas atmosféricas.

Las investigaciones realizadas por estas sociedades sobre el fenómeno del rayo y tomando en cuenta su difícil estudio por la aleatoriedad que este posee, han logrado obtener los frutos deseados, desarrollando normas que son para uso internacional y que han ayudado en gran medida a detener los efectos que conllevan la descarga de un rayo. Sin embargo, la decisión de cual norma usar queda a criterio del diseñador, además el diseñador toma la decisión que tanto desea proteger la infraestructura, a los ocupantes y a los diferentes equipos instalados dentro de ella. Además, como ya se mencionó, deberá de tomar en cuenta el tipo de equipo que se instalará dentro de la planta (es decir si este es de características sensibles a los disturbios o sensibles a problemas en la red de suministro).

Otro punto muy importante que el diseñador deberá tomar muy en cuenta, es el nivel isoseaunico del lugar donde se ubicará la planta u otro tipo de infraestructura, este dato no debe de pasar inadvertido por que le puede ayudar a evitar el incurrir en gastos no muy necesarios en la adquisición de equipos de protecciones especiales para la protección de la estructura. El mapa de niveles isoceraunicos por definición es el que nos muestra la cantidad de rayos que caen en el lugar de observación por año o el que nos muestra el nivel de exposición eléctrico de la zona, la información que este mapa nos proporciona y los cálculos realizados tomando en cuenta las normas, nos podrían indicar

el no utilizar protecciones extras o el sobredimensionamiento, de esta manera no se incurrirá en sobregastos en la compra de equipo de protección extra para la planta.

En boletines de aplicaciones de la IEEE se proporciona una guía que se podría seguir para analizar la susceptibilidad de ser dañada una planta debido a variaciones electromagnéticas provocadas por el rayo, estos pasos recomendados a seguir son:

- *Primero se debe de conocer el nivel de exposición eléctrico* (Nivel isoseraunico) de la zona y verificar las condiciones en que se encuentra la resistividad de la tierra (cuantos ohmios) del lugar. Se debe de realizar este paso porque la probabilidad de sufrir daños depende en gran medida de la resistividad de la tierra y del número de tormentas ocurridas por día en el lugar de observación. Una mala resistividad de la tierra en el lugar donde se edificará la planta tendería a traer consecuencias desastrosas para ella. Un método muy usado para determinar la resistividad de la tierra es el llamado "*método de los cuatro terminales*".
- *Otra recomendación a tomarse en consideración es la medida de la planta* (dimensiones), una planta pequeña según investigaciones de campo realizadas son menos susceptibles a que sea alcanzada por un rayo (el área construida es pequeña). Además una planta grande posee grandes longitudes de cables por lo que es más posible que se induzcan transitorios mayores por la fuerte estática que se registra bajo la nube de tormenta, mientras que para plantas con dimensiones pequeñas se puede dar lo contrario. Por lo tanto al diseñar una estructura civil se debe de construir pensando en y como podría evitarse que un rayo o descarga eléctrica choque contra la estructura.
- *La densidad de la estructura* es otro parámetro a tomar muy en cuenta, las grandes cantidades de acero utilizado pueden contribuir a reducir grandemente los efectos del rayo, debido a que esta mayor densidad del acero colocado en la planta suministra un mayor número de caminos hacia tierra. Pero no se debe de olvidar que el poseer grandes cantidades de acero y la altura de la estructura aumentan por lo tanto la posibilidad de que un rayo choque contra esta, además existe la posibilidad de ser menos dañada cuando la descarga de un rayo tiene lugar, el cual es el objetivo buscado.
- *La cuarta área toma en cuenta la investigación del tipo de instrumentos o equipos que se instalarán en la planta*, específicamente se necesita conocer las especificaciones técnicas de estos equipos, ya que ellas nos indican un límite en sus parámetros de funcionamiento eléctrico. Generalmente esto se debe de realizar porque las nuevas plantas tienen mas instrumentos electrónicos operando con bajas señales, los equipos digitales requieren mucha mayor atención. Los equipos electrónicos actuales están diseñados para operar a niveles muy altos y bajos transientes, las

velocidades de trabajo son altas, esta complejidad de fabricación los hace más susceptibles a transitorios y a fallas.

- *Se deben de investigar el grado de protección* que se desea instalar en la planta, por que bajo una tormenta eléctrica casi es seguro de que puedan darse problemas en la infraestructura eléctrica debido a la estática de las líneas, objetos altos dentro de ella (torres, astas de banderas, etc. ). Si el grado de protección es bajo estará mas expuesta a daños por los efectos secundarios que arrastra la tormenta eléctrica.
- *Y una última recomendación a considerar es la construcción práctica para los cables e instrumentos* instalados en la infraestructura. Es decir, se deben de tomar muy en cuenta la construcción del cableado, si es con tubería plástica o con tubería galvanizada u otra que este registrada en las normas existentes para realizar instalaciones eléctricas especiales y otras consideraciones como la proximidad de estos con tuberías de agua o estructuras de metal adyacentes.

Las recomendaciones que el Instituto de Electricidad e Ingeniería Electrónica (IEEE) a desarrollado, son para la protección en general del sistema eléctrico de una infraestructura, así como también la propia estructura civil contra los disturbios provocados por maniobras en las líneas de distribución o por disturbios generados por una descarga atmosférica, y sus efectos asociados a ella. Existen otras normas que son de carácter general y que ayudan a contrarrestar también los daños que el rayo puede causar en las edificaciones y en los equipos electrónicos sensibles a disturbios que se dan dentro de la planta o una estructura cualquiera. [ 4 ]

En las manos del diseñador estará en tomar la decisión de sí protege o existe la necesidad de proteger la estructura por aire usando pararrayos, y por tierra usando redes especiales. Se escogerán las normas mas recomendadas y confiables a usar, y la utilización de ellas dependerá del nivel de protección deseado o el nivel necesario para su protección. Para proteger la estructura desde el aire, se utilizan los ya conocidos pararrayos o Puntas Franklin (existe una gran variedad de ellos), y por tierra se utilizan dispositivos de estado sólidos, así como otros tipos de estructuras construidos para tal fin, tales como: redes de tierra, reguladores de voltaje, redes supresoras de ondas (eliminan picos de voltajes), y otros. Cada uno de estos dispositivos protege un área específica, cubren un disturbio en particular, y también son dispositivos completamente independientes uno del otro.

Las normas que a continuación se enumeran, están diseñadas para la protección de infraestructuras, equipos electrónicos (sistemas de computadoras, equipos de telecomunicaciones, o en general equipos muy sensibles a cualquier disturbio), etc.

Dentro de estas normas está la (IEEE/NFPA 141- 1991) que proporciona las bases necesarias para el diseño y protección de una planta en general. Esta toma las recomendaciones hechas por otras normas de la IEEE/NFPA y las usa como referencias para tomar decisiones de carácter técnico en el diseño dependiendo del área en que interesa colocar la protección, como ejemplo de ello tenemos que si la red de tierra es la que se está diseñando entonces se debe de usar la norma 142 de la IEEE/NFPA, esta toma en cuenta todos los pormenores que están asociados y ligados entre sí al diseño de las protecciones (construir un buen sistema de aterrizaje o conexión a tierra), cubre desde la entrada del servicio hasta el último detalle eléctrico dentro de la planta.

### **3.1 LA NORMA NFC-102 (CALCULO DEL PARARRAYOS)**

La norma NFC - 102, es una norma francesa hecha con el fin de proteger las edificaciones del peligro de ser impactadas por la descarga de un rayo. Esta norma nos ofrece las bases y criterios necesarios para obtener una mayor efectividad en el cebado de la corriente asociada a la descarga del rayo, siendo esta (norma NFC-102) muy usada para proporcionar un mejor camino a tierra de la corriente del rayo, y evitar que haga impacto en el lugar donde este dispositivo esta encomendado a proteger. Para que esta norma sea efectiva necesita del conocimiento de la carta de niveles isoceraunicos para el ofrecimiento de alternativas de solución. El conocimiento de las descargas que hacen impacto en el lugar de observación, así como la densidad de estas, puede ser obtenido directamente de este mapa. Para el calculo utilizaremos el mapa de niveles isoceraunicos de El Salvador el cual fue elaborado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador. La norma francesa (NFC-102) en su contenido, nos proporciona información precisa de cuando una determinada estructura podría necesitar del uso de los pararrayos o no, además nos indica si se necesitan protecciones adicionales (nivel de protección requerido según el diseño) tales como una buena red de aterrizaje u otros dispositivos que ayuden a disminuir los disturbios en los sistemas electrónicos de gran sensibilidad, tomando en cuenta todos los parámetros necesarios para ofrecer una excelente protección. Dependiendo del equipo instalado en la planta, esta norma nos proporciona la información para determinar si existe la necesidad de ocupar dispositivos extras para la protección de estos y de la planta.

No se debe de olvidar que toda norma tiene como base principal la protección de las personas. La norma es general en su uso, y puede usarse tanto en el campo como en la ciudad, su eficacia dependerá por lo tanto de la experiencia del diseñador. Cuando se haga uso de esta norma, no debemos de olvidar el nivel de protección que deseamos tener, para ello deben de conocer el equipo a instalar con todas las especificaciones técnicas de estos (tendrán mayor prioridad equipos sensibles como ordenadores, equipos electrónicos de gran valor o irremplazables), cercanías de edificios continuos, sus elevaciones y además con mayor importancia conocer si la estructura a proteger tienen partes salientes (como antenas de radio, astas de banderas y otros), debe de saberse si

habrá dentro de la estructura materiales con características muy flamables, conocer si cerca de la estructura pasan líneas de alta tensión que puedan influir en el trayecto de la descarga y otros como conocer el ambiente natural donde se instalará la planta, es decir si es un ambiente corrosivo.

De todos los puntos a considerar al utilizar esta norma (NFC - 102), deben de tomarse en cuenta los puntos más vulnerables de la estructura como lo son: las partes salientes, canalones, tuberías, aristas y cumbreras, las masas metálicas (como extractores de aire, barandillas, etc.), cajas de escaleras y locales técnicos sobre el techo y en terraza.

### **3.2 *NORMAS PARA LA PROTECCIÓN DE DISTURBIOS EN SISTEMAS SECUNDARIOS (proporcionadas por la IEEE)***

Los disturbios en los sistemas de alimentación secundarios durante una tormenta eléctrica están presentes aunque no los deseemos (no tenemos dominio sobre ellos) y aún son más evidentes cuando la descarga del rayo tiene lugar y peor aún cuando este choca contra la red primaria directamente o más cuando lo hace en la red secundaria para lo cual no existe protección alguna que detenga el daño que le causará a esta.

Cuando la descarga de un rayo choca en la red primaria se induce un voltaje mayor al establecido en la línea, por lo tanto este voltaje inducido viaja a lo largo de la red hasta encontrar un punto donde disiparse y muchas veces lo hace en puntos donde se encuentran instalados los transformadores de distribución, absorbiendo gran parte del disturbio el pararrayos (conocidos como lightning arrester, y su función es la de atenuar gran parte del disturbio generado en este caso por la inducción de transientes sobre la línea por los pulsos electromagnéticos generados por la descarga del rayo) que protege al transformador, y la otra parte del disturbio que logra acoplarse a la red secundaria, llegando de esta manera a los equipos instalados cerca de donde el disturbio tubo lugar; o se transmiten a la red secundaria por inducción directa debido a la fuerte estática que se genera por la presencia de la tormenta eléctrica en el lugar. Si los equipos instalados no están debidamente protegidos se dañaran y por consiguiente habrá pérdidas de los equipos y también las habrá del tipo económico.

Por todo lo antes mencionado, es que sociedades como la IEEE, la NFPA y otras organizaciones han diseñado normas que ayudan a que este fenómeno atmosférico pueda ser controlado (en un porcentaje bastante elevado), o llevarlo a un punto donde el efecto dañino que lo acompaña no sea capaz de provocar daños considerables a los sistemas primarios y secundarios de distribución de la energía eléctrica. Dentro de estas normas o recomendaciones tenemos las siguientes:

- ANSI/NFPA 75 - 1992 (Alambrado y aterrizado de cuartos de computo)

- IEEE STANDARD 141 - 1993 (Distribución de Potencia Eléctrica para plantas Industriales).
- IEEE STANDARD 1100 - 1992 (Potencia y aterrizaje de equipos electrónicos sensibles a disturbios)
- ANSI/NFPA 780 - 1992 (Zonas de protección contra rayos y usos de pararrayos)
- IEEE STANDARD 142 - 1991 (Recomendaciones prácticas para sistemas de potencia industriales y comerciales)
- ANSI/NFPA 70 - 1993 (Código Eléctrico Nacional)
- UL 497 - 1991 (protección contra disturbios en sistemas de telecomunicaciones)
- IEEE STANDARD C62.41 - 1991 (Recomendaciones prácticas sobre disturbios en bajo-voltaje en circuitos de potencia de corriente alterna)

#### **ANSI/NFPA 75-1992 [Alambrado y Aterrizado de Cuartos de Computo]**

Como la norma lo indica, esta cuida que las conexiones a tierra de los cuartos de cómputos sea el adecuado de acuerdo a los requerimientos exigidos, cumpliendo además con las exigencias del NEC (artículo 645). Además suministra definiciones específicas del alambrado e interconexión de cables y otros usados en el diseño de cuartos de computo o que están directamente relacionados a áreas de soporte técnico. Por o tanto si deseamos una sólida tierra, el seguir esta recomendación nos puede llevar a conseguirlo con un gran porcentaje de confiabilidad. [ 6 ]

#### **IEEE/NFPA 141 - 1991 [Distribución de Potencia Eléctrica para Plantas Industriales]**

Esta norma contiene la información completa y necesaria para la elaboración del diseño de una planta, contiene todas las recomendaciones necesarias así como parámetros que son de mucha ayuda para el diseño. Contiene recomendaciones desde como planear una obra, el nivel de voltaje recomendado para el equipo que se va a instalar, la red de tierra optima para el sistema en general, protecciones aéreas con el uso del pararrayos,

protecciones con redes especiales, la construcción mas adecuada del cableado (desde la acometida principal hasta la más mínima conexión utilizada), protecciones contra disturbios o variaciones, protecciones contra cortocircuitos, etc. Cada una de estas normas se encuentran en la colección de colores de la IEEE, a excepto de algunas que son propias de la norma 141 de la IEEE mencionada. Entonces, si seguimos muy de cerca esta norma, puede estar seguro que el diseño elaborado tendrá todos los requerimientos buscados, como confiabilidad, seguridad, y calidad.

Con todo estos requerimientos bajo norma, quedarán protegido tanto por aire como por tierra. No debemos de olvidar que si la descarga del rayo cae directamente sobre el sistema secundario, no existe protección alguna que detenga la destrucción, dañará todo a su paso, principalmente las protecciones. Es por esa razón que esta norma esta basada en las protecciones en general, no queda fuera el más mínimo detalle.

