

**INVESTIGACIONES SOBRE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFERICAS
EN COLOMBIA**

**LEONARDO JAVIER SIERRA TAMARA
GONZALO ANDRES ESCOBAR MORALES**

MONOGRAFÍA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.
MAYO DE 2004**

**INVESTIGACIONES SOBRE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFERICAS
EN COLOMBIA**

**LEONARDO JAVIER SIERRA TAMARA
GONZALO ANDRES ESCOBAR MORALES**

**Monografía presentada como requisito para optar el titulo de Ingeniero
Electricista.**

**Director:
HEDIER HUMBRETO LASTRE GÓMEZ
Ingeniero Electricista
Magíster en Potencia Eléctrica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.
MAYO DE 2004**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

28 de mayo de 2004

Cartagena de Indias D. T. y C., 28 de Mayo de 2004.

Señores:

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

PROGRAMA DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

La Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente nos permitimos presentar a ustedes para que sea puesto a su consideración el estudio y aprobación de la Monografía que lleva por nombre: "**INVESTIGACIONES SOBRE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFERICAS EN COLOMBIA**", presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Electricista.

Agradecemos de antemano la atención prestada.

Atentamente,

Leonardo J. Sierra T.

Gonzalo A. Escobar

Cartagena de Indias D. T. y C., 28 de Mayo de 2004.

Señores:

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

PROGRAMA DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

La Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente me permito informar que la monografía que lleva por nombre: **“INVESTIGACIONES SOBRE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFERICAS EN COLOMBIA”**, ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos. Como director de la misma, considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

En espera de su positiva respuesta.

Cordialmente,

HEDIER HUMBERTO LASTRE GÓMEZ

Ingeniero Electricista
Magíster en Potencia Eléctrica

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS	03
1.1 Formación de las descargas.	03
1.1.1 Carga eléctrica en las nubes	03
1.1.2 Evolución de la descarga	05
1.1.2.1 Proceso de formación del rayo	05
1.1.2.2 Líder escalonado	08
1.1.2.3 Descarga de retorno	11
1.1.2.4 Líder dardo	12
1.1.3 El trueno	13
1.2 Características de las descargas eléctricas	14
1.3 Medición de las descargas atmosféricas.	17
1.4 Nivel cerámico	17
1.4.1 Curvas de probabilidad de nivel cerámico y densidad de descargas a tierra para Colombia	18
1.4.1.1 Variación espacial del nivel cerámico	18
1.4.1.2 Evaluación global, regional y local de DDT en Colombia	19
1.4.1.3 Relación entre NCy DDT para Colombia, zona tropical	21
1.4.1.4 Evaluación de la relación	22
1.4.1.5 Curvas de probabilidad acumulada de NC y DDT	23
1.5 Número de descargas a una línea	25
1.5.1 Densidad de las descargas	25
1.5.2 Sombra Eléctrica	25
1.5.3 Número de descargas directas a la línea	27
1.5.4 Distribución en torres y vanos	27
1.6 Salidas de la línea	28
1.6.1 Salidas por falla de apantallamiento	28
1.6.2 Salidas por flameo inverso	29
1.7 Número total de salidas de la línea por descargas atmosféricas	29
2. Apantallamiento	30
2.1 Apantallamiento efectivo	30
2.1.1 Distancia de impacto	32
2.1.2 Probabilidades de falla de apantallamiento	33
3. Fallas del aislamiento por flameo inverso	37
3.1 Cálculo de voltaje a través del aislamiento	37

3.2 Ondas viajeras	39
3.3 Impedancia característica de la torre	40
3.4 Impedancia de la puesta a tierra	40
4 Cálculos de salidas por descargas atmosféricas	42
4.1 Variables probabilísticas de una torre	42
4.2 Variaciones a lo largo de la línea	43
5 Ejemplo del diseño del aislamiento ante descargas atmosféricas	45
5.1 Características de la línea	45
5.2 Siluetas de las torres	45
5.3 Vanos, cotas y alturas	45
5.4 Conductores	46
5.5 Condiciones del sitio	47
5.6 Resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra	47
5.7 Diseño del aislamiento según sobretensiones atmosféricas	50
5.7.1 Modelo para la simulación digital emtp	50
5.8 Resultados de la simulación de descargas atmosféricas en el EMPT	53
5.8.1 Flameo inverso	53
5.8.2 Flameo directo	56
5.9 Simulación Montecarlo	57
6. NORMAS TÉCNICAS SOBRE PROTECCIÓN CONTRA RAYO	58
6.1 Normas Nacionales sobre protección contra rayo	58
6.1.1 La norma técnica colombiana de protección contra rayos NTC 4552	58
6.1.1.1 Objetivo de la Norma.	59
6.1.1.2 Alcance de la norma	59
6.1.1.3 Sistema integral de protección contra rayo	59
6.1.1.4 Metodología para implementar el Sistema integral de protección contra rayos en estructuras	61
6.1.1.5 Evaluación del factor de riesgo para protección contra rayos	61
6.2 Procedimiento recomendado por la Norma IEC 61024-1-1	64
6.3 La Norma Británica Bs 6651-1992	65
6.3.1 Número probable de impactos de rayo	65
6.3.2 Densidad de rayos a tierra	65
6.3.3 Área efectiva del conjunto	66
6.3.4 Vulnerabilidad del sistema	67
6.3.5 Cálculo del riesgo total	68
6.3.6 Protección para niveles de exposición	68
7 Sistemas localizadores y medidores de parámetros del rayo	70
7.1 Sistemas localizadores de rayos (Medición indirecta)	70
7.1.1 Principio de operación del sistema DF	72
7.1.2 Principio de operación del sistema TOA	74
7.2 Errores en los sistemas DF y TOA	76
7.3 Exactitud (accuracy) y eficiencia (efficiency) de los sistemas DF y TOA	77
7.4 Exactitud y eficiencia del sistema DF	79

7.5 Exactitud y eficiencia del sistema TOA	80
8 Red colombiana de medición y localización de descargas eléctricas Atmosfericas, Recma	81
8.1 Sistema LPAST	81
8.2 Sistemas LLP,Empresas Públicas de Medellín y Universidad Nacional de Colombia	83
8.3 Descripción de los sistemas de medición	84
8.3.1 El canal de descarga	85
8.4 Estación experimental de medición directa de rayos, Ilyapa	89
8.4.1 Localización de la estación	90
8.4.2 Selección de la estación requerida	91
8.5 Determinación de los parámetros de la estructura seleccionada	93
8.5.1 Impedancia al impulso de la torre	93
8.5.2 Sistema de puesta a tierra	95
8.5.3 Comportamiento de la torre cuando es golpeada por una descarga	95
8.5.4 Diseño y construcción de los instrumentos de medida	97
8.6 Bobina de Rogowski	98
8.6.1 Bobina de Rogowski diferenciadora, BRD	99
8.6.2 Bobina de Rogowski integradora, BRI	101
8.7 Resistencia Shunt, RS	103
CONCLUSIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	106

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Actividad de rayos en la geografía colombiana entre 1997-1999. Área = 1393 x 900 km ² .	19
Tabla 2. DDT evaluada para ocho sitios de la geografía colombiana por medio de tres fórmulas.	24
Tabla 3. Puestas a tierra según resistividad del terreno	41
Tabla 4. Características de los conductores	47
Tabla 5. Resistividad y resistencias de puesta a tierra	48
Tabla 6. . Puestas a tierra según resistividad del terreno	49
Tabla 7. Resultados de simulaciones atmosféricas para RPT = 20 Ω	54
Tabla 8. Resultados de simulaciones atmosféricas para RPT = 15 Ω	55
Tabla 9. Resultados de simulaciones atmosféricas para RPT = 10 Ω	55
Tabla 10. Valores del índice relacionado con la altura y el área de la estructura.	62
Tabla 11. Nivel de Gravedad	63
Tabla 12. Nivel de protección.	64
Tabla 13. Relación entre nivel ceráuneo y densidad de rayos a tierra según BS 6651-1992.	65
Tabla 14. Valor de F, tipo de estructura	66
Tabla 15. Valor de G, grado de aislamiento.	67
Tabla 16. Valor de H, tipo de terreno.	67
Tabla 17. Clasificación de estructuras y contenidos	68
Tabla 18. Clasificación del nivel de exposición.	69

Tabla 19.Exactitud en localización de rayos del sensor LLP TSS/420, mediante comparación con el evento producido en líneas o subestaciones de la EEB, por el rayo detectado.	79
Tabla 20. Ubicación de los sensores LPATS en Colombia.	82
Tabla 21. Ubicación de los sensores LLP - DF en Colombia.	83
Tabla 22. Impedancias de la torre de la estación Ilyapa para diferentes fórmulas	94

INTRODUCCIÓN

Hacia la mitad del siglo XVIII Benjamín Franklin demostró por primera vez la naturaleza eléctrica del rayo. Elevando una cometa en medio de una tormenta eléctrica y conduciendo una descarga hasta un condensador (botella de Leyden), demostró que había almacenado algo que presentaba el mismo comportamiento que las cargas eléctricas (que se generaban en esa época por fricción). Simultáneamente en otros lugares del mundo se realizaban investigaciones similares como la del científico ruso Giorgi W. Richman, quien pereció electrocutado en una de sus pruebas.

Más tarde, el mismo, B. Franklin inventaría el pararrayos, para defender las edificaciones y personas de los efectos del rayo.

Cuando a principios del siglo XX, aparecieron las primeras líneas de transmisión, volvió el rayo a causar problemas que representaban grandes perjuicios al transporte de la energía eléctrica; desde entonces comienzan proyectos de investigación de gran magnitud.

En 1905 se reportan ya estudios fotográficos de las descargas atmosféricas realizadas con una cámara móvil (ref.1). Vienen luego los proyectos donde se miden gradientes causados por la carga de las nubes (1920, ref.2), se utilizan el Klidonógrafo (1924, ref.3), el oscilógrafo (1928, ref.4) y muchos otros medios para un estudio detallado de la descarga atmosférica y su efecto en los sistemas de potencia eléctrica.

Con la construcción, en los años veinte, de las primeras líneas de 220 kV, se comienza a hacer evidente la necesidad de un estudio detallado de los proyectos específicos, debido a la gran repercusión que podrían tener sus salidas de servicio.

En el país, con la aparición en 1971 del Sistema Interconectado a 220 kV, se empieza a considerar importante la realización de mapas isoceráunicos; se van perfeccionando cada vez más las metodologías de recolección y

procesamiento de datos de salida de las líneas, y se va adquiriendo una buena comprensión del efecto de las descargas atmosféricas sobre las líneas.

Los rayos son los causantes de más del 60% de las salidas (apagones) del sistema eléctrico Colombiano. Colombia pierde anualmente más de seis millones de dólares por año de cerca de 7000 transformadores de distribución por efecto de los rayos. Los costos por baja calidad de la Energía Eléctrica en Colombia (armónicos, sobretensiones transitorias, y subidas de tensión) representan cientos de millones en pérdida y soluciones. Las aseguradoras colombianas pagan anualmente cientos de millones de pesos por quema de equipo eléctrico y electrónico, debido a impactos de rayos.

Según un estimado global, el país pierde cerca de cincuenta millones de dólares al año por causa de los rayos, pero no se tienen estadísticas de número de muertos, a pesar de que en la Serranía de San Lucas, cerca del municipio El Bague, departamento de Antioquía, se registra la mayor actividad mundial de rayos, donde – según la última medición efectuada en abril de 1997, arrojan que Colombia es uno de los países un mayor número de descargas atmosféricas en el año.

Sin embargo, hoy se hace necesario emprender proyectos que eviten el alto número de salidas en algunas líneas y elaborar un diseño más apropiado de líneas futuras, para evitar tanto el exceder un número establecido de salidas, como también, el sobredimensionamiento que se hace evidente en otros enlaces con espacios de aire y número de aisladores exagerado.

1.CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

1.1 Formación de las descargas.

1.1.1 Carga eléctrica en las nubes

Por la definición del diccionario, Lightning: descarga atmosférica o rompimiento del aislamiento entre dos superficies del medio ambiente cargadas eléctricamente con polaridades opuestas.

Las descargas atmosféricas se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera (alturas entre 5 y 12 km.). Al aumentar la carga se forman potenciales de hasta 300 MV. entre nubes y tierra.

La carga se forma en nubes de tormenta del tipo cumulonimbus. Se caracterizan por estar formadas por columnas de aire caliente que ascienden por convección, cuando la atmósfera se hace inestable, debido a grandes gradientes de temperatura. El interior de esas nubes, es recorrido por rápidas corrientes de aire ascendentes y descendentes de velocidades hasta de 300 km/h.

Para la formación de las descargas hay muchas teorías y controvertidas, pero todas las teorías reconocen la acción del viento sobre gotas de agua que caen como una gigantesca maquina electrostática, con factores diferentes, como son la ionización, temperatura y otros.

La carga eléctrica se forma al separar estas fuertes corrientes de aire, las partículas de agua y hielo, en partículas ionizadas. La carga se concentra en un disco de un diámetro de 1 km y una altura aproximada de 5 km. Esta carga es en la mayoría de los casos predominantemente negativa.

A medida que se empieza a incrementar la carga y el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se empieza a rebasar el gradiente critico (30 kV/cm en

aire seco, 10 kV/cm en las condiciones de presión y presencia de gotas de agua existentes en las nubes). Se empieza a presentar ionización del aire y por lo tanto, se van formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que es la tierra. Tipos de descarga: la descarga atmosférica se origina cuando un gradiente eléctrico(en la nube o en la tierra), excede el aislamiento del aire, provocando un movimiento de cargas en dirección a tierra(o nube), esas cargas pueden ser positivas o negativas, dependiendo de la carga predominante en la nube, la polaridad de esa predominancia define la polaridad de la descarga.

De esa manera una descarga de una nube con cargas positivas en dirección a tierra es llamada rayo positivo.

Una descarga de una nube con cargas negativas en dirección a tierra es llamada rayo negativo.

De esta manera existen cuatro posibles combinaciones en relación con las corrientes eléctricas de nube para tierra ellas pueden ser designadas negativas para los rayos negativos nube - tierra y para rayo positivo tierra - nube y lo contrario.

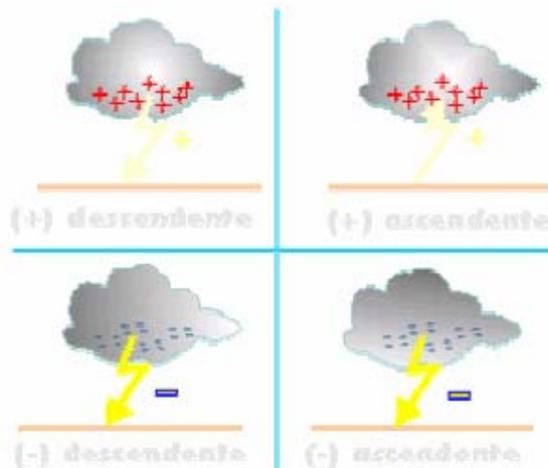


Figura 1.

Una descarga atmosférica puede ser seguida de un rayo de retorno o no, así, una descarga atmosférica se extingue en la región opuesta del origen (por ejemplo se extingue en la tierra, cuando la descarga es en descarga es en

dirección a tierra). Cuando ocurre una descarga extremadamente brillante que se propaga en dirección al inicio de la descarga, siguiendo el mismo camino de la descarga principal.

Los rayos descendentes son comunes en terrenos planos, ascendentes son observados en montañas o estructuras muy altas y aterrizadas.

En cuanto a la polaridad se ha verificado que la mayoría de los rayos (aproximadamente un 90%) son de polaridad negativa.

1.1.2 Evolución de la descarga

1.1.2.1 Proceso de formación del rayo

La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva p situada debajo de la nube y la carga negativa N de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera -es decir, la capacidad de la atmósfera de mantener una separación de cargas eléctricas-, el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo.

En ese instante, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo, el rayo transportará la carga correspondiente a 1020 electrones y proporcionará una potencia eléctrica equivalente a 100 millones de bombillas de alumbrado residencial. Durante esa fracción de segundo, la energía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética¹, energía acústica² y, finalmente, calor.

No se conoce exactamente el proceso físico mediante el cual la carga almacenada en la nube de tormenta se transfiere a la tierra en forma de rayo. Existen varias teorías que tratan de explicar con algún detalle las diferentes etapas de una descarga, pero hasta ahora no existe una teoría única y comprobada con la que estén de acuerdo todos los investigadores.

A pesar de las diferencias teóricas y experimentales, la mayoría está de acuerdo en que una descarga eléctrica atmosférica se compone de las siguientes cinco etapas:

1. Encendido de la descarga (*Preliminary breakdown*)
2. Líder escalonado (*Stepped leader*)
3. Proceso de enlace (*Attachment process*)
4. Descarga de retorno (*Return stroke*)
5. Líder dardo (*Dart leader*)

Estas cinco etapas se describen a continuación, tratando de dar una idea lo más clara posible sobre el fenómeno.

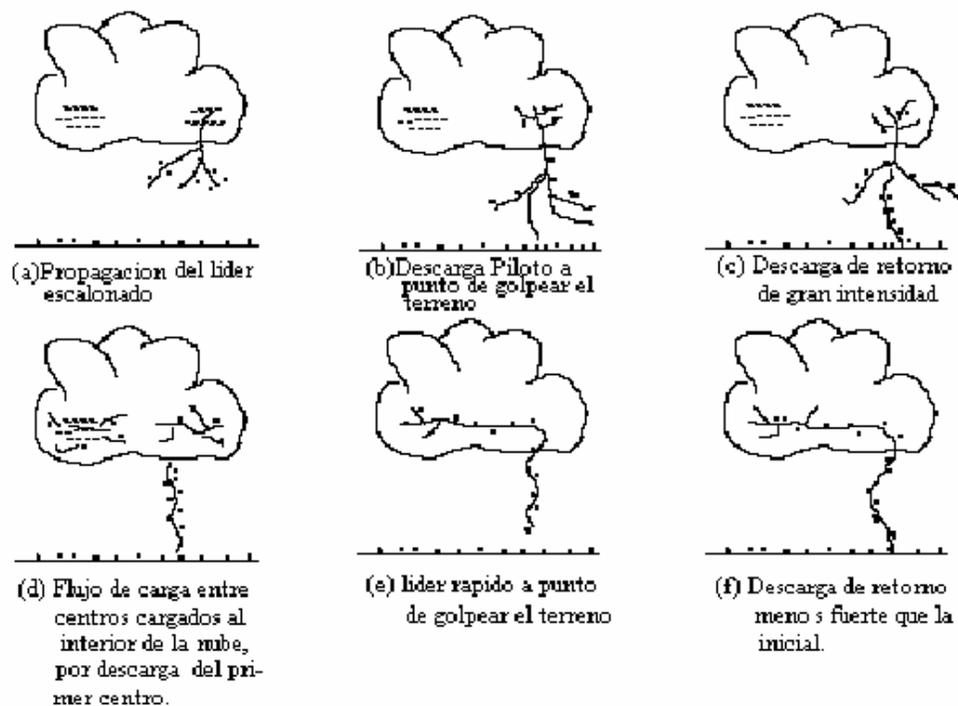


Figura 2.

- 1 El relámpago visible.
- 2 El trueno audible.

El camino de ionización que se inicia, lleva un primer flujo de carga hacia capas más bajas.

Este primer flujo es llamado el líder. El líder desciende unos 50 a 100 m. en un microsegundo, detiene su marcha unos 50 microsegundos mientras se

acumula la carga transferida desde la nube y se forma un nuevo camino ionizado que va a crear un nuevo avance del líder (figura 2). Estos avances y reposos de este primer flujo de carga, hacen que se le conozca como el Líder Escalonado. Este sigue avanzando hasta llegar cerca de los objetos y estructuras más altos, los cuales empiezan a emitir chispas que van al encuentro del líder.



Figura 3.

Al cerrarse eléctricamente el camino a tierra, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciéndose la descarga de retorno de gran luminosidad, etapa del rayo considerada como la más energética de todas. Luego, con intervalos de 0.01 a 0.1 segundos se producen nuevos flujos de electrones hacia abajo, abriéndose paso el camino ionizado que dejó el líder escalonado. Son los líderes rápidos que al golpear tierra producen descargas de retorno menos energéticas que la primera. En un rayo es típico que existan tres o cuatro líderes, pueden existir hasta 20 ó 30.

El canal de la descarga en cuyo interior existe un hilo conductor de plasma, puede llegar a temperaturas de 30.000°C y la presión del aire subir hasta 100 atmósferas. El diámetro del canal es de unos 10 cm.

La descarga de una nube puede generar nuevas reparticiones de carga en la atmósfera, presentándose descargas horizontales entre varias nubes de tormenta. Es posible por lo tanto, que se desencadene otra descarga atmosférica de similar ubicación a la anterior, que utilice los mismos caminos ionizados que dejó la primera.

1.1.2.2 Líder escalonado

El líder escalonado inicia la primera descarga de retorno al propagarse el rayo de nube a Tierra en una serie de pasos discretos. El líder escalonado es iniciado por el encendido de la descarga dentro de la nube. En la figura del proceso de formación de un rayo, el encendido de la descarga se muestra en la parte baja de la nube entre la región *N y p*.

Fotográficamente se ha observado que los pasos del líder son típicamente de 1 us. de duración y decenas de metros de longitud, con una pausa entre pasos de cerca de 50 u.s. El líder escalonado baja hasta diez o más culombios de carga negativa de la nube en milisegundos, con una velocidad promedio de bajada de 2×10^5 m/s

La corriente promedio del líder está en el rango de 100 a 1000 amperios. Los pasos tienen pulsos de corriente de al menos 1 kiloamperio. Asociado con estas corrientes hay pulsos de campos eléctricos y magnéticos con anchos de cerca de 1 u,s o menos y tiempos de ascenso (*rísetimes*) de 0.1 us o menos.

Al final del proceso del encendido de la descarga se tiene una columna de cargas negativas con un gradiente de potencial que excede en por lo menos un 10% el umbral de disrupción para esas condiciones atmosféricas, propiciando así la ionización.