Si se siguen al pie de la letra los requerimientos que la norma pide y agregando la experiencia del diseñador, entonces el diseño contendrá las expectativas buscadas la cual es la de salvaguardar vidas humanas como principal objetivo así como proteger la planta o edificio ya sean estos de tipo habitacional, industrial, comercial o del tipo clínico (hospitales). [ 5 ]

**IEEE STD 1100-1992                    [Diseños Recomendados / Instalaciones Prácticas]**  
(Es parte de la norma IEEE STD 1100-1992).

Esta norma ofrece requerimientos para proteger modernos equipos electrónicos, instalaciones, prácticas de mantenimiento para potencia eléctrica, control de ruido en señales, construcción de redes de tierra especiales para la protección de estos sistemas sensibles a disturbios inducidos. Estos requerimientos generales son los necesarios para obtener los niveles adecuados de funcionamiento de cargas electrónicas sensibles con los confines de códigos aplicables, estándares y regulaciones. Existen muchos casos donde más que un funcionamiento y/o alternativa de niveles de seguridad es necesario, es entonces cuando existe la necesidad de la utilización de otros códigos. El uso exclusivo de equipo electrónico y eléctrico están cubiertos por pruebas de seguridad.

Por lo tanto, esta norma recomienda:

- Respecto al funcionamiento, todos los equipos y sistemas instalados y tierra no deben de tener incompatibilidades, cuando esto ocurriera deberán de requerir seguridad y tomar precedentes del funcionamiento del equipo.
- Que los sistemas monofásicos y trifásicos así como las cargas conectadas, debe de tenerse el cuidado de no conectar el equipo a derivaciones en la fuente de potencia interna u otros ajustes ya que esta práctica puede ocasionar cambios en el nivel del

voltaje. Debe de considerarse además la decisión de usar una fuente monofásica o una trifásica, ya que las derivaciones de una potencia trifásica no son muy prácticas. Ciertos métodos de conversión a circuitos monofásicos para suministros trifásicos en las cargas son inapropiados para cargas electrónicas, podrían provocar daños cuantiosos y por consiguiente considerables. El no permitir este tipo de conexiones es por la inestabilidad que estos ocasionan cuando se dan disturbios en las líneas o por conexiones no muy usuales o por equipos con características de funcionamiento diferentes (equipos que podrían introducir ruidos a los sistemas de potencia).

En cuanto al nivel del voltaje utilizado, se recomienda que posean su propia red de tierra, alambrado independiente (conexiones dedicadas), ventilación propia y adecuada a las condiciones climáticas del equipo a instalar y otras, son algunas de las recomendaciones que se deben de seguir para la conclusión de un buen diseño que conlleve las expectativas buscadas para la elaboración del proyecto, y de esta manera proteger a los equipos de disturbios atmosféricos provocados por las tormentas eléctricas. No debe de perderse de vista que el objetivo principal es el suministrar un consenso de práctica recomendados en el área donde existe información conflictiva, confusión, etc.

#### **ANSI/NFPA 780- 1992 [Zonas de Protección Contra Rayos y Usos del Pararrayos]**

Esta norma fue elaborada con el fin de crear zonas de protección que ayuden a desviar la atención de la descarga eléctrica. Evalúa además los riesgos tales como: ocupación de humanos, factores estructurales que afectan la seguridad, el grado de exposición deseado, contenido importante (piezas históricas, equipos electrónicos muy importantes como los instalados en hospitales, etc.), la frecuencia de las tormentas, y otros de gran importancia en la elaboración del diseño. Además se incluye una pequeña reseña de los diferentes pararrayos que se utilizan para la protección de plantas o edificaciones comerciales y habitacionales. Dentro de los pararrayos mencionados en esta norma están: las puntas franklin simples, los ionizadores, los pararrayos eliminadores y las jaulas de faraday. No se debe de perder de vista que esta norma se orienta a la protección de los equipos electrónicos sensibles por su naturaleza constructiva. [6]

#### **IEEE/NFPA 142 - 1991 [Recomendaciones prácticas para sistemas de potencia industriales y comerciales]**

Esta norma ofrece las recomendaciones básicas para desarrollar las protecciones necesarias para resolver los problemas de conexiones a tierra, conexión a tierra del neutro o en media derivación de una fase. Además se ofrece información de cuando un sistema deberá de estar aterrizado, y la selección del equipo para su posterior conexión a tierra, para salvaguardar los sistemas de potencia instalados en la planta. Cubre además

secciones para proteger estructuras de los rayos, ventajas y desventajas de los sistemas conectados a tierra, como obtener una baja resistencia, uso de conductores de rayos, conexiones a tuberías de agua, y otros. Posee un apartado donde cubre la generación de las cargas estáticas y donde se suministran los métodos para salvaguardarse de este fenómeno (descarga de los rayos) por conexiones a tierra y por otros métodos. Debe tomarse en cuenta que la protección de los rayos es esencial para la protección de los edificios, líneas de transmisión, equipos electrónicos sensibles a la descarga de los rayos y transitorios generados. Cada sección contenida en esta norma siempre tiene presente el proteger todo el edificio en general de cualquier clase de disturbio. [ 7 ]

#### **UL 497-1991 [Protección de Disturbios en Circuitos de Telecomunicaciones]**

En las redes de telecomunicaciones modernas tanto voz como datos se combinan, por lo que se han hecho los esfuerzos para asegurarse que estén apropiadamente protegidas por sistemas sólidos de tierra, y otros dispositivos tales como supresores de ondas generadas por sobrevoltajes en las líneas y otros disturbios que se inducen por diferentes causas, ya sea por destellos o rayos producidos por tormentas eléctricas o provocados por causas no naturales. Esta norma cuida que estos sistemas de telecomunicaciones esté debidamente protegidos y acorazados. Las normas desarrolladas para la protección de estos equipos, velan por la seguridad de estas instalaciones, atenuando en gran medida el que estos fenómenos electromagnéticos les ocasionen daños internamente a estos equipos.

Además esta norma proporciona los detalles más mínimos que deben de cumplir todos estos circuitos para su perfecto funcionamiento, también ofrece detalles tales como alimentación del voltaje, su red de tierra, conexión del cableado, condiciones climáticas bajo la cual la planta instalada debe de estar trabajando, el tipo de protección más conveniente para la planta (según el modelo, aunque el fabricante proporciona la protección mas adecuada al equipo, ellos las proporcionan o vienen adheridas a este), etc. Por lo tanto, indica que la elección del dispositivo protector de los disturbios a ser instalado deberá ser diseñado y probado, y que dependerá del tipo de circuito de telecomunicación usado. Esta norma desarrollada proporciona toda la información para la protección de redes telefónicas o de telecomunicaciones en general.

#### **IEEE STD C62.41 - 1991 [Recomendaciones Prácticas sobre Disturbios del Voltaje en Líneas de Bajo Voltaje en Circuitos de Potencia de Corriente Alterna]**

El propósito principal de esta normativa práctica es el de suministrar información sobre variaciones en el voltaje (disturbios) en sistemas de baja potencia (con voltajes menores de 1000 voltios ( $v < 1000$  voltios)). Con la información que esta norma

proporciona, los diseñadores de equipos y usuarios pueden evaluar su ambiente de operación para así determinar la necesidad de ocupar dispositivos de protección contra disturbios generados en las líneas de bajo voltaje. Además esta norma esta cimentada por datos de campo obtenidos tanto de empresas industriales, comerciales, residenciales, etc.

Esta norma ha sido elaborada sobre bases sólidas, toma para su estudio un período de tiempo de un medio ciclo del periodo de la onda principal (con respecto a su duración). Se incluyen además, disturbios cuyas amplitudes, duraciones, o relaciones de cambio puedan causar daños a los equipos y a los sistemas de protección. Por todo lo antes mencionado, esta norma ofrece al diseñador los criterios suficientes para decidir que protección es la mas adecuada de usar, para tener la seguridad que disturbios de naturaleza aleatoria como los provocados por los rayos o por interrupciones en las líneas puedan causar daños en las redes de voltaje secundario catalogados en la IEEE como bajos voltajes y que se encuentran en el rango de 0 a 1000 voltios.

Mas adelante se hará una ampliación y un mejor análisis de esta norma, se logrará un mejor entendimiento si se conoce él por que, como, y cuando usar los dispositivos de protección para poder dar inmunidad a los disturbios, adecuándose a la necesidad y requerimientos de la planta industrial o cualquier edificio ya sea este comercial, residencial, financiero y otros que necesiten de la protección de equipos que son de gran sensibilidad a los disturbios provocados por la naturaleza caprichosa o por acciones de interrupción en las líneas (apertura y cierre de contactores; cortocircuitos, etc.).

Como estos disturbios (variaciones de voltaje y de corriente en forma instantánea) son provocados en la mayoría de veces por descargas atmosféricas (en la época de invierno), se le dará mas énfasis a este tipo de efecto secundario, el cual esta catalogado como uno de los que más daños causan en las redes secundarias de alimentación, los disturbios provocados por las descargas atmosféricas son los que más importancia tiene para la elaboración de este documento.

La confiabilidad de esta normativa radica, en que se basa en estudios de campo reales con la colocación de puntos específicos, es decir en ambientes diferentes donde las condiciones ambientales ayudan a cambiar las características de los disturbios, se agrega a esta norma los niveles diferentes de exposición eléctrica a que están sometidas las plantas industriales, edificios comerciales, bancarios, etc. donde la severidad de una descarga puede causar daños cuantiosos a equipos que son sensibles a variaciones de tipo electromagnéticas y otras. Las fuentes de disturbios son básicamente dos que están expuestas en esta norma y son:

- a) Los disturbios provocados por las descargas atmosféricas (uno de los objetivos principales de este documento)
- b) Los disturbios provocados por interrupción en las líneas de transmisión u otras causas desconocidas.

Cuando la fuente del disturbio son las descargas atmosféricas, esta tiene características muy peligrosas como la amplitud (si es pequeña no es peligrosa para él equipo, pero una amplitud bastante grande sí causaría muchos daños), tiempo y localización o el punto donde tubo lugar la descarga. Toda estas característica se combinan en un solo disturbio, si la amplitud es pequeña o grande, así también dependerá que tan severos sean los daños, ya que los dispositivos de potencia instalados no serán capaces de soportar las variaciones inducidas de voltaje y corriente. Por ejemplo pueden producirse picos de voltajes de hasta 20 KV o más en un tiempo relativamente rápido, o pueden producirse voltajes pequeños como de 2Kv o menos.

Por lo tanto los dispositivos protectores de estos disturbios deberán estar en la capacidad de soportar estas fluctuaciones rápidas y mantener siempre la inmunidad buscada para la protección en el lugar destinado. Para mantener la inmunidad a estos niveles de voltajes, han sido instalados dispositivos de protección para bajos voltajes, donde el sparkover de clarificación eventualmente limita el máximo voltaje del disturbio. Por lo tanto, los niveles de disturbios son influenciados por los mecanismos productores de disturbios y por los niveles de clarificación del sparkover. Es importante entonces reconocer los efectos que los dispositivos instalados en los alrededores del equipo producen, es decir que es necesario conocer el máximo nivel del voltaje y la corriente que el equipo soporta en su entrada.

En la entrada de servicio el nivel de clarificación del sparkover se limita en rangos de niveles de 8 kv el cual contrasta con los niveles de voltajes de 120 v, 240 v y 480 v, los cuales se encuentran conectados entre la fase y tierra. Sin embargo, se ha hecho la selección de 6 kv a la entrada típica, pero esto no garantiza un límite para frenar la magnitud del disturbio en sistemas de potencia interiores, a menos que encontremos el nivel al cual el equipo interno puede sufrir los desperfectos, esto quiere decir que si conocemos el nivel de variaciones máximas que soporta el equipo o sistemas existentes en la planta u otros, entonces podríamos encontrar un dispositivo tal que cumpla con los requerimientos de protección y que cumpla con el recorte de altas amplitudes producidas y llevarlas a niveles que el equipo instalado pudiera soportar.

Podría además pensarse en él poder caracterizar las protecciones de manera que juntas limiten los disturbios de una manera mucho más precisa, esta caracterización se realizaría en la entrada del servicio de la planta, tendría que estar en concordancia con todo el equipo. Por otra parte, los tiempos juegan un papel muy importante dentro de la severidad de los disturbios, mientras más pequeño sea el tiempo del disturbio, más difícil será para las protecciones él poder contrarrestar el efecto del rayo. Por lo tanto el diseñador debe de tomarlos muy en cuenta (tiempo), ya que por estudios de campo se ha llegado a encontrar que son una parte importante y real de estudios de este tipo de eventos. De investigaciones realizadas se ha encontrado que los tiempos en que suceden estos disturbios andan en el orden de 1.2 a 50  $\mu$ seg. para una onda normal, aunque puede

alcanzar los 100  $\mu$ seg. Este tiempo se toma por el tiempo en que la descarga del rayo se produce, mientras que para otro tipo de disturbios estos tiempos son mayores.

Observando estos tiempos en los rangos en que se producen las variaciones, es razón suficiente para que el diseñador de protecciones tenga mucho más cuidado en la fabricación de estos tipos de protecciones para disturbios de esta naturaleza. El rango de tiempos mostrados corresponde al tiempo en que la descarga de un rayo tiene lugar (según los estudios realizados), o el tiempo que le toma al rayo el chocar contra la superficie de la tierra u otro objeto de gran altura, por lo tanto no debe de olvidarse el colocar o elegir la protección adecuada a los requerimientos de las plantas.

De la elección de la protección ideal dependerá la inmunidad del área a proteger, deberán también estas protecciones soportar tanto las amplitudes así como las variaciones del tiempo y fuerza con que el disturbio se presentan y así asegurar el buen funcionamiento de estos sistemas usados para salvaguardar el equipo y los diferentes sistemas instalados.

La ubicación de la planta u otro tipo de infraestructura, debe de elegirse adecuadamente por la razón de que los niveles de exposición eléctrico varían de acuerdo al área y localización geográfica, aunque si la planta se ubica en el sitio elegido por razones de estrategia o por que en el estudio realizado tiene todo el aval para su construcción, entonces no hay más que realizar los estudios correspondientes a la manera más óptima para su protección. Es en esta situación es cuando se hace necesaria la utilización de la carta de niveles isoceraunicos, nos ayudan a tomar la decisión de los niveles de protección más recomendado a usar, aunque la norma NFC-102 nos ayuda aún más a tomar estas decisiones. La razón de usar el mapa de niveles isoceraunicos es por que nos muestra los niveles eléctricos de El Salvador, estos niveles varían de lugar a lugar. En nuestro país (El Salvador), existen zonas en las que el nivel isoceraunicos es elevado (alto nivel de exposición eléctrico) mientras que en otros es bajo (bajo nivel de exposición eléctrico). Debido a estas variaciones en los diferentes puntos de ubicación en los niveles de exposición eléctrico, es la razón por lo que la IEEC los ha clasificados como:

- **Nivel de baja exposición:** Esta es un área de baja exposición de rayos, es parecido a pequeñas cargas capacitivas o pequeñas interrupciones en las líneas.
- **Nivel de exposición media:** Este es un nivel con una actividad de rayos no muy intensa, un nivel moderado que poseen transitorios significantes. Ambos o solo una de las cargas puede estar presente, su monitoreo es muy difícil y por consiguiente afecta la lectura de estos disturbios.
- **Nivel de alta exposición:** Este es un nivel donde la cantidad de descargas que caen debido a una tormenta eléctrica es muy intenso, aunque estos niveles altos muy raras veces ocurren, no se podrían descartar que alguna vez pudieran ocurrir.