Esta avalancha avanza hacia la Tierra y su contenido de cargas crece exponencialmente de acuerdo con la Ley de avalancha de electrones:

$$n_e = e^{\int(\alpha-\eta)dx}$$

Siendo α y η los coeficientes de ionización y recombinación respectivamente, y $(\alpha - \eta)$ el coeficiente de ionización efectiva, n_{ex} es el número de electrones en la cabeza de la avalancha y depende fundamentalmente de la presión y del campo eléctrico. Cuando la cabeza de la avalancha alcanza el tamaño crítico de 10^{18} portadores, se inician los penachos autopropagantes negativos hacia la Tierra y positivos en sentido contrario.

Aunque existen diferentes teorías que tratan de explicar el mecanismo de ionización del espacio entre nube y tierra, la mayoría de los autores concuerdan en que existe un penacho en la punta de la columna negativa, llamado líder, que es el encargado de iniciar el camino, dándole una característica escalonada al avance del líder. Aunque sólo se han mencionado los líderes descendentes negativos, también se presentan líderes escalonados ascendentes, de polaridad positiva o negativa, siendo los primeros los de mayor ocurrencia. El líder escalonado se caracteriza, según Uman, porque:

- La velocidad promedio mínima para líderes negativos descendentes es de aproximadamente 1×10^5 m/s.
- El intervalo de tiempo entre cada paso es relativamente constante, y tiempos de pausa más prolongados producen pasos de mayor longitud.
- La longitud de los pasos para líderes está entre 10 y 200 metros con un valor promedio de 50 metros. Esta longitud varía de acuerdo con el grado de evolución del líder escalonado.
- El tiempo de pausa entre pasos es del orden de 50 μ s. Durante este tiempo el canal del líder escalonado no es suficientemente luminoso para ser registrado mediante técnicas fotográficas como la cámara de Boys.
- El tiempo promedio de avance de un paso es de alrededor de 300 μ s, pero su luminosidad apenas dura 1 μ s o menos.
- Durante el descenso se produce un cambio de campo electrostático relativamente suave, lo que indica que el mecanismo de escalonamiento no baja, por sí mismo, una cantidad apreciable de carga.
- Cuando un líder escalonado típico se acerca a tierra tiene una carga de alrededor de 5 culombios distribuida en su longitud.

- Para líderes escalonados ascendentes las corrientes están entre 20 y cientos de amperios.
- Los líderes positivos son de naturaleza más continua que los cargados negativamente, los cuales son marcadamente escalonados.

Proceso de enlace

La diferencia de potencial eléctrico entre la base del líder cargado negativamente y la tierra, tiene una magnitud superior a 10^7 voltios. Cuando el líder está cerca de tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos (pararrayos, árboles, torres de transmisión, antenas, aristas de edificios, etc.) o en irregularidades propias de la misma tierra, supera el valor de tensión disruptiva del aire y se presentan una o más descargas (rayos) que ascienden desde estos objetos al encuentro del líder descendente. Se inicia así el llamado proceso de enlace.

La distancia disruptiva de un rayo es quizás el factor más importante por tener en cuenta en las discusiones sobre el efecto del apantallamiento de cables en líneas de transmisión o protección de estructuras contra rayos. El trabajo realizado por Horn y Sukarno define la distancia disruptiva (rsc) como la distancia media desde la punta del líder escalonado hasta el punto de impacto sobre cualquier objeto aterrizado. Esta distancia disruptiva, o también conocida como radio de acción, es la distancia a la cual el líder "siente" la influencia del objeto o de la tierra misma.

La distancia disruptiva determinada por Horn y Sukarno para 45 rayos producidos artificialmente mediante cohetes, estuvo comprendida entre 10 y 60 metros, y es una función de la corriente de descarga del rayo. Una vez que el líder escalonado "siente" la presencia del punto de impacto, se inicia en éste un penacho o descarga inducida ascendente³¹ que sale al encuentro del líder descendente, y el instante de contacto marca el inicio de la llamada descarga de retorno.

El concepto de la distancia disruptiva o radio de acción fue el que permitió desarrollar los métodos y modelos de sistemas de protección contra rayos

como el método electrogeométrico y el modelo de progresión del líder, los cuales se explican en más detalle en el capítulo 5 de este libro.

1.1.2.3 Descarga de retorno

La descarga de retorno fue definida por Loeb como una onda de campo eléctrico que asciende por el canal del líder escalonado, alcanzando, en la mayoría de los casos, a penetrar en la base de la nube. Esta onda ionizante "baja" de la nube de 2 a 10 culombios de carga eléctrica con corrientes de hasta 10^5 amperios y es la fase más energética del rayo.

Cuando a unas decenas de metros sobre la tierra, una de las descargas ascendentes de la tierra hace contacto con el líder escalonado que desciende, el líder queda al potencial de tierra, y se presenta lo que se conoce como la primera descarga de retorno, quedando el camino nube-tierra totalmente ionizado. La primera descarga de retorno produce una corriente pico cerca a tierra de un valor típico de más 30 kiloamperios, dependiendo de la latitud en donde impacte el rayo, con un tiempo de cero a pico de unos pocos microsegundos.

Las corrientes a tierra medidas caen a la mitad del valor pico en cerca de 50 u.s, y corrientes del orden de cientos de amperios pueden fluir por tiempos de unos cuantos hasta varios cientos de milisegundos.

Después de que la corriente de retorno ha dejado de fluir, el rayo, incluido el movimiento de carga en la nube, finaliza. El rayo es llamado entonces una descarga simple.

Una descarga inducida ascendente ocurre, entonces, cuando un rayo impacta cerca de una instalación. Se sabe que tales eventos causan lo que se conoce como el "fuego de San Telmo" en objetos puntiagudos, por ejemplo, los mástiles de los barcos o la punta del asta de las banderas. Estos fenómenos causan severos daños, sobre todo en estructuras altas como las torres de comunicación. La razón es que la combinación de su geometría y la altura de sus picos causan los penachos ascendentes, que pueden alcanzar la base de la nube, transportando, así, descargas subsecuentes de la nube hacia la torre.

La solución a este problema consiste en modificar la geometría "ofensiva" de la torre. Arreglos en forma de sombrilla o paraguas parecen ser casi la forma perfecta de solución. Otras formas de arreglo, por ejemplo, de tipo esférico, ayudan, pero no son tan efectivas como el de la sombrilla. El alivio o mejora no se logra debido a las púas o los puntos agudos, sino por la geometría misma. Como ejemplo, se puede tener el mismo efecto instalando el marco de las varillas de la sombrilla sin los puntos agudos o púas. En subestaciones de alta tensión se usa esta técnica de modificación de la geometría para suprimir el efecto corona; estos dispositivos se conocen como "anillos corona" o "apantallamiento corona".

En el caso de torres de comunicación, muchas descargas de rayo son del tipo descargas inducidas ascendentes.

1.1.2.4 Líder dardo

Después de que la descarga de retorno alcanza la base de la nube y se expande lateralmente, ésta alcanza el límite de la región de descarga de la nube, aumentando el campo eléctrico y produciendo así un nuevo drenaje de carga mediante penachos que penetran alrededor de 300 metros de nube, todavía cargada. Este período está caracterizado por una intensa descarga corona de las gotas de agua, debido a la propagación de la onda ionizante dentro de la nube.

Este corona drena la carga desde una gran área a una más pequeña dejada por el líder escalonado y su descarga de retorno, emergiendo de la base de la nube como un canal luminoso llamado líder dardo. La velocidad de estos líderes está entre 4×10^8 cm/s y 1.9×10^9 cm/s, dependiendo del tiempo que ha permanecido el canal dejado por la descarga de retorno.

Los líderes dardo usualmente se propagan en forma continua, sin escalonamientos, desde la nube hasta la tierra, siguiendo el canal preionizado. Sin embargo, cuando el intervalo de tiempo desde la descarga de retorno es excepcionalmente largo, el líder dardo presenta tortuosidades a medida que se aproxima a tierra

En esta etapa, el rayo puede drenar a tierra alrededor de $1/4$ de culombio, como se ha demostrado en investigaciones llevadas a cabo en Nuevo México y Sudáfrica, pero este valor varía de acuerdo con la estructura de la nube. Los líderes dardo, a su vez, pueden producir una descarga de retorno dando origen a los rayos de carácter múltiple. El líder dardo inicializa así la segunda y otras descargas subsecuentes, presentándose así más de una descarga por rayo (*stroke/flash*), definido como multiplicidad.

Durante el tiempo entre la finalización de la primera descarga de retorno y la inicialización del líder dardo ocurren procesos que se manifiestan en rápidas variaciones de campo eléctrico, conocidos como procesos *J* y *K*.

1.1.3 El trueno

"El trueno es la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente". (ref.6).

De él, se puede extraer información sobre la localización, tamaño y orientación del rayo.

Una teoría aceptada del trueno y sus principales rasgos, sólo existe desde hace unos 25 años.

El aire en el canal de la descarga se calienta y se expande en forma de una onda de choque.

Posteriormente, esta honda se vuelve energía acústica produciéndose el trueno. Cada componente del rayo: el líder escalonado, los líderes rápidos, las descargas de retorno, contribuyen al trueno. Los componentes más energéticos producen las frecuencias más bajas del sonido. Estas frecuencias bajas se atenúan menos que las altas, ya que la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia. por ello, un rayo no muy energético puede no oírse ya a diez kilómetros.

El estudio del trueno ha perfeccionado los conocimientos que ya se tenían sobre el rayo, y constituye un elemento fundamental para el estudio de las descargas entre las nubes y del canal de las descargas en el interior de una nube donde los medios visuales no pueden suministrar información.

Adicionalmente, nos aportan criterios para la interpretación de los datos de nivel isoceráunico.

El nivel isoceráunico, número de días del año de los que se escuchan truenos, es actualmente el índice universalmente utilizado como indicativo de la cantidad de actividad eléctrica atmosférica de una región.

De allí la importancia de entender las causas y características del trueno.

1.2 Características de las descargas eléctricas

Al golpear la descarga "de retorno" la línea de transmisión, produce corrientes altísimas que aumentan en unos pocos microsegundos. Se presentan corrientes pico entre 20 y 200 kA, aunque estas últimas son muy raras. La probabilidad de que se produzca una descarga mayor o igual a una determinada magnitud de corriente, se ha estimado por varios autores, y los estimativos más conocidos son:

La AIEE considera que rayos de 100 kA tienen una probabilidad de 1,8% de ser excedidos, mientras que los rayos de 40 kA tienen una probabilidad de 15%, y rayos de 4 kA tienen una probabilidad de 93% de ser excedidos, lo que muestra una relación casi lineal entre la corriente del rayo y su probabilidad de ser excedido.

Popolansky, quien es un autor bastante dedicado a la investigación de descargas atmosféricas, considera que rayos de 100 kA tienen una probabilidad de 4% de ser excedidos, mientras que los rayos de 40 kA tienen una probabilidad de 35%, y rayos de 4 kA tienen una probabilidad mayor de 95% de ser excedidos, lo que muestra una relación un poco más cuadrática entre la corriente del rayo y su probabilidad de ser excedido.

Anderson, también investigador del tema opina que esta relación es más pronunciada, de la siguiente manera: rayos de 100 kA tienen una probabilidad de 4% de ser excedidos, mientras que los rayos de 40 kA tienen una probabilidad de 60%, y rayos de 4 kA tienen una probabilidad mayor de 100% de ser excedidos.

Las curvas representativas de las probabilidades de descarga de cada uno de estos autores se muestra en la figura 4.

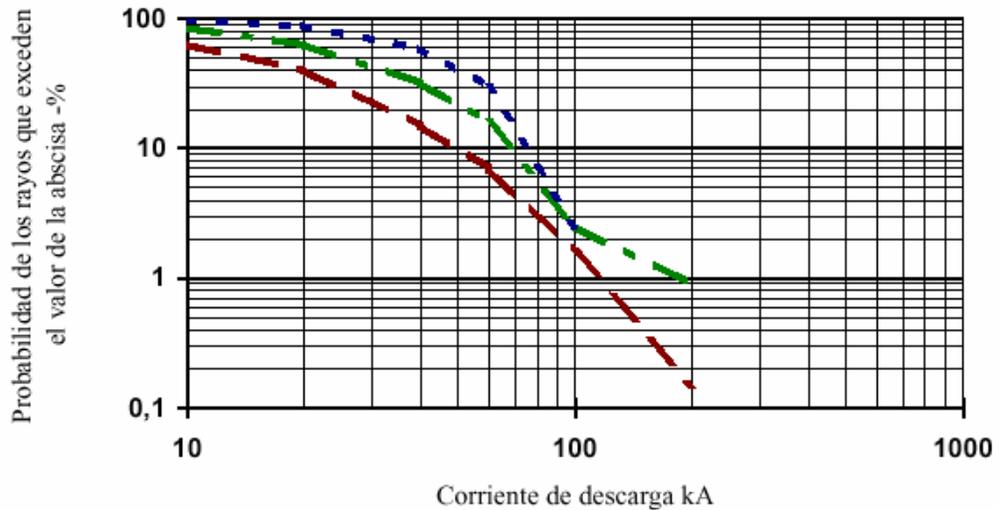


Figura 4. Curvas típicas de probabilidad de ocurrencia en función de la corriente de descarga de rayos.

- ❖ La gráfica de color azul pertenece a la probabilidad según Anderson.
- ❖ La gráfica de color verde pertenece a la probabilidad según Popolansky.
- ❖ La gráfica de color rojo pertenece a la probabilidad según la AIEE.

Aproximadamente el 90% de las descargas llevan carga negativa al sistema.

El CIGRE sugiere para los estudios de líneas de transmisión la siguiente función de probabilidad acumulada con valor medio de 31 kA para las descargas de polaridad negativa:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}}$$

Para el comportamiento del sistema ante la descarga, es importante la tasa de aumento de la corriente proveniente del rayo. Se suele suponer en los cálculos, que la corriente aumenta linealmente desde cero hasta el valor pico en forma

de rampa, con un determinado tiempo de duración (tiempo de frente, o a cresta), que se estabiliza un instante en el valor pico y luego decrece más lentamente hasta volver a cero, los valores normalizados son 1,2 microsegundos para el tiempo de cresta y 50 microsegundos para el tiempo de cola en una onda tipo rayo o de impulso.

La probabilidad de un determinado tiempo de frente de descarga se observa en la figura 5



Figura 5 Distribución de tiempo a cresta en las descargas eléctricas.

- ❖ La línea de color azul representa el tiempo de cresta.
- ❖ La línea de color verde representa el tiempo de cola.

Las características de corriente son diferentes cuando el objeto golpeado sobresale excesivamente del suelo. Así las mediciones hechas en el edificio Empire State de Nueva York revelan valores de corriente diferentes a los mencionados, y aún mecanismos diferentes de la descarga. En estos casos el líder no sale de la nube sino del objeto alto.

Para valores de la corriente también se observa dependencia con respecto a la impedancia característica, tanto del sistema golpeado como del canal de la descarga.

1.3 Medición de las descargas atmosféricas.

Son incontables los medios que se han utilizado para medir las corrientes y voltajes de los rayos, desde los usados entre 1910 y 1930 como el Klidonógrafo, el oscilógrafo, la cámara de Boys, los medidores de corriente de cresta (magnetic links), hasta los sofisticados equipos utilizados en el proyecto Francé del Massif Central de producción y medición de rayos "artificiales".

Allí se emplean magnetic links, registradores de campo eléctrico y magnético cada uno con varios osciloscopios y equipo fotográfico integrado; goniómetro para localizar relámpagos; contadores CIGRE de relámpagos; medidores del campo de la tierra (field mills y radioactive probe electrometer) y equipo fotográfico y acústico.

1.4 Nivel Isoceráunico

El nivel ceráunico está definido como el número de días del año en los cuales se escucha, por lo menos, un trueno en el lugar de observación.

Los niveles isoceráunicos se suelen llevar a mapas isoceráunicos, es decir, a mapas con curvas de igual nivel ceráunico. Hoy en día ISA y las empresas públicas de Medellín tienen implementadas sus redes de antenas para medir el nivel ceráunico, estas redes ya cubren la mayor parte del país.

La comparación del mapa isoceráunico de Colombia con el de Europa y aún el de E.U. muestra la magnitud que este problema tiene para nosotros.

El número de descargas atmosféricas que inciden en la zona de influencia de una línea de transmisión, es fundamental en la determinación de nivel de aislamiento, es decir, las distancias mínimas entre conductores y entre conductor y estructura, requeridas para el buen comportamiento de la línea.

Después de algunos años de estudio, en Colombia se dispone de mapas de niveles ceráunicos para las diferentes zonas geográficas; La Universidad Nacional de Colombia tiene un programa de investigación sobre este tema, sobre el cual se puede consultar en la página web www.paas.unal.edu.co.

Para la evaluación del comportamiento de las líneas de transmisión ante las descargas atmosféricas, se ha compensado la ausencia de información estadística significativa sobre la actividad cerámica, adoptando para nuestro entorno una serie de características y formulaciones producto de otras realidades.

Consciente de la importancia de estudiar en detalle las características de las descargas atmosféricas, ISA ha liderado la instalación de una red colombiana para localización y medición de descargas eléctricas atmosféricas-RECMA, que permitirá caracterizar en forma estadística y probabilística los principales parámetros de los rayos, en una concepción espacio-temporal. El sistema permite la evaluación del nivel cerámico, la densidad de rayos a tierra, polaridad, multiplicidad y amplitud de corriente de los rayos, en el territorio colombiano.

Para la obtención de datos estadísticos y probabilísticos confiables de los parámetros de los rayos, se requiere de mediciones durante un período estimado de quince (15) años. La RECMA suministra también información en tiempo real, lo cual permite correlacionar el comportamiento en el tiempo y en el espacio, de las líneas de transmisión y subestaciones que conforman el Sistema Interconectado Nacional, ante las descargas atmosféricas, lo cual provee herramientas adicionales para la toma de decisiones operativas y de mantenimiento del sistema.

1.4.1 Curvas de probabilidad de nivel cerámico y densidad de descargas a tierra para Colombia

1.4.1.1 Variación espacial del nivel cerámico

El NC fue evaluado en áreas de 30 x 30 km², encontrándose zonas con valores entre 11 y 289 días tormentosos-año. La figura 6 muestra la variación de estos valores en la geografía colombiana para el año 1999.



Figura B1. Mapa de NC para Colombia, 1999.

Figura 6

1.4.1.2 Evaluación global, regional y local de DDT en Colombia

La evaluación global de DDT para toda la geografía colombiana se hizo para áreas de $300 \times 300 \text{ km}^2$, para un total de $1393 \times 900 \text{ km}^2$; sus resultados se muestran en la tabla 1 y en la figura 7. Se presentan variaciones en valores desde 0.0012 hasta 11.4, con un valor de media aritmética de 3 [strokes/ km^2 -año].

Tabla 1. Actividad de rayos en la geografía colombiana entre 1997-1999. Área = $1393 \times 900 \text{ km}^2$.

Año	Total strokes	DDT media [strokes/ km^2 -año]
1997	2,875,660	2.29
1998	2,828,774	2.25
1999	1,987,061	1.58
2000	1,147,459	0.91
2001	1,888,503	1.5

Respecto a la evaluación global y considerando los resultados de evaluaciones de diferentes sitios del mundo, es posible afirmar que la DDT es menos prevalente en el trópico que en el *subtrópico*¹. Sin embargo, cuando se evalúa regionalmente, en áreas de 30 x 30 km², se encuentran en la geografía colombiana, zona tropical, valores de DDT de 35 [strokes/km²-año] como se muestra en la figura 8. Si se hace una evaluación local, tomando áreas menores de 3 x 3 km², se presentan, entonces, sitios con la mayor actividad de rayos del mundo, como por ejemplo en El Bagre (Antioquia) con un valor de 59 *strokes*/km²-año (1997). Para este último caso la multiplicidad *m* fue de 1 *stroke/flash*.

Figura 7: mapa DDT Colombia 1999 áreas 300*300 Km²

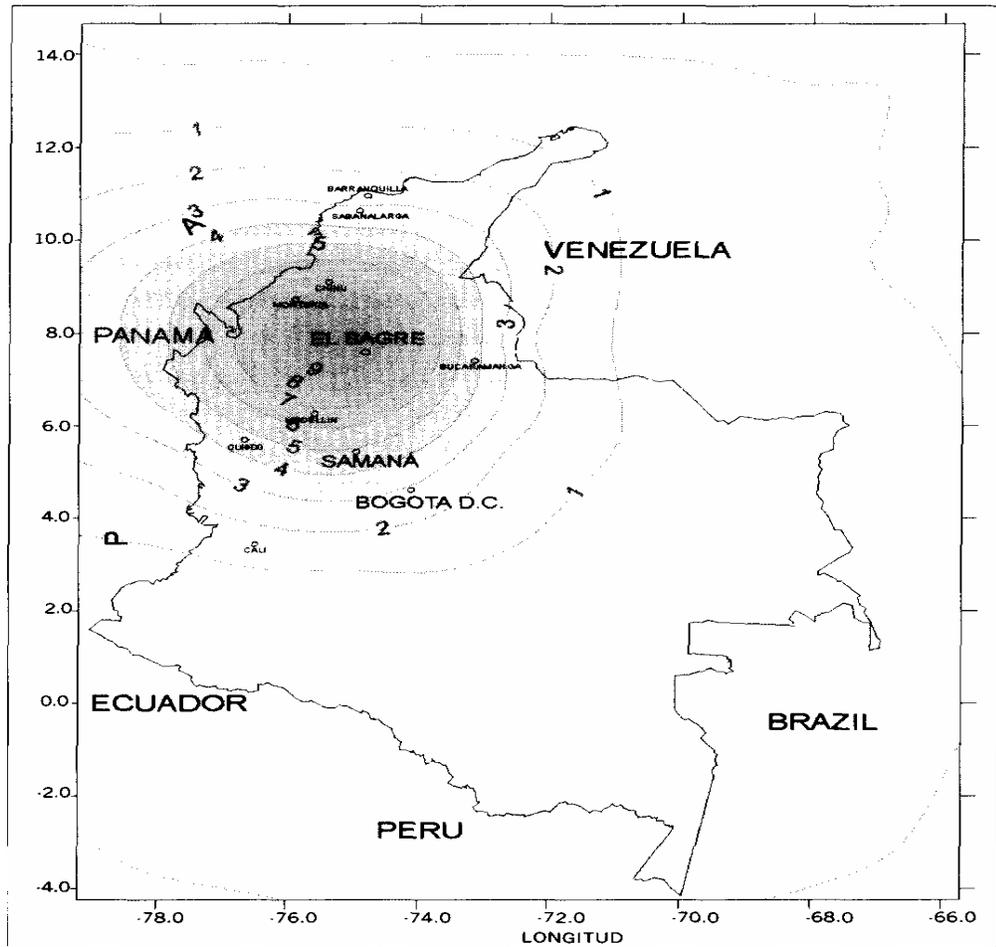


Figura 7

1.4.1.3 Relación entre NC y DDT para Colombia, zona tropical

Con base en los datos de la Recma, durante los años 1996 - 2000, se evaluó el comportamiento de la DDT como una función dependiente de la Latitud (Lat) y el NC. En términos generales:

$$DDT = f(NC, Lat)$$

Para encontrar una ecuación que cumpla con las variables dependientes escogidas, se implementó un programa de computador que tiene en cuenta una regresión múltiple no lineal y se escogió una función, para propósitos de aplicación a ingeniería, de la forma:

$$DDT = K \cdot Lat^{\alpha} \cdot NC^{\beta}$$

donde k , α y β son constantes calculadas de los datos de la Recma, usando técnicas de mínimos cuadrados.

Con base en la observación del comportamiento de la DDT en el territorio colombiano, el país se dividió en dos zonas. De esta forma se obtuvieron dos ecuaciones: una que aplica a la región montañosa (1) y otra para regiones costeras (2). Las ecuaciones propuestas son:

$$DDT = 5.4 \cdot 10^{-7} \cdot LAT^{1.6} \cdot NC^{2.5} \quad (1)$$

$$DDT = 176 \cdot LAT^{-3.8} \cdot NC \quad (2)$$

Figura 8: DDT Colombia 1.999 areas 30x30 Km²

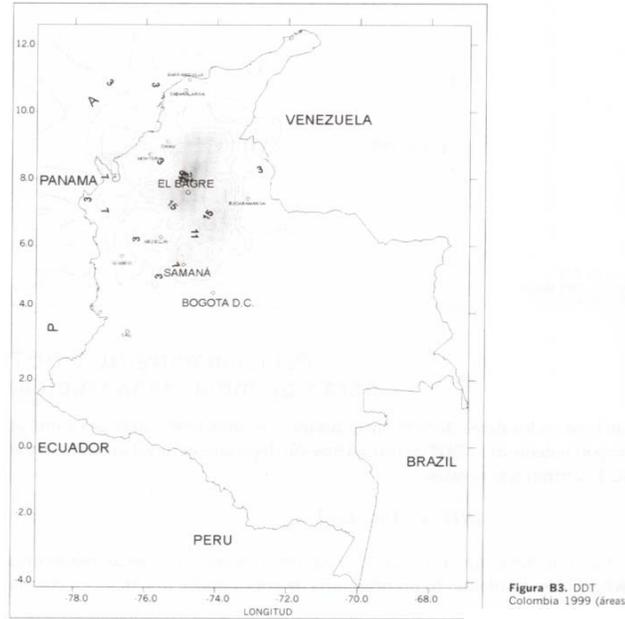


Figura 8

1.4.1.4 Evaluación de la relación

Con las fórmulas obtenidas por medio de regresión y las fórmulas bien conocidas de Cigre/IEEE/IEC y Eriksson, se evaluó la DDT para 5 áreas montañosas y 3 costeras localizadas entre 4 y 11 grados de Latitud Norte de Colombia. La tabla 2 presenta los resultados. La evaluación de DDT usando las formulas de Cigre/IEEE/IEC Y Eriksson fue realizada tomando una multiplicidad de 1 *stroke/flash* y usando la ecuación:

$DDT = GFR \cdot m$. Esto significa que $DDT = GFD^2$. El valor de multiplicidad $m = 1$ fue obtenido por medio de un trabajo previo hecho con los datos de la Recma.

De acuerdo con Darveniza³, "la fórmula de Eriksson da el mejor estimado de la GFD a partir de los datos de NC; si se requiere un límite superior para propósitos de diseño conservativo se puede usar la fórmula de Cigre/IEEE/IEC". Esta afirmación es cierta para zonas templadas, debido a que ambas ecuaciones fueron obtenidas como resultado de muchas investigaciones y mediciones en latitudes por encima de los 23° Norte o Sur, pero no se cumple para latitudes tropicales. La tabla 2 presenta los resultados

de la evaluación de la DDT usando las fórmulas de Eriksson y Cigre/IEEE/IEC, comparados con las fórmulas obtenidas por medio de los datos de la Recma, localizada en zona tropical. Los errores relativos aplicando las fórmulas de Eriksson o Cigre/IEEE/IEC varían entre un 31% hasta 1964%, mientras que los errores relativos aplicando las fórmulas (1) y (2) varían entre 5% y 49%.

Por tanto, en diseño de sistemas de protección contra rayos se recomienda para la geografía colombiana las fórmulas (1) y (2) presentadas en este anexo. Estas podrían ser aplicadas en otras latitudes de la zona tropical con resultados más cercanos a la realidad que los obtenidos con las fórmulas de Eriksson o Cigre/IEEE/IEC, pero ello debe ser evaluado en otras regiones tropicales.

1.4.1.5 Curvas de probabilidad acumulada de NC y DDT

Con base en la hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo, se trabajaron los datos de nivel ceráuneo (NC) y densidad de descargas a tierra (DDT) multianuales con los datos de la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas, Recma, mediante curvas de distribución de probabilidad acumulada, que sirven para hacer inferencias más objetivas en el caso de comparaciones cualitativas o cuantitativas a nivel global, regional o local. Las curvas de 30 sitios que cubren la geografía colombiana se presentan a continuación. Estas curvas tienen aplicación en el diseño probabilístico de sistemas de protección contra rayos.

A continuación se presenta la tabla 2 que evalúa la DDT para 8 sitios de la geografía colombiana por medio de las 3 fórmulas presentadas.

La tabla B3 presenta los datos de NC que se trabajaron entre 1974 y 1990 con 34 estaciones sinópticas colombianas y que dieron como base el mapa colombiano de niveles ceráuneos que utiliza la ingeniería colombiana para diseño de protección contra rayos.

Las 34 estaciones sinópticas de propiedad del antiguo Himat, utilizadas para estimar el parámetro NC, están ordenadas alfabéticamente con su ubicación en

latitud, longitud, altitud, promedios aritméticos mensuales de días tormentosos y promedio aritmético multianual de NC.

Tabla 2. DDT evaluada para ocho sitios de la geografía colombiana por medio de tres fórmulas.

Región	Sitio	LAT [°]	LONG [°]	NC	DDT [Km ² year ¹]				%		
					EQ1	EQ2	EQ3	REAL	ε ₁	ε ₂	ε ₃
Montañosa	Bogotá	4.53	74.2	128	1.12	17.2	12.6	1	11	1620	1160
	Bagre	7.5	74.7	282	18.1	46.2	35.2	27	49	71	31
	Samaná	5.26	74.5	251	7.68	40.0	30.3	6	22	567	405
	Medellin	6.07	75.26	263	10.8	42.3	32.1	10.3	5	311	212
	Cali	3.33	76.23	194	1.94	28.9	21.6	1.4	28	1964	1443
Costera	Santa Marta	11.08	74.14	158	2.98	22.4	16.6	2.3	23	874	622
	Barranquilla	10.53	74.47	196	4.49	29.3	21.9	4.7	5	523	366
	Cartagena	10.27	75.31	172	4.34	24.9	18.5	3.5	19	611	428

LAT: Latitud en grados; LONG: Longitud en grados; NC: Nivel ceráuneo

DDT: Densidad de descargas a tierra en [km².año⁻¹]

$$EQ1: DDT = [5.4 \cdot LAT^{1.6} \cdot TD^{2.5}] \cdot 10^{-7}$$

Densidad de descargas a tierra para regiones montañosas.

$$DDT = [176 \cdot LAT^{-3.8} \cdot TD]$$

Densidad de descargas a tierra para regiones costeras.

$$EQ2: DDT = 0.04 \cdot TD^{1.25} \text{ Cigre/IEEE/IEC, fórmula para } m = 1$$

$$EQ3: DDT = 0.023 \cdot TD^{1.25} \text{ Eriksson fórmula para } m = 1$$

REAL: DDT valor obtenido con la Recma para Colombia en áreas de 30 x 30 km², año 1999.

ε : Error relativo para cada DDT estimado respecto al valor real:

$$\epsilon = \frac{\text{Calculado} - \text{Real}}{\text{Real}}$$

1.5 Número de descargas a una línea

El número de descarga a una línea para un nivel isoceráunico dado, no es conocido actualmente con mucha certeza. El problema es de naturaleza estadística, por lo tanto los métodos aquí expuestos, en los cuales este número se encuentra determinísticamente, dan sólo una aproximación al valor medio de la distribución.

Se parte de considerar una densidad de descargas (número de descargas/km²) uniforme para una región con nivel isoceráunico constante. A partir de esta densidad, se determina el número de esas descargas interceptado por la línea.

1.5.1 Densidad de las descargas

El número de descargas por km cuadrado por año (N) ha sido estimado como proporcional al nivel isoceráunico.

$$N=K.(NI)$$

N: Número de descargas por km² por año

NI: Nivel isoceráunico

K: Constante determinada con base en investigaciones de campo.

Con el presente estado de los conocimientos, cualquier valor entre 0.1 y 0.2 se puede usar con el mismo grado de confianza según Investigaciones. Se han reportado varias investigaciones en las cuales este valor es alrededor de 0.16.

Sin embargo, hay muchos autores que sostienen que N, incluso, debe ser proporcional a NI al cuadrado y no simplemente a NI.

1.5.2 Sombra Eléctrica

Se considera que la zona de influencia de una línea, llamada su sombra eléctrica (figura 9) o ancho de banda de atracción, depende de la altura del

punto más alto de la línea sobre el terreno, que es el cable de guarda y de la distancia horizontal entre cables de guarda, si existe más de uno.

$$A = 4h + b$$

A: Ancho de la sombra eléctrica

b: Distancia horizontal entre cables de guarda.

h: Altura efectiva sobre el terreno del cable de guarda.