Debe de recordarse que los niveles de exposición a los disturbios eléctricos dependen del tipo de fuente que esta involucrada o que ha creado el disturbio. Por lo tanto, podemos decir que la frecuencia de ocurrencia y el nivel de los rayos esta influenciada por los niveles isoceraunicos, así como también por la naturaleza del sistema de distribución, y por lo antes mencionado, estos sistemas deben de estar habilitados para soportar la corriente y el voltaje inyectado por la fuente del disturbio. Sin embargo, la amplitud del voltaje de un disturbio observado en un sitio específico es dependiente sobre la interacción de la fuente y de la carga conectada con respecto al tiempo.

La impedancia características de estos disturbios es diferente para cada ambiente en particular, para bajo voltaje es típicamente de 100 a 300 ohm para configuraciones de línea a neutro y línea a línea; para configuraciones de línea a línea y tierra o línea a neutro y tierra es típicamente de 25 ohms, existen otros valores de impedancias las cuales se mostraran tabulados y caracterizados de acuerdo al nivel de exposición, estos cuadros son suministrados por los estudios de campo hechos por la IEEE en la norma C62-41 - 1991. Se agregan además otros cuadros donde se encuentran tabulados datos medidos en los estudios realizados acerca de este fenómeno, además se muestran algunas gráficas que ayudan a entender mejor la tendencia que este fenómeno muestra cuando tiene lugar.

La norma C62.41 - 1991, ofrece definiciones de formas de ondas para realizar pruebas de disturbios o variaciones. Para la realización de pruebas, usan formas de ondas de 100 Khz con tiempos de entre 1.2/50  $\mu$ seg - 8/20  $\mu$ seg de ondas combinadas, donde el tiempo de 1.2/50  $\mu$ s se usa para impulsar una onda de voltaje en pruebas de circuito abierto y el tiempo de 8/20  $\mu$ s se usa para impulsar ondas de corriente en cortocircuito. Los cuadros que se presentan se han construidos con datos de pruebas utilizados para demostrar el comportamiento de dispositivos a disturbios. Algunas de las pruebas que se realizan están:

**Selección del valor pico de una forma de onda estándar:** Se toma una onda resonante de 100 Khz, la relación del voltaje pico de circuito abierto y corriente de cortocircuito (impedancia efectiva) se especifica con un valor de 12 ohm ( $\Omega$ ) para ambientes con categoría tipo B, y una impedancia efectiva de 30 ohm ( $\Omega$ ) para ambientes categoría tipo A. Para niveles severos esta relación de cortocircuito y circuito abierto (impedancia efectiva) es de 2 ohm ( $\Omega$ ).

**Condiciones de prueba y tolerancias:** los equipos bajo prueba deben de cumplir con los parámetros característicos anteriores, y además deben de poseer tolerancias tanto las componentes del generador del disturbio como los instrumentos de calibración. Deben de cumplir los propósitos de obtener el voltaje pico de circuito abierto y corriente pico de cortocircuito.

Para prueba de circuito abierto se definen los parámetros siguientes:

$$\text{Tiempo de subida} = 0.5 \mu\text{s} - 0.15 \mu\text{s}$$

$$\text{Frecuencia de resonancia} = 100 \text{ Khz} \pm 20 \text{ Khz.}$$

La impedancia efectiva es :

$$Z = 12 \pm 3 \Omega \text{ para ambientes en categoría tipo B}$$

$$Z = 30 \pm 8 \Omega \text{ para ambientes en categoría tipo A}$$

Los parámetros dados, son los valores que la presente norma especifica que se deben de realizar la pruebas para los diferentes componentes fabricados para la protección de disturbios o variaciones en el voltaje y la corriente.

En general, por definición para formas de ondas:

$$\begin{aligned} \text{En circuito abierto:} \quad \text{Tiempo frontal} &= 10 \mu\text{s} (0, -5) \mu\text{s} \\ \text{Duración} &= 1000 \mu\text{s} (+1000, -0) \mu\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{En cortocircuito:} \quad \text{Tiempo frontal} &= 10 \mu\text{s} (+0, -5) \mu\text{s} \\ \text{Duración} &= 1000 \mu\text{s} (\pm 200) \mu\text{s} \end{aligned}$$

Para una combinación de ondas:

-Para una forma de onda en voltaje de circuito abierto:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo frontal} &= 1.2 \mu\text{s} \pm 0.36\mu\text{s} \\ \text{Duración} &= 50 \mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s} \end{aligned}$$

- Para una forma de onda de corriente en cortocircuito:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo frontal} &= 8\mu\text{s} (+1.0, -2.5) \mu\text{s} \\ \text{Duración} &= 20 \mu\text{s} (+8, -4) \mu\text{s} \end{aligned}$$

Los siguientes cuadros nos muestran los datos obtenidos con la utilización de formas de ondas estándares para pruebas según las categorías de localización dadas por la IEEE.

**TABLA 3. SUMARIO DE ESTÁNDARES APLICABLES Y FORMAS DE ONDAS ADICIONALES POR CATEGORÍAS DE LOCALIZACIÓN A, B Y C.**

CATEGORÍA DE LOCALIZACIÓN	ONDA RESONANTE 100 KHZ.	ONDA COMBINADA.	EQUIPO BAJO PRUEBA 5/50 $\mu$ seg.	ONDA DE 10/1000 $\mu$ seg.	ONDA RESONANTE 5 KHZ.
A	ESTANDAR	NINGUNA	ADICIONAL	ADICIONAL	ADICIONAL
B	ESTANDAR	ESTANDAR	ADICIONAL	ADICIONAL	ADICIONAL
C	ESTANDAR	ESTANDAR	NINGUNA	ADICIONAL	ADICIONAL

La tabla 3 nos muestra las formas de ondas aplicables para las diferentes categorías de localización y sitios de los disturbios de acuerdo al nivel de exposición eléctrico al que se exponen los diferentes equipos bajo prueba, y de esta manera verificar si los equipos hechos para tal fin responden a lo esperado. Como se puede observar en la tabla los someten a pruebas con diferentes tipos de ondas con diferentes frecuencia. Utilizan tanto la ondas para circuito abierto como para cortocircuito u ondas combinadas.

**TABLA 4. DISTURBIOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES, UTILIZANDO UNA ONDA ESTANDAR PARA CATEGORÍAS TIPO A Y B (100 KHZ, 0.5  $\mu$ seg).**

CATEGORÍA DE LOCALIZACIÓN	SISTEMA DE EXPOSICIÓN	VALOR PICO VOLTAJE (KV)	VALOR PICO CORRIENTE (KA)	IMPEDANCIA EFECTIVA ( $\Omega$ )
A1	BAJO	2	0.07	30
A2	MEDIO	4	0.13	30
A3	ALTO	6	0.2	30
B1	BAJO	2	0.17	12
B2	MEDIO	4	0.33	12
B3	ALTO	6	0.5	12

La tabla No. 4 mostrada, contiene los diferentes niveles picos del voltaje y de corriente que alcanzan los disturbios en los diferentes puntos de ubicación, tanto para niveles altos, medios y bajos de exposición, además muestra como se da la variación de las impedancias efectivas y que estas también están en función del lugar donde se ubicó el disturbio y para las diferentes categorías de locación en las que la IEEE las ha dividido. Las categorías tomadas en cuenta para los datos tabulados en la tabla son la A y B.

**TABLA 5. DISTURBIOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES ESPERADAS EN CATEGORÍAS TIPO B Y C SE USA UNA ONDA COMBINADA ESTÁNDAR (1.2/50  $\mu$ seg. - 8/20  $\mu$ seg)**

CATEGORÍA DE LOCALIZACIÓN	SISTEMA DE EXPOSICIÓN	VALOR PICO DE VOLTAJE (KV)	VALOR PICO DE CORRIENTE (KA)	IMPEDANCIA EFECTIVA ( $\Omega$ )
B1	BAJO	2	1	2
B2	MEDIO	4	2	2
B3	ALTO	6	3	2
A1	BAJO	6	3	2
A2	MEDIO	10	5	2
A3	ALTO	20	10	2

La tabla 5 nos muestra los valores picos de voltajes y corrientes para una onda de prueba combinada. Se puede observar que a medida se aumentan los pulsos de voltajes también se aumentan los impulsos de la corriente. Siempre para los diferentes niveles de exposición alta, media y baja, y para las diferentes categorías de localización. [ 8 ]

Para protegernos de estos transitorios, existe la necesidad de instalar dispositivos que atenúen la fuerza de estos. Para ello se usan los llamados pararrayos (lightning arrester) instalados en las líneas primarias y pararrayos secundarios o conocidos como (surge supresor o varistores). Cuando se tienen instalados estos dos dispositivos, se debe de tener el cuidado de coordinarlós adecuadamente por que una mala coordinación podría provocar que entren en conducción los supresores de voltaje, no evitándose el disturbio y destruyéndose por consiguiente debido a la muy poca capacidad del manejo de la energía que estos poseen, no así los pararrayos primarios que están capacitados para manejar grandes capacidades de energía.

Se ha encontrado por investigaciones de campo realizadas, que los sistemas de 480 voltios son los mas seguros y además ayudan a reducir la severidad de los disturbios en el lado de bajo voltaje en sistemas industriales y comerciales. Como ya se conoce, los pararrayos conectados en el secundario de los sistemas de distribución estos recortan los disturbios provocados en las líneas ya sea por interrupciones o por interferencia electromagnética que provocan las descargas atmosféricas. Estos recortes están limitados por las características internas de cada pararrayo, los cuales son hechos para activarse a un voltaje de falla previamente determinado en su fase de construcción.

Debido a que existen cargas con diferentes características, es que los fabricantes de estos dispositivos de protección los diseñan para que respondan a un disturbio con un nivel de voltaje especificado. La única diferencia que tienen con respecto a los pararrayos instalados en el primario de las líneas además del nivel de voltaje, es la energía de

disipación de los supresores de voltaje secundario con respecto a los instalados en el primario. Su manejo de energía está limitado por la corriente y el voltaje que soportan, y para que su funcionamiento para proteger sea mucho más eficiente estos los conectan en cascada, para que de esta manera se obtengan mejores resultados en la tarea encomendada. De su conexión en cascada, se han obtenido datos de mucho interés en cuanto a la elección del dispositivo adecuado según nuestra conveniencia. En la tabla siguiente se muestra como cambia la energía en ellos según sea el voltaje utilizado, la distancia entre ellos y otros.

Tal como se puede observar en la tabla 6, existe una gran diferencia en el manejo de la energía de los supresores de voltaje en el lado de bajo voltaje y los pararrayos (lightning arrester) instalados en el primario de las líneas de distribución, y además como afecta la distancia en el manejo de la energía. El cuidado que se debe de tener con el uso de estos dispositivos es bastante delicado ya que al conectarlos inadecuadamente se podría afectar algunas de sus características propias de ellos.

Algunas de los parámetros que hacen que cambien sus características son la frecuencia, la separación entre ellos y el soporte del voltaje de enganche que tienen estos dispositivos. De estudios de campo y por pruebas de laboratorio realizados usando estos dispositivos se ha encontrado que el manejo o soporte de la energía de los supresores y los pararrayos varían mucho con la distancia y la frecuencia tanto para ondas combinadas 8/20 microsegundos, como para ondas de prueba 0.5/100 khz. Estos datos demuestran que al instalar estos supresores de transitorios tanto en el lado de baja como en el lado de alta, se debe de tener el sumo cuidado de elegir el dispositivo adecuado al uso o de acuerdo al equipo que protegerá, ya que si se usa el dispositivo no adecuado se puede tener un resultado no muy agradable, pudiéndose dañar el equipo que protege o otros peligros que siempre se pudieran producir.

*TABLA 6. ENERGÍA DEPOSITADA EN DISPOSITIVOS EN CASCADA CON 3 KAMP.  
DE ONDA COMO FUENTE DE DISTURBIO*

VOLTAJE DE ENGANCHE DEL DISPOSITIVO (V)		DISTANCIA DE SEPARACION DE DISPOSITIVOS Y ENERGIA DEPOSITADA EN CADA DISPOSITIVO (Joule)							
		5		10 MTS		20 MTS		40 MTS	
A	S	A	S	A	S	A	S	A	S
250	250	75,9	27,3	83,5	19,9	89,5	14,4	91,7	9,69
	150	22,2	,12	29,9	8,52	35,9	5,4	39,8	3,3
	130	21,3	11,9	29,7	8,6	35,3	5,2	40,1	3,3
150	250	24,3	0,005	24,3	0,006	24,3	0,007	24,3	0,008
	150	21,2	4,65	23,1	3,06	24,4	1,93	25,5	0,88
	130	19,84	5,16	22,16	3,05	24,05	1,86	25,02	1,08
130	250	22,9	0,003	22,9	0,003	22,9	0,004	22,9	0,004
	150	20,2	1,72	20,8	1,18	21,3	0,76	21,1	0,44
	130	18,6	2,92	19,4	1,71	20,3	1,03	20,9	0,7

## CAPÍTULO IV

### **4.0 DESARROLLO DEL TRABAJO DE CAMPO**

En esta parte del documento, se desarrolla el método a utilizar para la recolección de datos de campo necesarios para la elaboración de este trabajo de graduación. Contiene además información del diseño del cuestionario o encuesta a pasar a las diferentes empresas como bancos y empresas dedicadas a las telecomunicaciones, se desarrolla además el método estadístico a utilizar para el depurado de las empresas que servirán como nuestro universo de la muestra. Por ser estas empresas dos líneas diferentes en cuanto a la actividad económica o comercial que estas desarrollan, las dividiremos en dos tipos de muestras, una para los bancos y la otra para las empresas de telecomunicaciones. No se debe de pasar por alto que el objetivo principal de las encuestas es el obtener información real de que este fenómeno en verdad causa daños a los sistemas electrónicos tales como los equipos que se mencionan en las encuestas. También agregado a este objetivo buscado se encuentra el detectar cual de los efectos secundarios que producen las descargas atmosféricas (siempre de carácter electromagnético) es el que más se da en el medio, y los métodos de protección que utilizan para detenerlos.