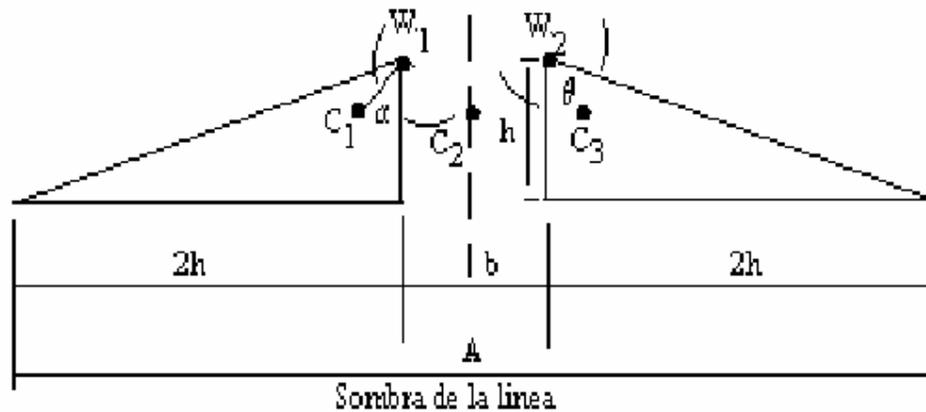


Figura 9

La altura efectiva tiene en cuenta que la altura del cable varía desde h_g en la torre, hasta h_{gw} en la mitad del vano. Si el vano es plano:

$$h = h_g - \frac{2}{3} (h_g - h_{gw})$$

Se debe tener en cuenta que no está cuantificada la influencia del paso de la línea por un terreno boscoso, el cual disminuye su altura efectiva, ni tampoco el que la línea pueda estar en el borde de una montaña muy alta, lo que aumenta la posibilidad de la intercepción de los rayos.

1.5.3 Número de descargas directas a la línea

Es el producto de la densidad de descargas a la zona por el área de influencia de ésta. Si queremos determinar el número de descargas a la línea por 100 km. de longitud, NI será entonces:

$$NI: N(A/1000)100$$

NI: Número de descargas sobre la línea por 100km. por año.

N: Descarga por km²-año

A: Sombra eléctrica en metros

1.5.4 Distribución en torres y vanos

Si se ha hecho un buen cálculo del ángulo de apantallamiento del cable de guarda, de las descargas que alcanza la línea, prácticamente ninguna golpeará el conductor, sino a la torre o al cable de guarda.

Las que golpean el cable de guarda en la mitad del vano, por lo general, no causan flameo por varias razones. El mecanismo de flameo entre conductores cilíndricos paralelos producen altísimas corrientes de predescarga, que rebajan el voltaje entre cable y fase, demorando un posible flameo; además, las reflexiones que llegan de las torres adyacentes, disminuyen aún más el voltaje; las distancias entre cable y fase son mucho mayores en el vano que en la torre. Es importante, entonces, saber qué porcentaje de las descargas totales golpean el cable de guarda lejos de la torre y cuántas descargas caen sobre la torre o cable, en cercanías de ésta.

J.G. Anderson, presentan para torres de acero con vanos de 300m. un porcentaje de 60% de descargas a torres (o cerca). Para apoyos en madera el porcentaje es de un 25%.

Si el vano es mayor habrá menos torres, y por lo tanto menos descargas a torre por km. La ecuación que propone Anderson para el factor de reducción del número de descargas es:

$$FR = e^{-0.51} (S/ S_0)$$

F R : Sería la fracción de descargas sobre el vano que cae directamente a la torre.

S : Vano usado en la línea

S o : Vano base, en este caso 300m.

1.6 Salidas de la línea

Las salidas de las líneas se deben a muy diferentes razones. ISA, enumera siete diferentes causas en sus informes de operación anuales para las principales líneas a 220 kV.

Se Puede detectar que la causa principal de salida son las descargas atmosféricas, es decir, los sobrevoltajes producidos por estas descargas.

Entre las salidas producidas por descargas atmosféricas se deben distinguir dos tipos: las salidas debidas a la falla del apantallamiento y las debidas a flameo inverso.

1.6.1 Salidas por falla de apantallamiento

Estas salidas se deben a la caída de un rayo directamente sobre el conductor de fase por falla del cable de guarda, encargado del apantallamiento de la línea.

Un rayo de 30 kA (que es muy probable, según la literatura) produce en una línea con impedancia característica de 400 ohmios, ondas de voltaje a lado y lado del punto de impacto de 6.000 kV, que exceden por un amplio margen el BIL de una línea de 220 kV. (aproximadamente de 1.050 kV). Por esta razón la probabilidad de que haya flameo entre el conductor y la cruceta o entre dos fases adyacentes, y se presenta una posterior salida de la línea, es muy cercana al 100% si falla el apantallamiento.

Sin embargo, las fallas de apantallamiento en las líneas colombianas parecen ser bastante escasas debido a los pequeños ángulos de protección que se utilizan.

1.6.2 Salidas por flameo inverso

Cuando la descarga cae sobre el cable de guarda, viaja hasta la torre más cercana (a cada lado del punto de impacto) donde busca su camino a tierra. Parte de la onda de choque se reflejará por el cable de guarda hacia atrás, parte se refractará por el cable hacia adelante y la mayor parte, baja por la torre hacia tierra.

Debido a la impedancia de la torre y a la resistencia de puesta a tierra, se forman a todo lo largo de aquella voltajes de un valor bastante alto.

Cuando el voltaje en la cruceta es muy alto con respecto al del conductor, tenemos un flameo cuyo punto de mayor voltaje es la cruceta, llamado flameo inverso (backflash). Este flameo puede ocasionar, dependiendo del sistema de protecciones, una salida de la línea

1.7 Número total de salidas de la línea por descargas atmosféricas

Sumando las salidas por falla del apantallamiento con las debidas al flameo inverso, se obtiene el número total de salidas debidas a las descargas atmosféricas.

Este número debe ser menor o igual a un determinado valor de diseño, que deben determinar las compañías dueñas de la línea, de acuerdo con la mayor o menor repercusión que pueda tener una salida de la línea sobre el resto del sistema y sobre la carga que está alimentando.

2. APANTALLAMIENTO

El apantallamiento consiste básicamente en la determinación de la ubicación del un cable de guarda en la estructura.

Las características mecánicas del cable de guarda se deben considerar de tal forma, que resista las sollicitaciones mecánicas y no vaya a tener una flecha excesiva. Las características eléctricas, deben garantizar bajas pérdidas por inducción y bajos voltajes de paso y de contacto.

La ubicación del cable de guarda debe ser tal, que sea escasa la probabilidad de que caiga un rayo con una corriente suficiente para producir un flameo.

Básicamente, se pueden dividir las metodologías de diseño de la ubicación del cable de guarda en dos grandes grupos: las que encuentran una posición "efectiva" del cable de guarda, tal que permita un "buen" apantallamiento; y las que asignan a una posición determinada del cable de guarda, una cierta probabilidad de falla del apantallamiento.

2.1 Apantallamiento efectivo

Existen metodologías más o menos sencillas para la ubicación de la posición efectiva. La más sencilla de todas, es mediante una gráfica como la de la figura 10, en la cual se encuentra la combinación de altura del cable con el ángulo de apantallamiento, los cuales producen un buen funcionamiento de líneas de Extra Alto Voltaje (EHV).

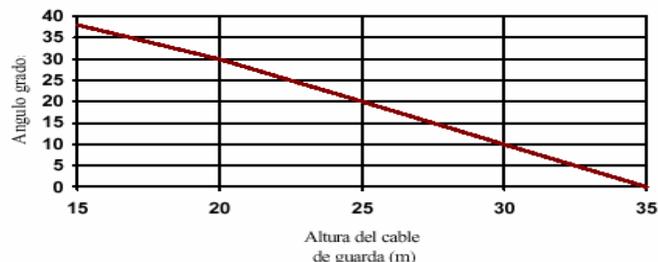


Figura 10 guía para el diseño del cable

una forma más elaborada, es mediante el modelo electrogeométrico. En la figura 11 se muestra la posición del cable de guarda, (C) del conductor (F) y del terreno.

En el punto **P** se interceptan las áreas de atracción de estos tres elementos, de tal forma, que los rayos que caen a la izquierda de **P** son interceptados por el cable de guarda y los que caen a la derecha de **P** son atraídos a tierra.

El área de influencia del conductor y el cable de guarda, se extiende hasta una distancia **S** que se llama distancia de impacto, esta determina un cilindro de atracción alrededor de cada conductor. Para una altura de conductor determinada hg se encuentra el ángulo de apantallamiento θ_s y la distancia horizontal **X**, conductor y cable, según las siguientes fórmulas, obtenidas de la figura No 8:

$$\theta_s = \text{Tan}^{-1}(X / hg - hf)$$

$$X = \left[(1 - (BS - hg / S)^2)^{1/2} - (1 - (BS - hf / S)^2)^{1/2} \right]$$

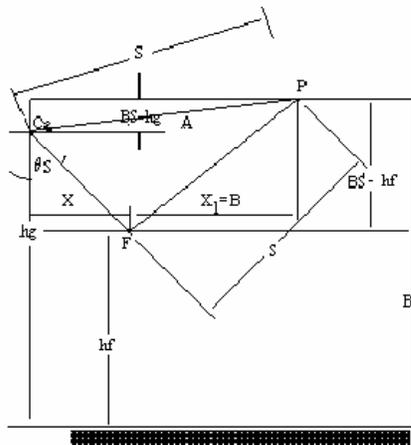


Figura 8 Posición efectiva del cable de Guarda

La anterior expresión de **X**, se deduce de la figura así:

$$A = \sqrt{S^2 - (BS - hg)^2}$$

$$B = \sqrt{S^2 - (BS - hf)^2}$$

$$A - B = X = \sqrt{S^2 - (BS - hg)^2} - \sqrt{S^2 - (BS - hf)^2}$$

Cada punto de la superficie de la tierra presenta a su vez semicilindros de impacto y su efecto total será un semiplano paralelo a la superficie de la tierra a una altura BS , B depende del tipo de terreno, rocoso, ríos, bosques, etc.

2.1.1 Distancia de impacto

Si el líder escalonado se acerca hasta una distancia S del conductor o del cable de guarda, podrá vencer la rigidez dieléctrica del aire y golpear sobre el elemento en mención. Por eso, de lo que se trata, es de que el rayo se acerque primero al cable de guarda o a tierra, antes que al conductor. Esa distancia de impacto es mayor mientras la carga que ha descendido hasta la punta del líder sea mayor.

Esta carga es la que produce una mayor o menor corriente en el rayo, por lo tanto S , depende de la corriente I del rayo. Existen varias fórmulas empíricas basadas en diferentes mediciones. La ref. 8 presenta la siguiente expresión:

$$S = 9.4 I^{2/3}$$

S : Distancia de impacto en metros

I : Corriente del rayo en KA.

El conductor debe ser protegido de corrientes mayores o iguales a I_c . Siendo I_c la corriente de descarga que al caer sobre el conductor produciría un voltaje igual al **BIL** de la cadena de aisladores. De tal forma que para el apantallamiento efectivo de la distancia de impacto **S** se calcula con base en la corriente crítica I_c :

$$I_c = 2BIL/Z_o$$

BIL : Nivel básico de aislamiento de la cadena de aisladores, Kv.

Z_o : Impedancia característica en ohmios

La impedancia de un conductor con retorno por tierra de resistencia cero, despreciando resistencia y conductancia será:

$$Z_o = 60 \ln(2h/r)$$

h : Altura de conductor en m

r : Radio del conductor en m

2.1.2 Probabilidades de falla de apantallamiento

Existen varios métodos cuyos resultados de una determinada posición del cable de guarda, define una probabilidad de falla del apantallamiento.

El más directo de estos métodos es el que se basa en la ecuación de Burgsdorf-kostenko.

$$\text{Log}P_{\theta} = \theta_s \frac{h^{1/2}}{90} - 2$$

θ_s : Angulo de apantallamiento, grados

P_{θ} : Probabilidades de falla del apantallamiento (%)

h: Altura del cable de guarda, m.

Para encontrar el número de fallas por apantallamiento, se multiplica P_{θ} /100 por el número de descargas directas a la línea, por 100km de longitud y por año (NL).

De acuerdo con experiencias de campo en Rusia aplicables a torres entre 25 y 30 m. de altura teniendo en cuenta la altura promedio (h) del cable de guarda, tenemos otra expresión equivalente para N L :

$$N_L = 2,7h \times \frac{NI}{30} \left(\frac{\text{descargas}}{100 \text{ Km} - \text{año}} \right)$$

Es apropiado, entonces, acoplar P_{θ} y N L . Solamente una porción de fallas por apantallamiento producirá flameos. La magnitud de corriente crítica de descargas que produce flameo es:

$$I_c = 2V/Z_0$$

Donde:

V: Voltaje de flameo crítico del aislamiento de la torre.

Z_0 : Impedancia característica del conductor de fase.

Burgsdorf, también proporciona una fórmula empírica para la probabilidad (P_{θ} %) en que una descarga excederá un valor (I,kA):

$$\log P_1 = 2 - \frac{I}{60}$$

La rata de flameo por apantallamiento está dada por:

$$SFO = N_L P_I P_\theta 10^{-4} S$$

Métodos más refinados tienen en cuenta la probabilidad existente de que un rayo caiga haciendo un determinado ángulo con la vertical, la probabilidad de que caiga un rayo de una determinada magnitud, etc., este es el caso del método desarrollado por Whitehead y Brown.

A manera de ejemplo analicemos el caso de una línea de transmisión de 230 kV con 23 Km de longitud, un ángulo de apantallamiento de 16°59', altura promedio del cable de guarda en el vano 21,7m, y un nivel cerámico de 70 días de tormenta al año, tenemos:

La probabilidad de falla del apantallamiento es:

$$\log_{10} P_\theta = 16.98 \left(\sqrt{\frac{21.7}{90}} \right) - 2 \Rightarrow P_\theta = 0.075\%$$

El número de descargas a la línea es:

$$N_i = 2.7 \times 21.7 \times \frac{70}{30} = 136.71 \quad (\text{Descargas} / 100 \text{ Km} - \text{año})$$

Lo que da un numero de fallas de apantallamiento de:

$$N = \frac{0.075}{100} \times 136.71 \Rightarrow N = 0.102 \quad (\text{fallas} / 100 \text{ Km} - \text{año})$$

La corriente critica para la línea es:

$$I_c = 2 * 850 / 400 = 4.25 \text{ kA}$$

La probabilidad de que una descarga exceda el valor de la corriente crítica es:

$$\log_{10} P_1 = 2 - \frac{4.25}{60} = 1.92 \Rightarrow P_1 = 84.95\%$$

Y por lo tanto el número de flameos de la línea por fallas de apantallamiento es:

$$TFA = 136.71 \times 84.95 \times 0.075 \times 10^{-4} = 0.087 \text{ (flameos/100 Km - año)}$$

Para los 23 Km de la línea, se tienen una tasa de flameos por falla de apantallamiento de $TFA = 0.23 \times 0.087 = 0.0200$ flameos/año.

Si se cambia el ángulo de apantallamiento de la línea a 30° , tendremos:

La probabilidad de falla de apantallamiento es:

$$\log_{10} P_\theta = 30 \left(\sqrt{\frac{16.95}{90}} \right) - 2 \Rightarrow P_\theta = 0.235\%$$

El número de descargas a la línea es:

$$N_i = 2.7 \times 16.95 \times \frac{70}{30} = 106.78 \text{ (Descargas / 100 Km - año)}$$

Lo que da un número de fallas de apantallamiento de:

$$N = \frac{0.235}{100} \times 106.78 \Rightarrow N = 0.259 \text{ (fallas / 100 Km - año)}$$

La corriente crítica para la línea es:

$$I_c = 2 \times 850 / 400 = 4.25 \text{ kA}$$

La probabilidad de que una descarga exceda el valor de la corriente crítica es:

$$\log_{10} P_1 = 2 - \frac{4.25}{60} = 1.92 \Rightarrow P_1 = 84.95\%$$

Y por lo tanto el número de flameos de la línea por fallas de apantallamiento es:

$$\text{TFA} = 106.78 \times 84.95 \times 0.259 \times 10^{-4} = 0.2349 \text{ (flameos/100 Km - año)}$$

Para los 23 Km de la línea , se tienen una tasa de flameos por falla de apantallamiento de $\text{TFA} = 0.23 \times 0.2349 = 0.0529$ flameos/año.

Con cualquiera de los dos ángulos de apantallamiento utilizados la línea quedara bien protegida puesto que se están obteniendo resultados mucho menores a los permitidos de 1 flameo/100 Km-año.

3. FALLAS DEL AISLAMIENTO POR FLAMEO INVERSO

Para saber el número de salidas por flameo inverso, es necesario conocer el voltaje que se presenta entre la cruceta y el conductor, debido a la descarga que baja por la torre a tierra; además, es necesario determinar la probabilidad de que se produzcan corrientes de la magnitud de las que pueden producir flameo.

3.1 Cálculo de voltaje a través del aislamiento

Se han utilizado diferentes metodologías para conocer esos voltajes; estas técnicas básicamente pueden ser analógicas o digitales.

La técnica analógica más utilizada, es la de construir un modelo geométrico de la torre con cada uno de sus componentes. Se inyecta momentáneamente una gran corriente por medio de un cable colocado verticalmente sobre la torre, simulando el canal de descarga. Se producen en ese momento campos eléctricos y magnéticos similares a los presentes en la línea cuando cae un rayo.

Mediante la medición directa del voltaje entre la cruceta y el conductor y utilizando escalas apropiadas, se conoce el voltaje real que se presentaría en la línea. La escala es tal, que si por ejemplo, se reducen las dimensiones de la torre en 25 veces, la frecuencia debe aumentar en esas 25 veces. Eso significa que en el modelo se deben realizar medidas a muy altas frecuencias y en tiempos muy reducidos.

Otras técnicas analógicas usadas en el análisis transitorio de sistemas de potencia como el TNA, no son usadas en este caso ya que no simulan el comportamiento variable de los campos electromagnéticos en la complicada geometría de la torre.

Las técnicas digitales que se utilizan, son procedimientos que deducen analíticamente el valor del voltaje a partir del valor de la corriente, de su tiempo de frente de ondas y su forma. Parten de la teoría de campos

electromagnéticos o directamente de la teoría de circuitos, bien sea de parámetros concentrados o distribuidos.

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, se pueden desarrollar fórmulas para el voltaje con base en la corriente, utilizando los métodos de lazo de potencial o de cancelación de campo. En estos casos para simplificar la complejidad de la geometría, se suele reducir la línea a cilindros o conos equivalentes.

Se puede partir directamente de la teoría de circuitos, en cuyo caso, se debe considerar que cualquier fenómeno transitorio es una "mezcla de efectos de las ondas viajeras (en cables y líneas) y de oscilaciones en circuitos de parámetros concentrados (generador, transformador, tierras, etc.)".

Los problemas de ondas viajeras se pueden resolver mediante las técnicas de Bewley (lattice) o de

Bergeron (características), utilizando además técnicas adicionales para la consideración de los parámetros concentrados.

Se han intentado también, algunas simplificaciones en el tratamiento de estos fenómenos transitorios:

a. El método de la AIEE considera la torre en serie con su resistencia de puesta a tierra como un circuito RL serie. El valor de la referencia para la inductancia de la torre fue de 20uH. Considera además la variación de la impedancia de los contrapesos en el tiempo, debido a la impedancia característica del contrapeso de alrededor de 150 ohmios que evoluciona hasta su valor en DC. Este método fue revalidado a partir de experiencias con líneas de voltaje 220 kV y superiores.

b. El método utilizado por J.G. Anderson para líneas de más de 345 kV, desprecia prácticamente la inductancia y se concentra simplemente en el efecto de la resistencia de puesta en tierra. Esta aproximación es factible debido a que el voltaje producido por el cambio de campo magnético en la torre, es menor que el BIL de las líneas a esos niveles de voltaje.

El método aquí presentado es diferente de los anteriores; considera la torre como una impedancia característica y mediante el análisis de las reflexiones de la onda viajera, determina el voltaje a través del aislamiento.

3.2 Ondas viajeras

Cuando la frecuencia de una señal electromagnética que viaja por una línea es muy grande o, lo que es similar, cuando su duración es muy corta, se debe analizar en detalle la transmisión de la perturbación de los campos electromagnéticos a través del tiempo, mediante un análisis de la onda viajera. Se puede demostrar que el viaje de una perturbación de voltaje de valor V en una línea de inductancia por unidad de longitud L y capacidad unitaria C , produce una perturbación de la corriente I que está totalmente en fase con la de voltaje y cuya relación es una constante llamada la impedancia característica Z , tal que:

$$V=IZ$$

Siendo:

$Z=(LC)^{1/2}$ La fórmula para la impedancia característica de un conductor despreciando R y G .

Cuando una onda viajera pasa de un medio con impedancia característica Z_1 a otro de impedancia Z_2 , se producen ondas de voltaje y corriente reflejadas y refractadas.

Los coeficientes de reflexión B y refacción A tienen las siguientes expresiones:

$$B=(Z_2 -Z_1)/(Z_1 +Z_2)$$

$$A=2Z_2/(Z_1 +Z_2)$$

El coeficiente de reflexión del voltaje en la base de la torre sería B_{bt} :

$$B_{bt}=(R-Z_t)/(R+Z_t)$$

R : Resistencia de la puesta a tierra

Z_t : Impedancia característica de la torre

Como se puede ver en la ecuación, el coeficiente de reflexión puede ser positivo o negativo. Si es negativo, la onda reflejada va a restarse al voltaje que

está subiendo a medida que sube la corriente de la descarga hasta su valor máximo; por lo tanto una reflexión negativa reduce el riesgo del flameo inverso. Inversamente, el peligro de flameo aumenta considerablemente si Bb_t es positivo, es decir, si el valor de la puesta a tierra es superior al de la impedancia de la torre.

3.3 Impedancia característica de la torre

Este valor se determina por lo general, de modelos a escala de la torre. Debido a su complicada geometría el cálculo analítico es complejo.

Sin embargo, con base en medidas de este tipo y análisis teóricos, se han elaborado fórmulas que tienen buena coincidencia con los datos medidos. La fórmula más utilizada es la de Jordán:

$$Z_t = 60 \ln(h/r) + 90(r/h) - 60$$

Z_t : Impedancia característica de la torre en ohmios

h: Altura total de la torre en metros

r: Radio equivalente para diferentes tipos de torres utilizadas en Colombia.