Por lo difícil del estudio del fenómeno, el diseño de la encuesta no lleva en sí preguntas directas ya que en el mundo real que para este caso son las empresas encuestadas y los encargados de contestarlas son los jefes de mantenimiento de cada una de ellas, muy poco es conocido sobre estos efectos secundarios producidos por la descarga del rayo.

Por la razón antes mencionada, la encuesta lleva preguntas en donde el jefe de mantenimiento fácilmente puede contestarlas, dependiendo de las fallas que estos reporten se deducirá por cual de los efectos que producen las descargas eléctricas es el que la ha producido. Aún con todos estos inconvenientes se logró diseñar una encuesta que cumpliera con la información que se busca y que cumpla con lo esperado. Cuando se tabulen los datos obtenidos en las encuestas, se debe de tener el completo cuidado de conocer la causa que cada uno de los fenómenos produce cuando tiene lugar en el punto de la descarga, ya que si no se conocen será difícil él seleccionarlos y pudiéndose de esta manera cometer errores que puedan cambiar los resultados. Para conocer el tamaño de la muestra se podrían utilizar varios métodos estadísticos existentes, pero de ellos se tomó él métodos de calculo por estratos, que no es mas que estratificar o dividir en un sub-número de poblaciones o estratos que no se traslapen y luego tomar una muestra de cada estrato. El uso de este método se debe a que la encuesta esta orientada a dos diferentes tipos de empresas tales como los bancos y empresas de telecomunicaciones, aunque entre ellas tengan gran parte en común, ya que algunos bancos hoy en día tengan ambos sistemas conectados, pero se da en mayor escala para cada empresa en particular.

Como ejemplo podemos citar que una empresa dedicada a las telecomunicaciones no posee cajeros automáticos, pero si poseen redes de computo y que algunas veces son más complejas que la de los bancos, pero no es su fuerte. En cambio en los bancos se manejan grandes cantidades de datos en las redes de computadoras, la pérdida de ellos puede significar algo no muy grato en el sistema del banco de datos, generando pérdidas grandes no esperadas. El tamaño de la muestra, el área de estudio, la clase de estudio que se realizará, el método de recolección y el procedimiento para la recopilación de la información, el análisis y la tabulación de datos forman parte del desarrollo metodológico a seguir para el trabajo de campo. El universo de la muestra cubre tanto los bancos como las empresas de telecomunicaciones.

Como ya mencionamos antes, esta encuesta está orientada a conocer las fallas que pudieran tener los equipos electrónicos sensibles a disturbios provocados por descargas atmosféricas. Se tomaron como parte prioritaria de este documento, por la razón que estos equipos son de características electrónicas muy delicadas y que cualquier disturbio formado se refleja en daños en estos sistemas. Su complejidad es tal que si estos no se protegen adecuadamente pueden sufrir daños irreparables o paralizar su tarea encomendada (como ejemplo el tráfico de una red de telecomunicaciones).

Esta encuesta se distribuyó solo a las empresas que manejan todo este tipo de equipos muy sensibles, los cuales son electrónicamente muy sensibles a cualquier disturbio de tipo electromagnético generado por la tormenta eléctrica. Dentro de estos equipos mencionados los encontramos en bancos comerciales y en el área de telecomunicaciones ya que es aquí donde mayor cantidad de estos equipos poseen y son tan necesarios. Aunque estos equipos también los podemos encontrar en una fabrica o industrias en general.

Para la selección del tamaño de la muestra, se debe de conocer primero el número de empresas existentes que se dedican a tal fin. Para nuestro caso en particular, nos centraremos a conocer la cantidad de bancos comerciales existentes y la cantidad de empresas de telecomunicaciones que se dedican a este negocio. El número de bancos seleccionados es de 14 (no se tomaron en cuenta sucursales por que ellas no cuentan con un encargado de mantenimiento eléctrico) y el número de empresas de telecomunicaciones dedicadas a brindar este tipo de servicio fueron alrededor de 40, solo se tomaron las que ofrecen una mayor cantidad de servicios servidos al cliente y no las distribuidoras de equipos para tal fin.

#### **4.1 DESARROLLO DE LA ENCUESTA**

El diseño de la encuesta está orientado a recolectar información de las empresas que poseen equipos con características electrónicas muy sensibles a los disturbios o debido a cualquier clase de variación de tipo atmosféricos causados por la descarga de

un rayo o por interrupciones en las líneas de transmisión, además se orienta al conocimiento de recolectar la información pertinente de las fallas más usuales que ocurren bajo este tipo de disturbios. Las redes de computadoras, los sistemas de telecomunicaciones, y los cajeros automáticos, son de interés muy especial en esta encuesta, por que son los más susceptibles cuando fenómenos de esta naturaleza eléctrica (descargas atmosféricas) tienen lugar si es que no se encuentran debidamente protegidos. Además se diseñó con la finalidad de conocer también si estas empresas poseen algún tipo de protecciones, para así conocer el tipo y la clase de ellas que más instalan para detener estos efectos y por otro lado el encontrar la falla más común que estas sufren bajo tales condiciones.

Este método de encuesta es el más óptimo para conocer la información que es de nuestro interés para el desarrollo del siguiente trabajo, aunque el más confiable es el método de preguntas directas o de entrevistas ya que se pueden hacer todas las preguntas deseadas de acuerdo a lo que se necesita conocer. La encuesta consta de 13 preguntas, estas, están diseñadas de manera que sea fácil su contestación o llenado y a la vez sea fácil la recolección de los datos a tabular que nos ayudaran a cumplir con el objetivo buscado.

Una vez recolectados los datos de nuestro interés se empleará el mejor método estadístico que se adecue a nuestro propósito de encontrar la respuesta o la información buscada. Con toda esta información recopilada o recuperada de la encuesta se pretende conocer la frecuencia, el tipo de daño, la razón del fallo (sea que fuere por causas electromagnéticas que están en presencia de la tormenta eléctrica o por otras causas), si cuentan con equipos de protección y cual de ellos fallan mas frecuentemente durante el tiempo que suceda el fenómeno climático, y otros. Todo lo anterior se debe de verificar para los siguientes equipos como: equipos de computo, sistemas de telecomunicaciones, bancos de datos, y otros que son susceptibles a cambios climáticos y efectos de carácter electromagnéticos que suceden durante una tormenta eléctrica.

En la actualidad muchas empresas debido a la globalización, han tenido que tecnificarse y a la vez adquirir equipos sofisticados y con funciones muy especiales para hacerle frente a esta. Pero este uso de moderna tecnología acarrea a la vez problemas en los sistemas de protección, los cuales tienen que soportar con el problema de la tarea encomendada que es la protección de los equipos para evitar cambios en su funcionamiento.

#### ***4.2 SELECCIONANDO EL TAMAÑO DE LA MUESTRA***

Como ya antes mencionamos que el tamaño de la muestra encontrado fue de 14 para bancos y 40 para empresas de telecomunicaciones, ahora se debe de depurar la muestra por medio de muestreo por estratos. La utilización de este método estadístico tiene sus ventajas, una de ellas es que los límites de estimación son pequeños y por lo

tanto el error que maneja es también pequeño, una segunda ventaja es, que al separar los estratos a muestrear reduce la cantidad de muestras a pasar, y una tercera es que se tienen parámetros poblacionales para sub-grupos, los cuales deben de ser identificables.

Tiene su desventaja el usar este método y es que si el universo es pequeño, la reducción de la muestra no se disminuye considerablemente, esta muy bien relacionado. Es por esta razón que este muestreo por estratos es mucho más confiable, el tamaño de la muestra lo mantiene a niveles aceptables. Para él calculo de las muestras se utilizan las siguientes fórmulas:

$$n = [ N * pq / ((N-1) * D + pq] \quad \text{donde } D = B^2/4 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$n = \{ [ \sum N_i^2 * pq / w_i ] / [ N^2 * D + \sum N_i * pq ] \} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$n_i = n w_i$$

n = tamaño de la muestra

$n_i$  = tamaño de la muestra del estrato

N = tamaño de la población

$N_i$  = población total del estrato

p = variabilidad de la proporción poblacional

q = el complemento de p, donde  $p=1-q$

D = margen de error

B = error de estimación

$w_i$  = fracción de observaciones asignadas al estrato y

y = 1,2,3,4,5,6...

Estas fórmulas escritas son utilizadas para él calculo del tamaño de la muestra. Para él calculo de nuestra muestra se procede de la siguiente manera:

Cantidad de bancos = 14

Cantidad de empresas de telecomunicaciones = 40

total de la muestra = 54

por lo tanto:

- La muestra para los bancos encontrada es:

$$w_i = N_i / N = 14 / (14 + 40) = 0.2592$$

- Muestra para empresas de telecomunicaciones encontrada es:

$$w_2 = N_2/N = 40/(14+40) = 0.7407$$

Y el error de estimación encontrado es:

$$D = B^2/4 = (0.05)^2/4 = 0.000625 \quad \text{ó} \quad 0.0625\% \quad \text{es menos del } 1\%$$

Ahora sustituyendo todos estos valores en la ecuación del cálculo del tamaño de la muestra aproximada para cada uno de los tamaños de la muestra, obtenemos:

Para los bancos el total del tamaño de la muestra encontrado es de **10 muestras**. Para empresas de telecomunicaciones el tamaño de la muestra encontrado es: **28 muestras**.

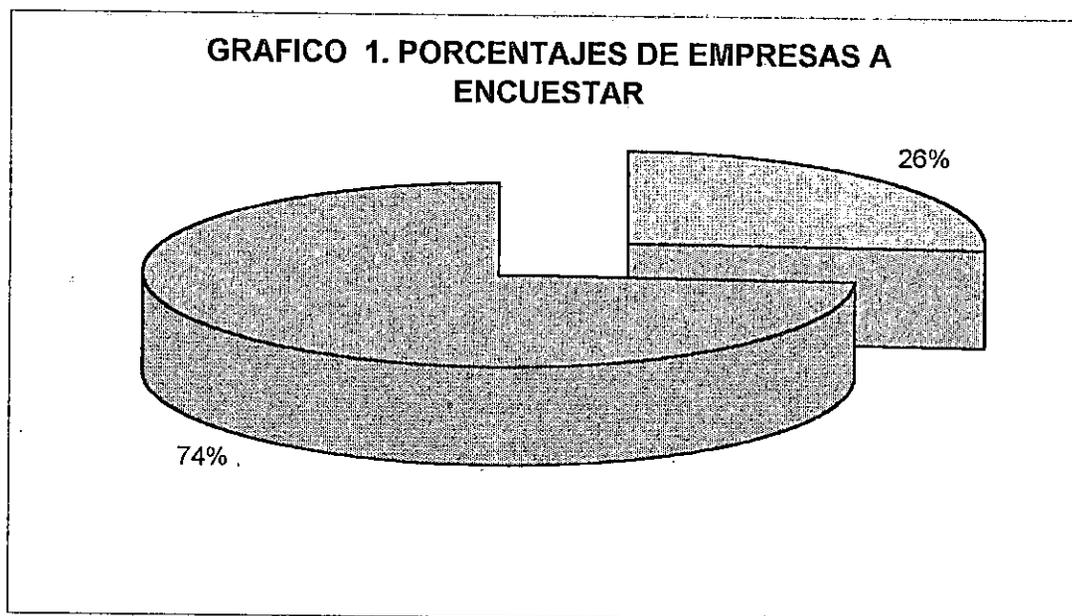
El total de la muestra encontrado es: **38 muestras**.

El valor de "p" aquí usado, es desconocido, pero en un caso práctico, se toma un valor aproximado de 0.5. Este es un valor muy aceptable con el que se pueden obtener muestras muy conservadoras y que además cumplen con las expectativas buscadas. [ 9 ]

Como ya se mencionó al principio, la información será recolectada por medio de las encuestas, quedará a criterio del diseñador de la encuesta el escoger la forma de tabular los datos, de manera que la información recopilada tenga la estructura deseada y se logren obtener los objetivos buscados. El camino a seguir queda a criterio propio, el buscar el mecanismo idóneo y que cumpla con las expectativas deseadas. La información aquí mostrada, ha sido recopilada por medio de visitas hechas hacia los jefes de mantenimiento eléctrico de la empresa encuestada y algunas enviadas por medio de fax. Además cabe el mencionar que para el desarrollo de la encuesta, se recibió ayuda de parte de personal docente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

### ***4.3 TABULACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA***

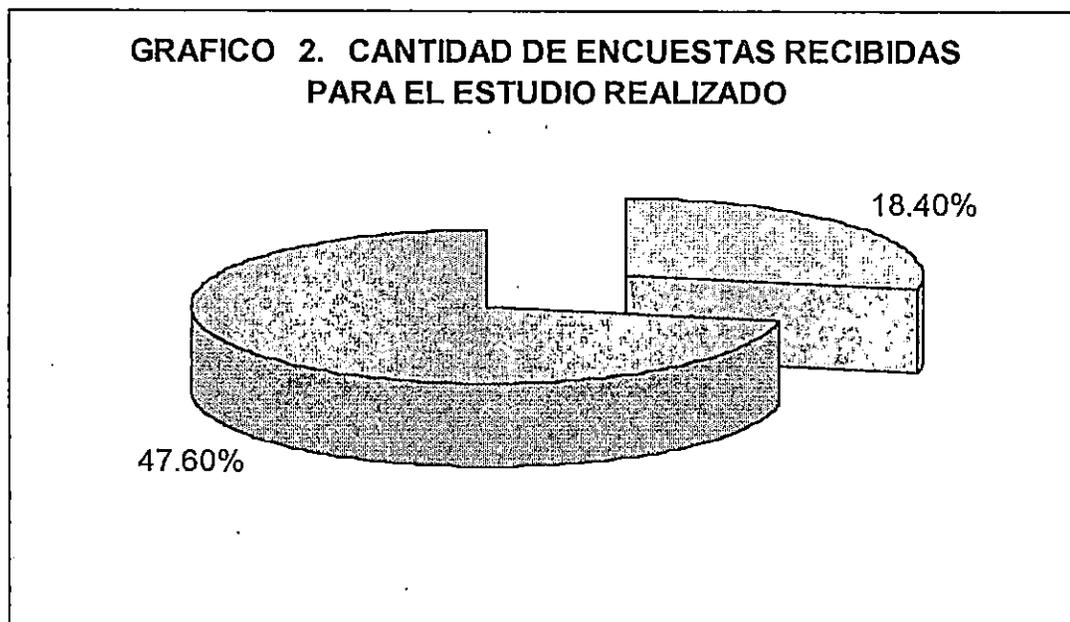
Para la tabulación y análisis de los datos se utilizará el mejor método y criterio que más se adecue para ello, y así obtener respuestas con mayor grado de confiabilidad y además él poder interpretar mejor los resultados. Del método buscado para tabular los datos definirá que tan confiables y seguros sean los datos mostrados, ya que son la base de toda investigación, como lo es el trabajo de campo. Iniciaremos nuestro análisis mostrando en forma gráfica los porcentajes de las empresas elegidas para el llenado de las encuestas (cantidad de empresas participantes), para observar la relación entre la cantidad de empresas de telecomunicaciones existentes y la cantidad de bancos que hay en El Salvador.



Como se puede observar en el gráfico presentado, la mayor cantidad de empresas que se encuestaron corresponden en su mayoría a las empresas de telecomunicaciones, donde el 26.0% corresponde a los bancos y el restante 74.0% corresponde a las empresas de telecomunicaciones. De las empresas que respondieron y que colaboraron con el llenado de las encuestas, se muestra en el gráfico 2, como se puede observar la mayor cantidad de encuestas recibidas corresponden a empresas de telecomunicaciones, principalmente de empresas dedicadas a la transmisión de radio, esto se debió al mejor acceso que se obtuvo a este tipo de empresas (prestaron mejor colaboración). El porcentaje mostrado gráficamente es el siguiente:

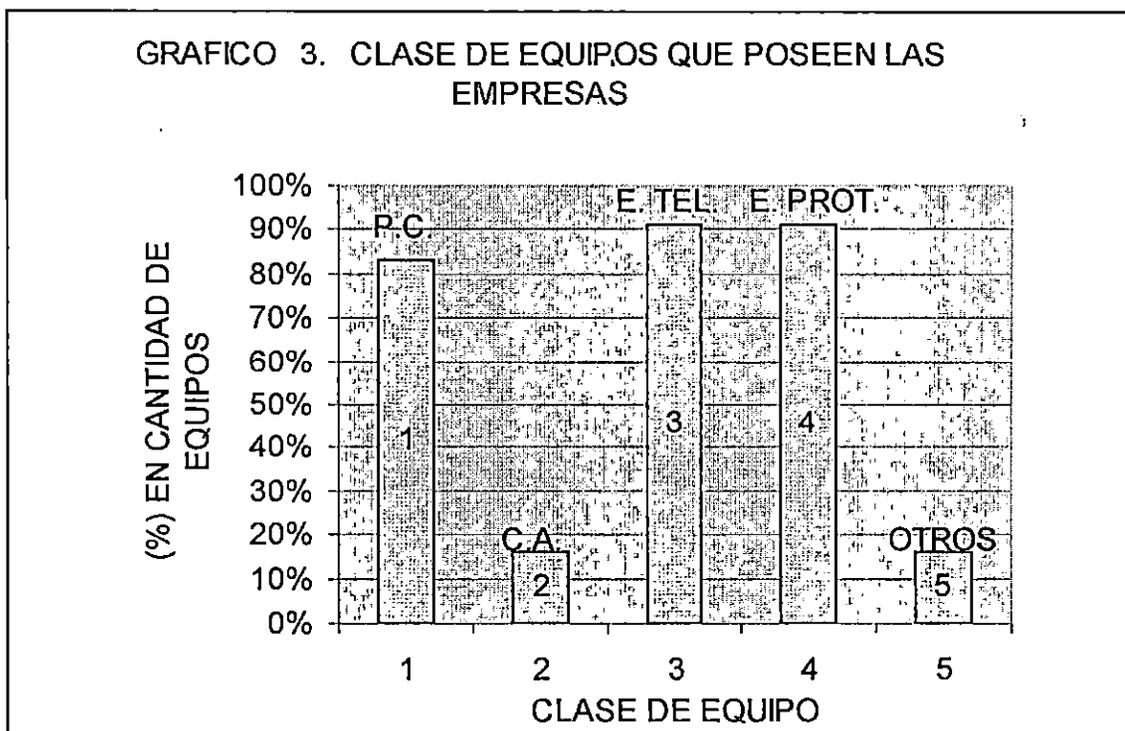
Este gráfico No. 2, muestra la cantidad de encuestas recibidas, enviadas y respondidas por las empresas a las que se les solicitó colaboración, algunas encuestas fueron llevadas personalmente y otras fueron enviadas por fax. El 18.4% en el gráfico representa a los bancos y el 47.6% pertenece a las empresas de telecomunicaciones, en total hacen el 65.8% de encuestas recibidas.

**GRAFICO 2. CANTIDAD DE ENCUESTAS RECIBIDAS PARA EL ESTUDIO REALIZADO**



En el siguiente gráfico se muestran las cantidades de equipos de naturaleza delicada a los disturbios que tienen las empresas encuestadas y que poseen las características de ser fácilmente dañados por la presencia de una tormenta eléctrica.

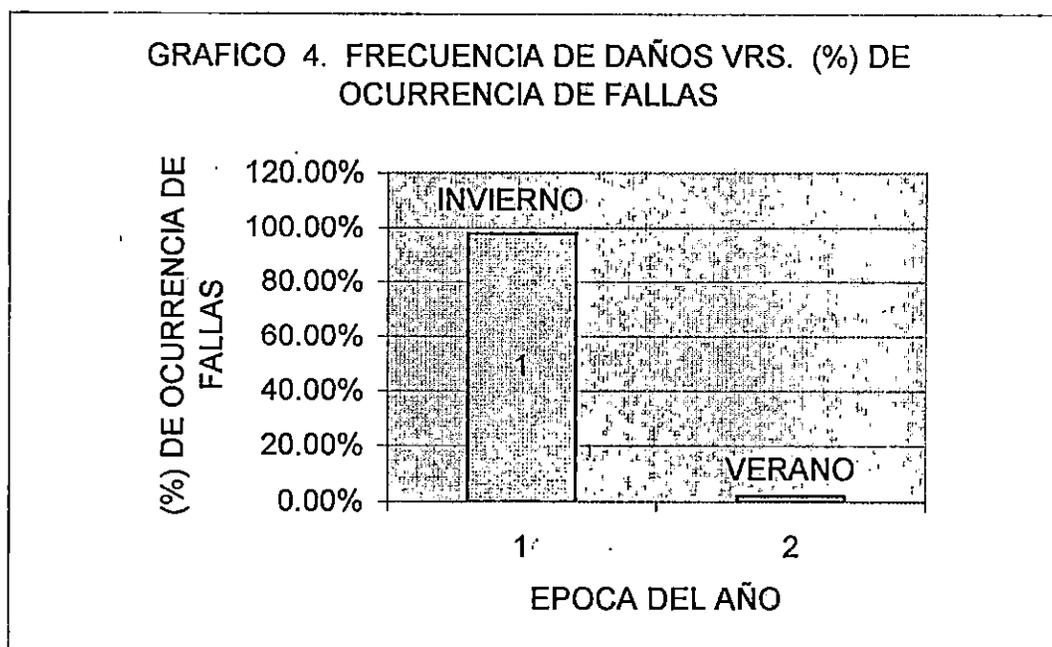
**GRAFICO 3. CLASE DE EQUIPOS QUE POSEEN LAS EMPRESAS**



Como se puede observar en el gráfico 3, el diagrama de barras representa el porcentaje de las empresas que poseen los equipos listados en las encuestas pasadas, como lo son P.C. (computadoras personales); C.A. (Cajeros automáticos); E. TELEC. (Equipo de telecomunicaciones); E. PROT. (Equipos de protección); y OTROS que representa a cualquier tipo diferente de equipo instalado en la empresa encuestada. Debe de recordarse que solo se tomaron este tipo de equipo por ser este el más propenso a sufrir daños cuando la descarga del rayo tiene lugar, debido a que el equipo no se encuentra contra transitorios provocados por descargas atmosféricas, debido a sus características electrónicas muy complejas.

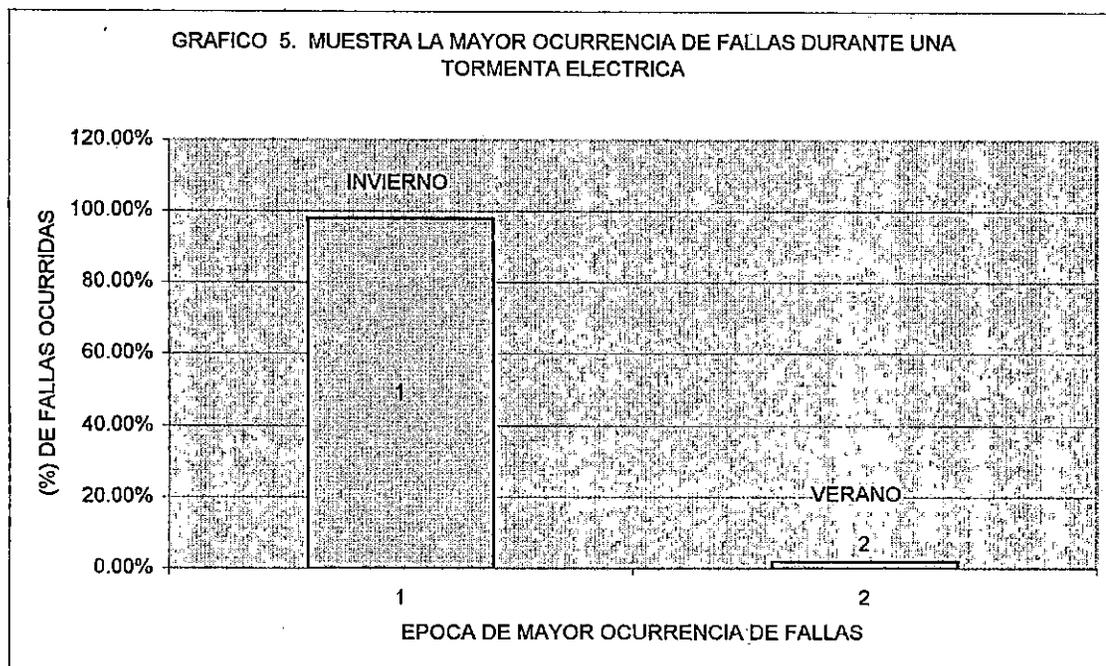
En el gráfico 3, los datos obtenidos revelan que equipos de telecomunicaciones y equipos de protección y de computo son los que más poseen las empresas encuestadas, esto se debe a que en todo proceso la computadora realiza tareas de soporte para mantener una comunicación o tareas de almacenamiento de datos que son indispensables en todas las empresas. En cuanto a que también predominan mucho los sistemas de comunicación, se debe a que la mayor parte de encuestas fueron llenada por empresas de telecomunicaciones, pero no debe también de olvidarse que hoy en día la mayoría de empresas poseen un sistema de comunicación aunque sea pequeño. Los demás son equipos de protección que son instalados para que protejan a los equipos antes mencionados y que se encargan de mantenerlos siempre en funcionamiento aunque se ocurran transitorios de cualquier naturaleza.

En el gráfico 4, se representa en que época del año se dan con mayor frecuencia las fallas o daños de los equipos tomados en consideración.



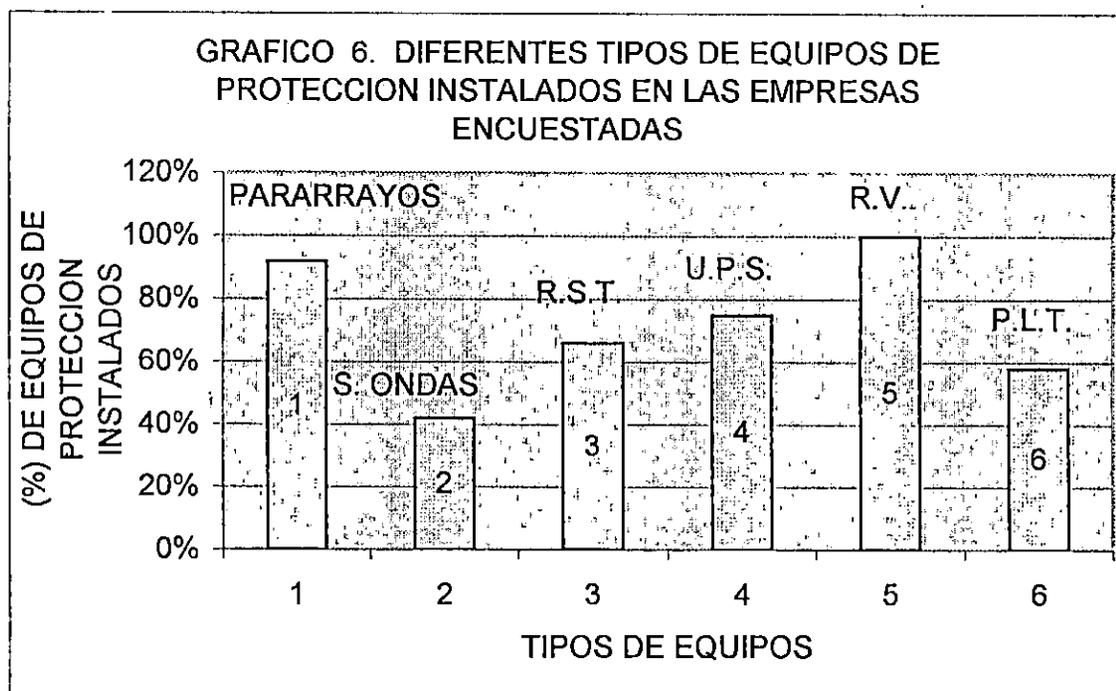
La barra a cuadros representa la época de mas ocurrencia de fallas producidas a los equipos en cuestión. Y como se puede observar, las fallas en época del verano son mínimas (debidos a fallas producidas específicamente por rayos, ya que en verano pueden haber fallas provocadas por transitorios debido a interrupciones en las líneas).

Como se observa en el gráfico 4, las mayores fallas de los equipos se reportan en la época invernal, siempre asumiendo que el tipo de falla corresponde a las producidas por una descarga eléctrica y que no es debida a una interrupción en la línea. Uno de los puntos a tomar en cuenta para diferenciar que el tipo de falla corresponde a la producida por la descarga del rayo son las que ocurren siempre bajo la presencia de una tormenta eléctrica y no en tiempos secos o en verano. El diagrama demuestra esta aseveración planteada y confirmada por el estudio de campo por medio de las encuestas recibidas.



En el gráfico 5, se observa como las fallas durante una tormenta eléctrica son mucho más evidentes. Estos datos fueron obtenidos de las encuestas recibidas, donde se hacía la pregunta que cuando se reportaban mayor número de fallas, se daban bajo una tormenta eléctrica o no, a lo que respondieron que siempre sus equipos reportaban alguna falla cuando estaban bajo una la tormenta, esto confirma aún más los datos tabulados en el gráfico No. 4 antes mostrado.

El Gráfico 6, representan los diferentes equipos de protección instalados en las empresas para la protección de equipos electrónicos. En la gráfica de barras se puede observar como los reguladores de voltaje prevalecen dentro de los equipos de protección deseados por todas las empresas para que proteja sus equipos, el otro porcentaje mayor corresponde a la utilización de unidades de baterías o UPS, seguida por la mayor de todas reportadas como los más utilizados y son los pararrayos. Otro dispositivo de protección que se usa muy frecuente son los supresores de transitorios, los cuales vienen incluidos muchas veces en las fuentes de alimentación de estos equipos y otras es necesario él instalarlos por separado de estos.



R.S.T. : RED SOLIDA DE TIERRA

U.P.S. : UNIDAD DE BACKUP

R.V. : REGULADORES DE VOLTAJE

P.L.T.: PROTECTORES DE LINEAS TELEFONICAS

S. ONDAS: SUPRESORES DE TRANSITORIOS

De las siguientes preguntas realizadas en la encuesta, tal como los números 6, 7, 8, 9, 10, 12 y 13, se analizan como siguen:

De esta pregunta 6 y otras, la respuesta dada por los encuestados (jefes de mantenimiento), la mayoría respondió que las fallas las tienen en la mayoría de los casos las fuentes en las computadoras y en otros casos las fuentes de los UPS (equipos de protección) a los cuales se encuentran conectados, esta es la falla más común reportada.

En otros casos si estas se encuentran en red sufren daños las tarjetas de red y en caso muy aislados se pierden los registros del disco duro. Algunos opinaron que las quemaduras de las tarjetas se debían a los transitorios generados por el paso de la tormenta eléctrica, los cuales tienen cierta veracidad por que si los transitorios son muy altos entonces y los diseños de protecciones de las tarjetas no son capaces de soportar el disturbio entonces se dañan. Queda comprobado entonces que los pulsos electromagnéticos son los causantes de producir muchos daños a redes de comunicación y sistemas de computo.

En cuanto a la pregunta 7, se reportaron un mayor número de fallas tales como quema de fusibles, daños en la fuente de potencia, fallas en los MÓDEM, la comunicación se interrumpe, y otros. Por lo tanto, queda evidencia de que los sistemas de comunicación fallan por el fuerte campo magnético que se genera bajo la tormenta eléctrica. La causa más común que predomina siempre, es la falla en las fuentes de alimentación, de acuerdo a las investigaciones realizadas, tanto los transitorios que se generan y las corrientes que circulan por tierra hasta el equipo pueden ser las causantes de provocar los daños a estas componentes del equipo.

El por qué de la falla no se puede dar una respuesta afirmativa ya que pudo haber sido hecha por los dos fenómenos antes mencionados, no se afirma por que si la descarga chocó en la línea entonces fue debido a fuertes transitorios generados y que llega al equipo vía la red de alimentación donde el nivel de protección colocado en la planta no es capaz de frenar este efecto (los supresores de transitorios no soportan la fuerza del disturbio). Ahora que si la descarga tiene lugar en un lugar no muy cerca pero choca con la tierra entonces el disturbio viaja por la tierra y se acopla por medio de la red de polarización llegando hasta el equipo y dañándolo. Por cualquiera de los dos efectos estos equipos podrían sufrir los daños, por lo cual no se puede afirmar cual fue la causa, lo que sí es afirmativo es el daño causado al equipo.

Todas las empresas tienen sus sistemas de protección instalados desde pararrayos tipo puntas franklin, así como los que poseen dispositivos de cebado como los instalados en la torre cuzcatlan y en la antena del canal cuatro de televisión en el volcán de San Salvador, hasta protecciones de gas (UES), UPS, supresores de transientes (CTE/ANTEL TELECOM) y otros. Estas fueron las respuestas dadas acerca del tipo de protección que estas poseen. Aún disponiendo de estas protecciones siempre reportaron fallas en sus equipos, lo que viene a asegurar que la alietoriedad de las descargas de los rayos siempre causan daños a los equipos, claro está que los daños son menos drásticos, en caso de no tener las protecciones instaladas, si estos equipos no estuvieran protegidos entonces los daños fueran más considerables.

La quema de fuentes en los sistemas de protección predomina en los diferentes dispositivos, en algunos casos no funcionan (protectores de gas) y en otros se destruyen, por ejemplo los varistores, los cuales no soportan la magnitud del disturbio el cual sobrepasa los límites de funcionamiento y de manejo de energía. Lo dicho vuelve a

confirmar que además de ser un fenómeno aleatorio, la causa de estas fallas podrían darse por impulsos de tensión generados en la línea de distribución, por transitorios generados por un arqueo entre secundarios debido a la estática generada (produce un impulso que eleva el nivel del voltaje) y otro podría ser por las corrientes que entran por la tierra de los sistemas hasta llegar a los equipos.

Todos estos fenómenos de carácter electromagnético se estarían produciendo bajo la tormenta eléctrica y por consiguiente producir los daños no esperados. Por lo tanto la red de tierra juega un papel primordial para que las protecciones colocadas para mantener el sistema en buen funcionamiento, dependan de ella y de esta manera obtener el buen funcionamiento de las protecciones, si la red de tierra es mala entonces los equipos protectores serán incapaces de guardar el buen funcionamiento de estos, los daños podrían ser cuantiosos.

## CONCLUSIONES

- De la investigación realizada acerca de este fenómeno atmosférico, se afirma que el rayo es una poderosa y destructiva fuente de energía que se almacena en una nube de tormenta. Sus grandes arrastres de corriente en cada descarga varían de acuerdo a la energía acumulada en la nube en el momento de la descarga.
- Siempre que una descarga eléctrica del rayo ocurre, esta va acompañada de efectos primarios y secundarios, los cuales pasan inadvertidos a nuestros ojos pero que están presentes cuando la descarga de un rayo concluye. Es por esa característica propia de ellos que causan grandes daños a los equipos electrónicos que no se encuentran debidamente protegidos para transitorios generados por interferencias electromagnéticas que se producen bajo la nube de tormenta debido al fuerte campo magnético generado.
- Las normas aquí establecidas nos ayudan a disminuir los efectos los efectos que los transitorios causan a los equipos electrónicos. Pero la disminución de estos será mucho más efectiva si solamente se aplican según ellas lo demanden, tomándose siempre en consideración que no protegen al 100%, esto es debido a la tradicional alietoriedad del rayo.
- De la investigación de campo realizada, queda demostrado que las descargas eléctricas (rayos) en la estación invernal causan la mayor parte de daños a los equipos electrónicos (P.C. , EQ. TELEC. , C. AUT.; etc.). Aunque estos estén debidamente protegidos, sus protecciones no son capaces de salvaguardarlos, o por que muchas veces los dispositivos de protección no soportan la embestida del fenómeno atmosférico.
- Cuando se realice un diseño de protecciones haciendo uso de pararrayos (conocidos técnicamente como lightning arrester) y supresores de transitorios (Varistores) debe de tenerse el sumo cuidado de elegir los elementos adecuados, con características para que cuando estos entren en funcionamiento (pararrayos) se complementen y protejan a la carga para la cual el diseñador quiere darle inmunidad y una mayor confiabilidad a las protecciones (NORMA C62.41 -1992).
- La aplicación del mapa de niveles isoceraunicos y la aplicación de las normas hechas para protección de equipos electrónicos (Normas listadas en este documento), son de gran importancia cuando se toma la decisión de ofrecer protección a equipos en el lugar donde se instalarán. Si estas herramientas son aplicadas, se disminuirán grandemente los efectos que las descargas atmosféricas producen (tanto para los efectos directos como los indirectos o secundarios).

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] LINES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, WESTINHOUSE
- [2] RUDENBERG REINHOLD, ELECTRICAL SHOCK IN POWER SYSTEMS, HARVARD UNIVERSITY PRESS, CAMBRIGE MASSACHUSET, 1968
- [3] ELECTROPORCELANA S.A. DE C.V.  
COLOMBIA
- [4] REVISTAS DE APLICACIÓN, IEEE
- [5] IEEE, ELECTRIC POWER DISTRIBUTION FOR INDUSTRIAL PLANTS, RED BOOK, IEEE STD 141 - 1993
- [6] IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR, POWERING AND GROUNDING SENSITIVE ELECTRONIC EQUIPMENT, EMERALD BOOK, IEEE STD 1100-1992.
- [7] IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR, ELECTRIC POWER SYSTEMS IN COMMERCIAL BUILDINGS, GRAY BOOK, IEEE STD 241 - 1990.
- [8] IEEE STANDARDS COLLECTION, SURGE PROTECTION, EDITION 1995.
- [9] ELEMENTOS DE MUESTREO, SCHEAFFLER, RICHARD L., MENDENHALL, WILLIAN.
- [10] JOSE RAUL PINEDA LEMUS, HECTOR ANTONIO CHICAS MORAGA, PROYECTO DE INGENIERIA ELECTRICA, ELBORACION DEL MAPA DE NIVELES ISOCERAUNICOS DE EL SALVADOR, 1997
- [11] REVISTAS DE APLICACIÓN DE LA IEEE. E INFORMACION OBTENIDA DE PAGINAS WEB EN INTERNET, Y OTROS.

# ANEXOS

## **CALCULO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS USANDO LA NORMA FRANCESA NFC - 102**

Para realizar el calculo usaremos como ejemplo el edificio de la administración académica central de la Universidad de El Salvador. Para realizar el calculo utilizaremos la NFC -102, y se hace con el fin de si existe la necesidad de colocar un pararrayos en el edificio para que proteja al equipo electrónico como las computadoras y la planta telefónica y más importante aún a los ocupantes. Para el calculo nos auxiliaremos del mapa de niveles ceráunicos de El Salvador elaborado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de esta universidad. También se utilizaran las medidas del edificio así como si hay estructuras de gran altura cercanas y arboles altos alrededor de estos.

La norma NFC -102 ofrece una guía de evaluación de riesgos de impactos de rayos, y esta destinada a ayudar y analizar los diferentes criterios que se pueden hacer uso y que permitirán al diseñador a tomar la decisión de determinar la mejor protección y el nivel de protección requerido. La capital de nuestro país esta montada sobre un nivel isoceraunico de entre 48 y 81 días trueno al año. La evaluación de daños se hace de acuerdo a la ocupación del edificio (de si hay personas o no), necesidad de no interrumpir los servicios, edificios muy altos cerca y no muy aislados, si contiene equipo muy delicado a los disturbios causados por un rayo, y a la vez si existen archivos de gran importancia.

Para nuestro caso, el edificio se mantiene ocupado por personas, tienen equipos de muy delicada circuitería electrónica y por ende de fácil daño, los archivos existentes en el lugar son de gran importancia para la universidad en general, y por ultimo existe la necesidad de proteger la infraestructura del edificio. Para determinar el grado de protección que necesita el edificio, a continuación seguiremos una serie de pasos para encontrar lo buscado.

Determinación de la densidad de impactos del rayo sobre el terreno.

$$N_g = N_a / 2.2 \text{ (densidad de impactos sobre el terreno)}$$

Donde:  $N_a = N_i \times K$ :

$K$  = Esta es una constante que se ha determinado en base a investigaciones de campo con un valor que oscila entre 0.1 a 0.2, tomándose un valor de 0.16 el cual es bastante preciso para efectos de calculos. Se usa además un valor de 81.0 de nivel isoceraunico que es el máximo del área, por que de debe de diseñar siempre para valores extremos y minimos.

Por lo tanto:  $N_a = 81 \times 0.16 = 12.96$  descargas/kmt<sup>2</sup>/año (Valor máximo de  $N_a$ )  
 $N_a = 48 \times 0.16 = 7.68$  descargas/kmt<sup>2</sup>/año (Valor mínimo de  $N_a$ )

sustituyendo valores en esta expresión:

$$N_g = 12.96/2.2 = 5.89 \text{ impactos /año/kmt}^2 \quad (\text{utilizando valor máximo})$$

$$N_g = 7.68/2.2 = 3.5 \text{ impactos /año/kmt}^2 \quad (\text{utilizando valor mínimo})$$

Si utilizamos el nivel cerámico local es:

$$N_k : N_{g\text{máx}} = 0.04 \times N_k^{(1.25)} \quad (\text{a})$$

o una expresión aproximada de  $N_{g\text{máx}} = N_k/10$

Ahora que  $N_g$  máximo es según la norma NFC -102 =  $2N_g = 5.89 \times 2 = 11.78$

Y utilizando el nivel cerámico local utilizando expresiones aproximadas, obtenemos de (a):

$N_{g\text{máx}} = 0.04 \times 81.0^{1.25} = 9.72 \text{ impactos /año/kmt}^2$ , que es un valor aproximado a los datos anteriores.

De la tabla B2.2 de la norma anexa a este documento, encontramos que  $N_k$  para un valor de  $N_{g\text{máx}} = 3.858 \text{ impactos/año/kmts}$ , el valor de  $N_k = 3.33$

Ahora la frecuencia anual media  $N_d$  de impactos directos sobre una estructura se evalúa a partir de:

$$N_d = (N_g) \times (A_e) \times (C_1) \times (10^{-6}) / \text{año}$$

donde:  $N_d$  = densidad anual media de impactos de rayos en la región donde está situada la estructura (número de impactos /ato/kmts).

$A_e$  = Superficie de captura equivalente de la estructura aislada ( $\text{mts}^2$ )

$C_1$  = Coeficiente relacionado con el entorno.

Por lo tanto  $A_e$  para una estructura rectangular se calcula por la siguiente fórmula:

$$A_e = LW + 6H(L+W) + 9\pi H^2$$

$$A_e = (15 \times 40) + 6 \times 12 \times (15 + 40) + 9 \times (3.141516) \times 12^2$$

$A_e = 8631.5 \text{ mts}^2$  Superficie de captura equivalente de la estructura.

$C_1$  se calcula de acuerdo a la topología del lugar, en la norma NFC -102 en la tabla B2 nos ayuda a determinar este coeficiente, y el valor encontrado es:

Se tomara un valor de  $C1 = 0.5$  por que la estructura se encuentra situada en un lugar con estructuras cercanas mas altas y a la vez existen arboles que están a una misma altura y otros con mayor altura. Por lo tanto el valor de  $Nd$  será:

$$Nd = 11.78 \times 8631.5 \times 0.5 \times 10^{-6} = 0.051 \text{ /año}$$

Determinación de  $Nc$  (frecuencia aceptada de rayos sobre una estructura)

$Nc$  se calcula por la siguiente fórmula:

$$Nc = 5 \times 10^{-3} / C \quad \text{donde } C = C2 \times C3 \times C4 \times C5$$

donde :  $C2$  = Coeficiente de la estructura  
 $C3$  = Contenido de la estructura  
 $C4$  = Ocupación de la estructura  
 $C5$  = Consecuencia sobre el entorno.

De las tablas B5, B6, B7 y B8, se obtiene los valores de:

$C2 = 1$  (Posee techo común)  
 $C3 = 2$  (posee gran valor para la universidad por archivos de los estudiantes)  
 $C4 = 3$  (Por su difícil evacuación o riesgo de pánico)  
 $C5 = 2$  (Hay necesidad de continuar con el servicio y no hay consecuencia con el entorno)

$$\text{Por lo tanto } C = 1 \times 2 \times 3 \times 2 = 12$$

$$\text{Entonces: } Nc = (5 \times 10^{-3}) / 12 = 0.000667$$

La selección del nivel de protección se establece por el siguiente criterio:

- Si  $Nd < \text{ó} = Nc$ , el nivel de protección no es necesario.
- Si  $Nd > Nc$ , se debe de instalar un sistema de protección contra la descarga de eficacia  $E > \text{ó} = 1 - (Nd/Nc)$ , y el nivel de protección se selecciona de acuerdo a la tabla B10 de la norma NFC - 102.

Como  $Nc = 0.000667$  es menor que  $Nd = 0.051$ , entonces su protección es necesaria, por lo tanto hay que determinar el nivel de protección requerido, este nivel se encuentra calculando la eficacia  $E$ .

$$\text{Donde } E = 1 - (0.000667 / 0.051) = 0.986$$

Entonces de la tabla B10 de la norma se encuentra que E es mayor que 0.98, por lo tanto necesita que se escoja el nivel de protección y medidas complementarias.

Entonces según la tabla B10, se escogerá un nivel de protección de 1 con una corriente de cresta máximo de 2.8 KAMP y una distancia de cebado del rayo de 20 metros. Dentro de las medidas complementarias están la utilización de supresores de transitorios, reguladores de voltajes, y otros.

Como se puede observar, los cálculos dan como resultado de que las oficinas de la administración académica central necesitan de la utilización de pararrayos para la protección de la estructura, y además de equipo de protección opcional para los diferentes tipos de equipos instalados dentro de el edificio y además como prioridad la protección de sus ocupantes.

**NOTA:** Todos los cálculos seguidos en este ejemplo ilustrativo fueron hecho en base a los requerimientos que la norma NFC - 102 pide o desarrolla para determinar si hay la necesidad de proteger una estructura en general.

## COMO SE ELABORO EL MAPA DE NIVELES ISOCERAUNICOS

El mapa de niveles isoceraunicos aquí anexar, se elaboró en la Escuela de Ingeniería Eléctrica como Proyecto de Ingeniería. Para elaborarlo se hizo uso de la información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional, el cual nos brindó la información necesaria para la hecha de este mapa. Como por definición el nivel isoceraunico es la cantidad de truenos que caen en el año en el punto de observación, entonces esta definición se utilizó para nuestro propósito. Para la toma de datos se realizó por medio de los observadores que tiene el servicio meteorológico por todo El Salvador.

Los puntos de observación tomados en cuenta para la elaboración del mapa fueron 32 de los cuales los clasifican como puntos de observación tipo A y B. Esta clasificación se debe a que existen dos tipos de observadores, los que tienen un salario y los que trabajan a honores. El período de años tomado para este mapa son dos años. La recolección de los datos se hizo por medio de las libretas que proporcionaban cada uno de los observadores mensualmente durante toda la época de invierno.

Una vez recolectados todos los datos requeridos de los 32 puntos de observación instalados en todo el país, se procede a escoger un método estadístico para tabular toda la información. Para el dibujo del mapa se hizo uso de métodos topográficos y también por medio de paquetes de software (SURFER), con el se comprobó el método topográfico utilizado.

Cada isolínea dibujada dentro del mapa indica tienen el mismo nivel de exposición ceraunico, por ejemplo si seguimos la isolínea con un valor de 81, quiere decir que toda la línea marcada con ese valor indica que en esa zona por lo menos caerán 81 truenos al año.

Es por esa razón que este mapa nos da información sobre el nivel ceraunico del lugar en consideración y nos ayudaría a tomar decisiones para no sobredimensionar las protecciones e incurrir en gastos innecesarios.

El mapa elaborado se muestra en este anexo, en el se pueden observar las isolíneas mencionadas.



## ANEXO A

(Normativo)

## MODELO DE PROTECCIÓN

## A 1 DESCRIPCIÓN DE LA FASE DE APROXIMACIÓN

## A.1.1. Determinación del punto de impacto

La formación o llegada de una nube de tormenta provoca la creación de un campo eléctrico (ambiente) entre la nube y el suelo. Este campo eléctrico puede superar en el suelo los 5 kV/m, iniciando así la creación de descargas corona a partir de las irregularidades del suelo o de las masas metálicas.

El rayo comienza por la formación en el seno de la nube tormentosa de un trazador descendente que se propaga a impulsos hacia el suelo. El trazador descendente transporta las cargas eléctricas, provocando el incremento del campo en el suelo.

Un trazador ascendente se desarrolla a partir de una estructura o de un objeto conectado a tierra. Se propaga hasta que encuentra el trazador descendente y la corriente del rayo fluye por el canal así creado. Otros trazadores ascendentes pueden ser emitidos desde diferentes estructuras sobre el suelo. El primero entre ellos que encuentra el trazador descendente determina el punto de impacto de la descarga (figura A.1).

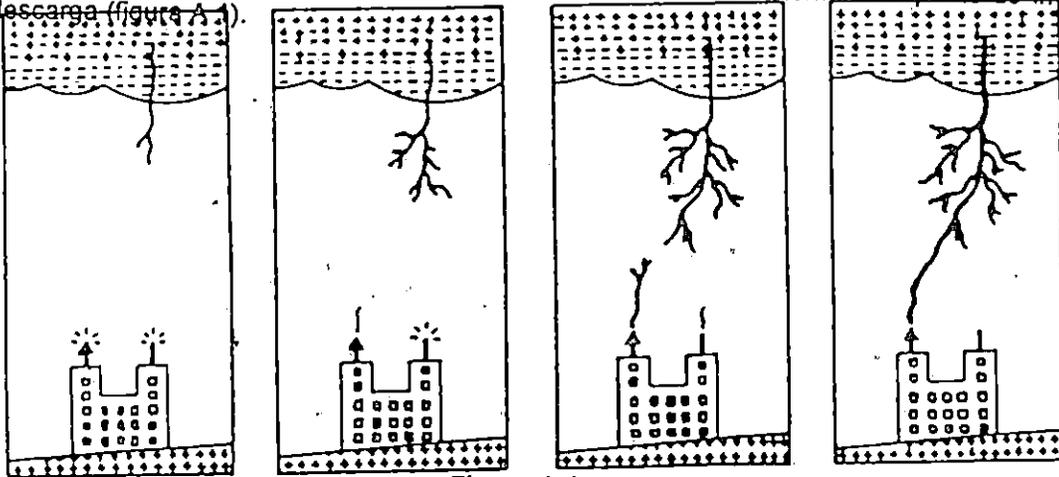


Figura A 1

NOTA: Esta descripción es válida sólo en el caso de rayo descendente negativo, único caso en que se aplica el modelo electrogeométrico. Este tipo de rayo es, con diferencia, el más frecuente.

## A 1.2 Velocidad de propagación de los trazadores

Recientes experimentos realizados, provenientes de la naturaleza, muestran que las velocidades medias de los trazadores ascendente y descendente son comparables durante la fase de aproximación. La relación de las velocidades  $v_a/v_d$  es aproximadamente 1 (entre 0,9 y 1,1).

Supondremos aquí que  $v = v_a = v_d = 1\text{m}/\mu\text{s}$  (valor medio medido de las velocidades de los trazadores), donde:

$v_a$ : velocidad del trazador ascendente  
 $v_d$ : velocidad del trazador descendente  
 $v$ : velocidad común.

## A 2 VENTAJA EN LA PROTECCIÓN CON UN PDC

### A 2.1. Ganancia en tiempo de cebado

Un PDC está diseñado para reducir el tiempo medio estadístico asociado al cebado del trazador ascendente. Un PDC presenta una ganancia en tiempo de cebado respecto a una punta simple emplazada en las mismas condiciones. Esta ganancia se evalúa en laboratorios de alta tensión siguiendo las recomendaciones del párrafo 2.2.2.1 y del Anexo C de la presente norma.

### A 2.2. Ganancia en longitud del trazador ascendente

La ganancia en longitud del trazador ascendente  $\Delta L$  viene definida por  $\Delta L_{(m)} = v_{(m/\mu s)} \cdot \Delta T_{(\mu s)}$

La zona protegida se determina a partir del modelo de protección descrito a continuación, sobre las bases del modelo electrogeométrico.

## A 3 MODELO DE PROTECCIÓN

### A 3.1. Radio de protección de una punta simple

En el caso de una punta simple, según el modelo electrogeométrico, el punto de impacto de la descarga viene determinado por el objeto sobre el suelo que primero se encuentre a la distancia  $D$  del trazador descendente, incluso si este objeto es el propio suelo llano. La distancia  $D$  entre el punto de encuentro de los trazadores descendente y ascendente se denomina "distancia de cebado": es también la longitud de desarrollo del trazador ascendente.

Por tanto, todo sucede como si el extremo del trazador descendente estuviese rodeado de una esfera ficticia, de radio  $D$ , centrada sobre el extremo, y como si esta esfera acompañase rígidamente el extremo del trazador descendente.

En el caso de una punta simple de altura "h" con respecto a la superficie de referencia (techo del edificio, suelo...) existen tres posibilidades (ver figura A 2):

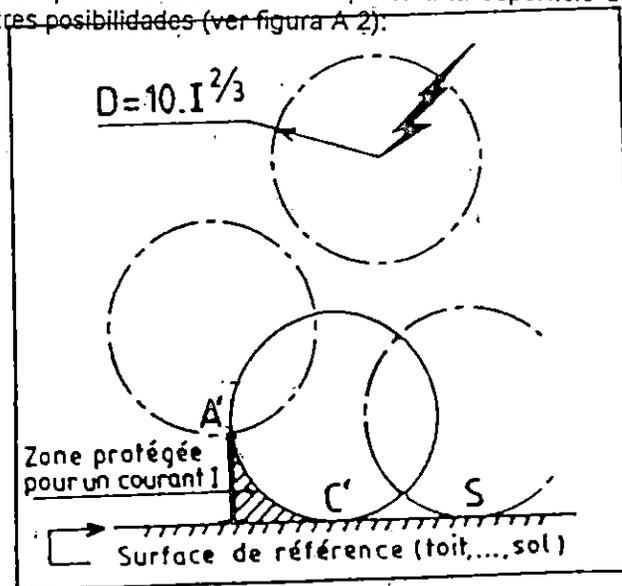


Figura A 2 - Método de la esfera ficticia

- si la esfera entra en contacto únicamente con la punta vertical (A'), ésta constituirá el punto de impacto de la descarga,
- si la esfera entra en contacto con la superficie de referencia sin tocar la punta, el rayo tocará únicamente el suelo en S,
- si la esfera entre en contacto con la punta simple y la superficie de referencia simultáneamente, hay dos puntos de impacto posibles: A' y C', pero el impacto jamás podrá producirse dentro de la zona sombreada (ver figura A 3).

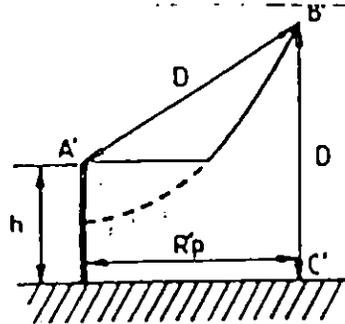


Figura A 3

La distancia de cebado D viene generalmente dada por la siguiente ecuación:

$$D_{(m)} = 10.l^{2/3}, \text{ donde}$$

l: pico de corriente del primer arco de retorno.

### A 3.2. Radio de protección de un PDC

En el caso de un PDC, existe una ganancia en el de cebado  $\Delta T$ , con  $\Delta L = v \cdot \Delta T$ , y los puntos de impacto posibles son A y C (figura A 4) con un radio de protección  $R_p$  tal que:

$$R_p = \sqrt{h(2D-h) + \Delta L(2D+\Delta L)}$$

donde,

D: distancia de cebado,

$\Delta L$ : ganancia en longitud del trazador ascendente definido por  $\Delta L = v \cdot \Delta T$ ,

h: altura de la punta del PDC por encima de la superficie a proteger,

$R_p$ : radio de protección del PDC,

$\Delta T$ : ganancia en tiempo de cebado del trazador ascendente continuo.

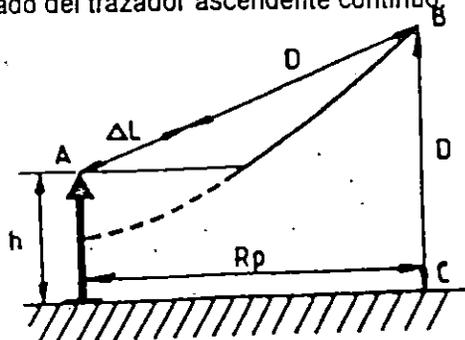


Figura A 4

ANEXO B

(Normativo)

GUÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE IMPACTO DE RAYO  
Y SELECCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN PARA UNA INSTALACIÓN  
EXTERIOR DE PROTECCIÓN CONTRA LA DESCARGA

**B1 GENERALIDADES**

La guía de evaluación de riesgo de impacto 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. Unicamente se tratan aquí los daños causados por el impacto directo del rayo sobre la estructura a proteger y el paso de la corriente del rayo por el sistema de protección contra la descarga.

En la mayoría de los casos, la necesidad de protección es evidente. Citaremos, por ejemplo, el caso de:

- agrupaciones numerosas de personas,
- necesidad de continuidad de los servicios públicos,
- zonas de gran densidad de impactos de rayo,
- edificios muy altos o aislados,
- edificios que contengan materiales explosivos o inflamables, o patrimonio cultural irremplazable.

Ciertos ejemplos de efectos causados por un rayo para diferentes tipos de estructuras comunes se relacionan en la tabla B1 a modo de información.

Tabla B 1

Clasificación de las estructuras	Tipo de estructura	Efectos del rayo
Estructuras comunes (ver nota)	Casa particular	Perforación de las instalaciones eléctricas, incendio y daños materiales que se limitan normalmente a los objetos próximos al punto de impacto o de paso de la descarga.
	Casa de campo	Riesgos de incendio y de chispas peligrosas. Riesgo de corte de corriente: muerte del ganado debido a la pérdida de control de la ventilación y de la distribución de los alimentos.
	Teatros, escuelas, grandes superficies, áreas deportivas.	Riesgo de pánico y de fallo de las alarmas de incendio, causando retraso en la lucha contra el fuego.
	Bancos, compañías de seguros, sociedades comerciales	Como los anteriores, más problemas con pacientes en cuidados intensivos y dificultad de auxilio a las personas impedidas.
	Industrias	Efectos adicionales dependiendo del contenido de las fabricas, desde daños menores hasta inaceptables y a la pérdida de producción.
	Museos y emplazamientos arqueológicos	Pérdidas irremplazables de patrimonio cultural.

NOTA: Los equipos electrónicos sensibles pueden estar instalados dentro de cualquier tipo de estructura que puede ser fácilmente dañada por las sobretensiones debidas a la descarga.

No se pueden dar reglas para tales casos, pero se puede realizar una evaluación del riesgo, teniendo en cuenta el peligro de impactos de rayo y los factores siguientes:

1. Entorno del edificio,
2. Naturaleza de la estructura del edificio,
3. Valor de su contenido,
4. Ocupación humana y riesgo de pánico,
5. Consecuencias que tendrían sobre el entorno los daños al edificio.

La situación del edificio dentro de su entorno y su altura serán consideradas para el cálculo del riesgo de exposición.

En ciertos casos, algunos criterios específicos a una estructura no se pueden evaluar y pueden prevalecer sobre toda otra consideración. Entonces se pueden aplicar medidas de protección más severas que las que resultan de aplicar esta guía.

La selección de un nivel de protección adecuado para la colocación de una IEPR en un lugar se basa en la frecuencia de impactos de rayo  $N_d$  previstas sobre la estructura o la zona a proteger y en la frecuencia anual aceptable de rayos  $N_c$ .

## B 2 DETERMINACIÓN DE $N_d$ y $N_c$

### B 2.1 Densidad de impactos de rayo sobre el terreno $N_g$

La densidad de rayos sobre el suelo, expresado en número de rayos por  $\text{km}^2$  se determina por:

- la carta de densidad  $N_a$  en la figura B4. En este caso  $N_g = N_a/2,2$
- la consulta de una red de localización =  $N_g$  con  $N_g$  máx. =  $2 \cdot N_g$
- la utilización del nivel será único local  $N_k$ :  $N_{g\text{máx}} = 0,04N_k^{1,25} = N_k/10$

El valor  $N_g$  máx toma en cuenta la cantidad de impactos máxima y la precisión de detección.

$N_k$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$N_{g\text{máx}}$	0,3	0,7	1,2	1,7	2,2	2,8	3,4	4,0	4,7

### B 2.2. Frecuencia esperada de impactos directos de rayos ( $N_d$ ) sobre una estructura

La frecuencia anual media  $N_d$  de impactos directos sobre una estructura se evalúa a partir de la expresión:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6} / \text{año},$$

donde

$N_g$ : densidad anual media de impactos de rayo en la región donde está situada la estructura (número de impactos/año/ $\text{km}^2$ ).

$A_e$ : superficie de captura equivalente de la estructura aislada ( $\text{m}^2$ ).

$C_1$ : coeficiente relacionado con el entorno.

La superficie de captura equivalente se define como la superficie sobre el suelo que tiene la misma probabilidad anual de recibir el impacto directo de un rayo que la estructura.

Para las superficies aisladas, la superficie de captura equivalente  $A_e$  es la superficie comprendida entre las líneas obtenidas por la intersección entre la superficie del suelo y una línea de pendiente 1.3 que pasa por el punto más alto de la estructura y dé la vuelta a ésta (ver figura B 3).

Para una estructura rectangular de longitud  $L$ , anchura  $W$  y altura  $H$ , la superficie de captura es igual a:  $A_e = LW + 6H(L+W) + 9\pi H^2$ .

La topografía del lugar y los objetos situados en el interior de una distancia  $3H$  a la estructura influyen de forma significativa en su superficie de captura. Este factor se tiene en cuenta a través de l coeficiente  $C_1$  (tabla B 2).

Tabla B 2 - Determinación del coeficiente  $C_1$

Situación relativa de la estructura	$C_1$
Estructura situada en un espacio donde hay otras estructuras o árboles de la misma altura o más alto	0,5



Estructura rodeada de estructuras más bajas	0,75
Estructura aislada	1
Estructura aislada situada sobre una colina o promontario	2

- Cuando la superficie de captura equivalente de una estructura cubre completamente otra estructura, ésta última no se tendrá en cuenta.
- Cuando se cubre la superficie de captura de varias estructuras, la superficie de captura común correspondiente se considera como una única superficie de captura.

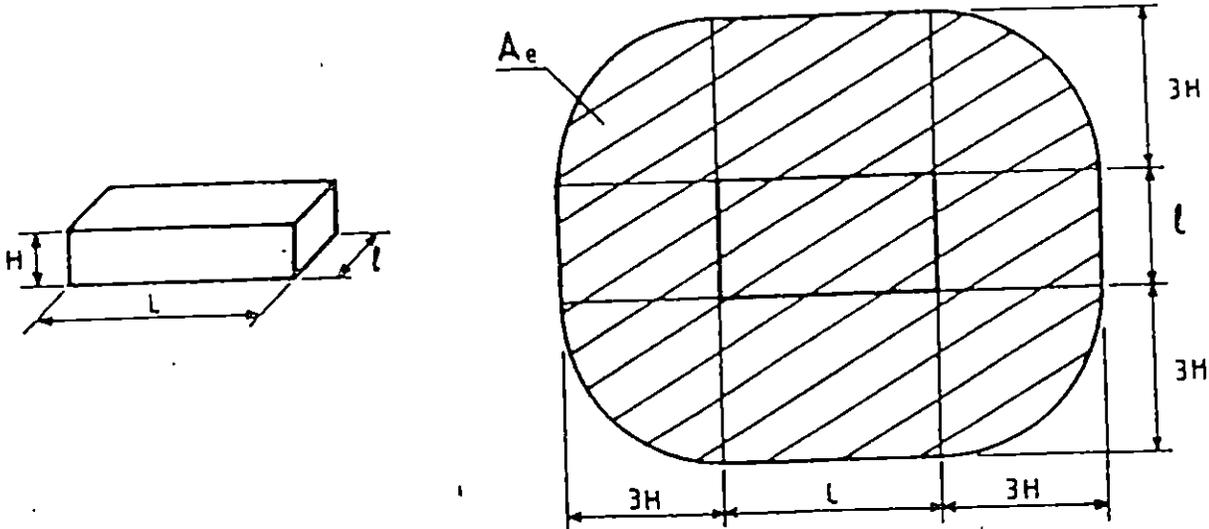
NOTA: Se pueden utilizar otros métodos más sofisticados para una evaluación más precisa de la superficie de captura equivalente.

### Figuras B 3 - Ejemplos de cálculo

1°) La superficie de captura para un edificio rectangular es:

$$A_e = L \times W + 6H(L + W) + 9\pi H^2$$

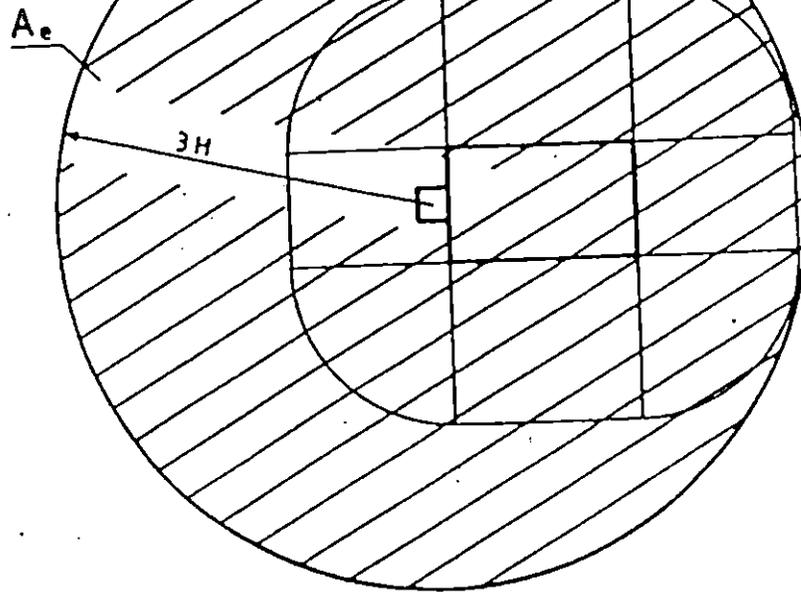
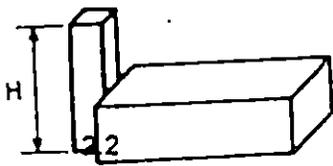
FIGURE  
1/ W



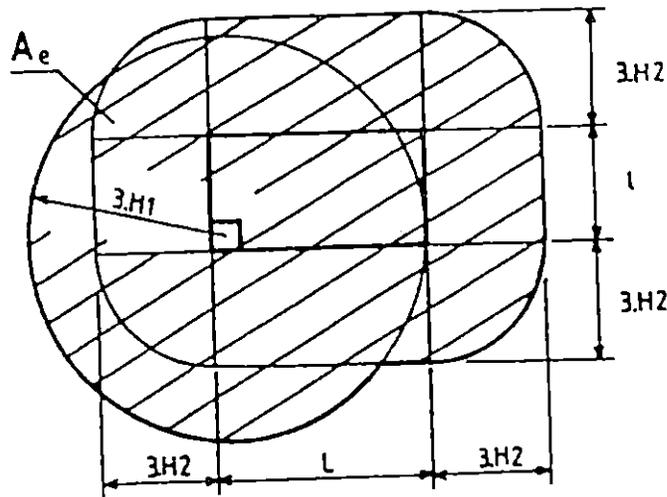
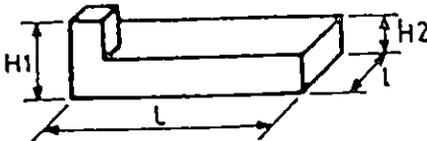
2°) En el caso de un edificio en que hay una parte prominente.

La superficie equivalente de la parte prominente engloba total o parcialmente esta parte más la base:

$$2.1 A_e = 9\pi H^2$$



2.2.



B 2.3. Frecuencia aceptada de rayos ( $N_C$ ) sobre una estructura

B 2.3.1. Generalidades

Los valores de  $N_C$  se estiman a través del análisis del riesgo de daños teniendo en cuenta los factores apropiados, tales como:

- el tipo de construcción,
- el contenido de la estructura,
- la ocupación de la estructura,
- las consecuencias del impacto.

B 2.3.2. Determinación de  $N_C$

Según lo dicho anteriormente, cuatro factores determinados, dados por los coeficientes  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  y  $C_5$  deben ser evaluados con la ayuda de las tablas B 5 a B 8. la estructura.

Llamamos  $C = C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5$

$$N_C \text{ se expresa como } N_C = \frac{5,510^{-3}}{C}$$

Tabla B 5

C <sub>2</sub> , coeficiente de estructura				
	Tejado	Metal	Común	Inflamable
Estructura				
Metal		0,5	1	2
Común		1	1	2,5
Inflamable		2	2,5	3

Tabla B 6

C <sub>3</sub> , contenido de la estructura	
Sin valor o no inflamable	0,5
Valor común o normalmente inflamable	1
Gran valor o particularmente inflamable	2
Valor excepcional, irremplazable o muy inflamable, explosivo	3

Tabla B 7

C <sub>4</sub> , ocupación de la estructura	
No ocupada	0,5
No ocupada normalmente	1
De difícil evacuación o riesgo de pánico	3

Tabla B 8

C <sub>5</sub> , consecuencias sobre el entorno	
Sin necesidad de continuidad en el servicio y ninguna consecuencia sobre el entorno	1
Necesidad de continuidad en el servicio y ninguna consecuencia sobre el entorno	2
Consecuencias para el entorno	5

NOTA: Algunas reglamentaciones específicas podrían imponer otros valores de  $N_C$ , en ciertos casos particulares

### B 3 MÉTODO DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE PROTECCIÓN

El valor de la frecuencia establecida de rayos  $N_C$  será comparable con el valor de la frecuencia esperada de rayos sobre la estructura  $N_D$ .

Esta comparación permite decidir si es necesario un sistema de protección contra el rayo y, si lo es, qué nivel de protección:

- Si  $N_D \leq N_C$ , el sistema de protección no es necesario;
- Si  $N_D > N_C$ , se debe instalar un sistema de protección contra la descarga de eficacia  $E \geq 1 - N_C/N_D$  y el nivel de protección correspondiente se seleccionará según la tabla B 10.

La concepción de un sistema de protección contra la descarga deberá respetar las especificaciones dadas en la norma para los niveles de protección seleccionados.

Si se instala un sistema de protección contra el rayo de eficacia  $E'$  menor que la  $E$  calculada, las medidas complementarias serán efectuadas en la obra. Las medidas adicionales de protección son, por ejemplo:

- las medidas que limitan la tensión de paso o de contacto,
- las medidas que limitan la propagación del fuego,
- las medidas que pueden reducir los efectos de las sobretensiones inducidas por la descarga sobre los equipos sensibles.

En el diagrama lógico de la figura B 9 se da un método práctico para escoger el nivel de protección.

La tabla B 10 adjunta al diagrama B 9 da los valores críticos de la eficacia crítica  $E_c$  correspondiente a los límites entre los diferentes niveles de protección y los niveles de protección correspondientes a las eficacias calculadas  $E$ .

Tabla B.9 - Determinación de la necesidad y el nivel de protección

Entrada de datos Fórmulas	Cálculos	Resultados
Superficie de captura equivalente: $A_e = LW + 6H(L+W) + 9 \pi H^2$ (en el caso de un volumen paralelepípedo)	$L =$ $l =$ $H =$ $H^2 =$	$A_e =$
Frecuencia establecida de impactos directos sobre una estructura $N_d = N_0 \text{ máx. } A_e C_1 \cdot 10^{-6}$	$N_0 =$ $A_0 =$ $C_1 =$	$N_d =$
Frecuencia establecida de impactos sobre una estructura: $5 \cdot 10^3$ $N_c = \frac{5 \cdot 10^3}{C} \cdot C = C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5$	$C_2 =$ $C_3 =$ $C_4 =$ $C_5 =$ $C =$	$N_c =$
<ul style="list-style-type: none"> <li>- SI <math>N_d \leq N_c</math> : PROTECCIÓN OPCIONAL</li> <li>- SI <math>N_d &gt; N_c</math> : PROTECCIÓN NECESARIA</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinar el nivel de protección requerido calculando la eficiencia <math>E = 1 - N_c/N_d</math></li> <li>- Instalar uná IEPR de nivel de protección correspondiente a la <math>E</math> calculada (ver tabla B 10)</li> </ul>		

Tabla B 10

E Eficiencia calculada	Nivel de protección correspondiente	I (kA) Corriente de cresta máxima	D(m) Distancia de cebado
$E > 0,98$	Nivel I + medidas complement.	-	-
$0,95 < E \leq 0,98$	Nivel I	2,8	20
$0,80 < E \leq 0,95$	Nivel II	9,5	45
$0 < E \leq 0,80$	Nivel III	14,7	60