La impedancia de las torres usadas en líneas de 230 kV da entre 50 y 250 ohmios, siendo mayor mientras más esbelta sea la torre.

3.4 Impedancia de la puesta a tierra

La puesta a tierra se comporta de modo variable con el tiempo, ya que en los primeros instantes es muy importante el valor de la impedancia característica de los contrapesos y las varillas de puesta a tierra.

Si los contrapesos son muy extensos, este tiempo es muy largo y aumenta la probabilidad de flameo, ya que la impedancia de los contrapesos tiene valores que oscilan alrededor de 150 ohmios.

Comúnmente se emplean diferentes puestas a tierra para las estructuras de las líneas de transmisión, seleccionadas según la resistividad del terreno con el fin de obtener una resistencia menor a 20 W, como criterio general, o menor, si los

estudios así lo muestran. Estas puestas a tierra se conforman con combinaciones de varillas (varilla de copperweld) con diámetro de 0,0254 m, de 1,8 m de longitud y con contrapesos de acero galvanizado de 0,0095 m de diámetro y máximo 30 m de longitud y enterrados 0,50 m.

La resistencia esperada se calcula con las fórmulas de Sundae,:

$$R_{\text{varilla}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) [\Omega]$$

$$R_{\text{contrapeso}} = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{4ad}} - 1 \right) [\Omega]$$

Donde:

r: resistividad del suelo, W×m

l: longitud del conductor, m

a: diámetro del conductor, m

d: profundidad de enterramiento, m

Con varillas de $a = 0,0254$ m y $l = 1,8$ m y con contrapesos de $a = 0,0095$ m y $l = 30$ m la resistencia equivalente, calculada como el paralelo de todos los conductores enterrados es:

Tabla 3. Puestas a tierra según resistividad del terreno

RANGO	PUESTA A TIERRA	RESISTENCIA
$0 \leq \rho \leq 300 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas sin contrapesos	$R = 0,1095\rho$
$300 < \rho \leq 1000 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y dos contrapesos	$R = 0,0216\rho$
$300 < \rho \leq 1000 \Omega \cdot m$	Una varilla dos contrapesos	$R = 0,0254\rho$
$300 < \rho \leq 1000 \Omega \cdot m$	Una varilla y cuatro contrapesos	$R = 0,0131\rho$
$1000 < \rho \leq 1600 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y cuatro contrapesos	$R = 0,0120 \rho$
$1600 < \rho \leq 2200 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y seis contrapesos	$R = 0,0083\rho$
$\rho > 2200 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y ocho contrapesos	$R = 0,0063\rho$

4. CÁLCULOS DE SALIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Una vez establecido el comportamiento de la torre a la descarga, se debe establecer la probabilidad de salida de la línea, debido a las descargas atmosféricas. Como ya se aclaró, si el diseño del cable de guarda es apropiado, prácticamente todas las salidas de la línea se deberán a flameo inverso.

Para una línea de torres y vanos iguales se debe establecer la probabilidad del impacto de un rayo de determinada magnitud, con un determinado tiempo de frente de onda que caiga en cierta parte del vano o en la torre.

Además, si se quiere evaluar el comportamiento de una línea real se debe considerar la particularidad de cada uno de sus vanos y torres.

4.1 Variables probabilísticas de una torre

Para determinar en una torre el número de salidas por flameo inverso, se parte del número de descargas a la torre (o de una curva de distribución de probabilidad de frecuencias); de la distribución de probabilidad de la magnitud de la corriente; de las distribuciones de frecuencia de los tiempos de frente de onda y de la localización de la descarga.

Adicionalmente, se pueden considerar las variaciones de la puesta a tierra, del voltaje de 60 ciclos, de las características dieléctricas del aislamiento y de otras condiciones variables.

Se han elaborado diferentes metodologías para con base en esos datos, establecer el número de salidas.

El método de Montecarlo, por ejemplo, ejecuta una simulación estadística mediante la generación de números aleatorios para las diferentes distribuciones de probabilidad. Se generan miles de casos, en cada uno de los cuales se determina el voltaje de flameo, inverso y se establece si hay o no flameo. Luego, establece el número de salidas sobre el total de eventos y por tanto la probabilidad de salida.

Otro método similar, el método estocástico de Sato, en vez de generar números aleatorios, divide cada distribución en intervalos y hace todas las combinaciones posibles entre estos intervalos. Para cada combinación de intervalos se establece la probabilidad de salida. Luego se suman todas las probabilidades de salida para obtener la probabilidad total.

4.2 Variaciones a lo largo de la línea

Es bastante aleccionador el tomar una línea real y analizar torre por torre sus particularidades.

Un análisis de ese tipo se realizó en un proyecto de grado en el cual se estudió una línea con todas sus particularidades. Para cada torre se estudió su comportamiento ante las descargas atmosféricas por medio de ondas viajeras. Se estableció que unas torres presentan comportamientos especialmente críticos. Por ejemplo, en dicha línea en un tramo determinado se presenta 1/14 de todas las salidas de la línea compuesta por 341 torres.

En sólo 18 torres de las 341 (5%) estaría el 41% de las salidas de la línea.

Este comportamiento se debe básicamente a los valores de resistencia de puesta a tierra que, por ejemplo, para la torre número 28 fue 50 ohmios.

Esto se combina con el hecho de estar la torre en la zona de mayor nivel isoceráunico (65). También influye la geometría de las torres, ya que a mayor altura de éstas atraen más rayos y además el tiempo que demora en llegar la reflexión puede ser considerable permitiendo un mayor pico de voltaje resultante.

Una torre alta y ancha presenta el peor comportamiento, debido a que adicionalmente, si es muy ancha su impedancia característica es menor, y por lo tanto la reflexión puede tener un valor absoluto muy pequeño o, lo que es peor, puede llegar a ser positiva.

Esta situación lleva a una concentración del problema de las descargas atmosféricas que pueden llegar a convertir unas pocas torres, en las potencialmente más peligrosas para la existencia del flameo inverso.

Esta consideración se puede complementar con datos sobre mayor actividad atmosférica que observada en determinados relieves del terreno; con el conocimiento de torres localizadas en los bordes de las montañas o sitios igualmente expuestos; con la existencia de resistencias de puesta a tierra altas; de tal forma que se puedan tomar las medidas correctivas del caso tales como la mejora de la resistencia o el sobreaislamiento.

5. EJEMPLO DEL DISEÑO DEL AISLAMIENTO ANTE DESCARGAS ATMOSFERICAS

5.1 Características de la línea

La línea en proceso de diseño tiene las siguientes características:

Nivel de tensión 115 kV

Número de circuitos 2

Longitud 7,37 km

5.2 Siluetas de las torres

Para el estudio se emplearon las distancias entre fases y entre fase y tierra de la torre de tipo suspensión propuestos en el diseño electromecánico de la línea.

La silueta de la torre se indican en la Figura12

5.3 Vanos, cotas y alturas

Utilizando los resultados de la ubicación de apoyos de la línea, se obtuvieron los siguientes valores:

Vano promedio 340,43

Cota promedio (m.s.n.m.) 56,64

Altura promedio del conductor inferior en medio del vano 8,00

Altura promedio del cuerpo de la torre 22,74

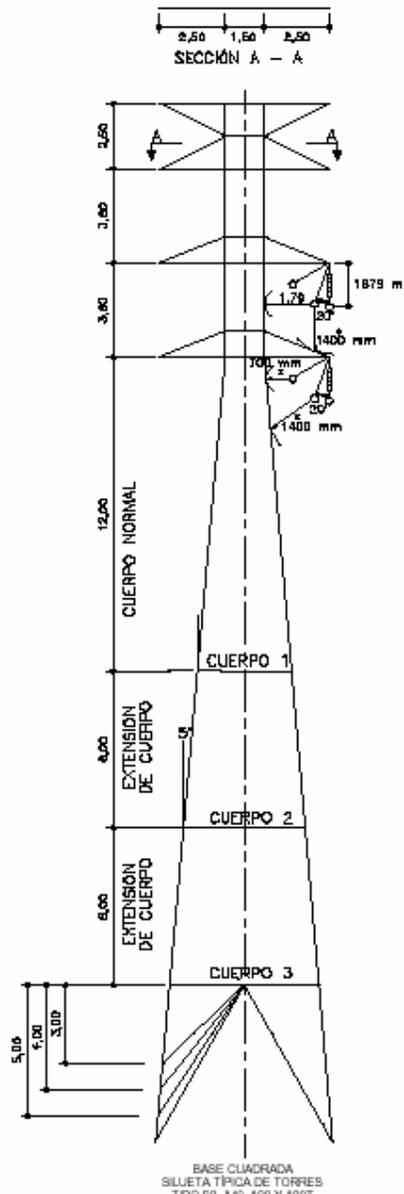


figura 12

5.4 Conductores

Las características físicas y eléctricas de los conductores seleccionados para la línea y usadas en el estudio de aislamiento, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de los conductores

CABLE	FASE	GUARDA
Conductor	Grosbeak	Alumoweld 7 No. 8
Tipo	AWG	OPGW 24 fibras
Calibre [KCM]	636	115,6
Capacidad de corriente [A]	775	---

CABLE	FASE	GUARDA
Diámetro acero [mm]	9,27	---
Diámetro total [mm]	25,15	9,779
Resistencia [Ω /km]	0,0879	1,4981
GMR [mm]	10,21	0,637

5.5 Condiciones del sitio

Para la zona de influencia de la línea se cuenta con la siguiente información ambiental:

Cota promedia 56,64 m.s.n.m.

Viento máximo 100 km/h

Viento máximo promedio 60 km/h

Temperatura mínima promedia 22 °C

Temperatura media 27 °C

Temperatura máxima promedia 32,3 °C

Nivel cerámico 150 días tormentosos/año

5.6 Resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra

En la Tabla 5 se presenta la resistencia medida en cada una de los sitios de las torres en toda la trayectoria de la línea. Se resaltan (en negrita) los valores de resistencia de las torres que necesitan de un tratamiento especial para su puesta a tierra, tal como se explicará más adelante.

Tabla 5. Resistividad y resistencias de puesta a tierra

Número	Resistencia medida (Ohm)		Resistividad calculada (Ohm-m)			Resistencia esperada con cuatro varillas [Ω]
	Sentido longitudinal de la línea	Sentido transversal de la línea	Sentido longitudinal de la línea	Sentido transversal de la línea	Promedio	
1	0.55	0.70	6.91	8.80	7.85	0.86
2	0.65	0.38	8.17	4.78	6.47	0.71
3	0.93	0.86	11.69	10.81	11.25	1.23
4	1.22	1.56	15.33	19.60	17.47	1.91
5	4.67	7.58	58.68	95.25	76.97	8.43
6	12.73	11.45	159.97	143.88	151.93	16.64
7	1.93	2.15	24.25	27.02	25.64	2.81
8	64.70	75.70	813.04	951.27	882.16	96.60
9	0.60	0.70	7.54	8.80	8.17	0.89
10	0.86	0.90	10.81	11.31	11.06	1.21
11	0.36	0.64	4.52	8.04	6.28	0.69
12	0.72	0.74	9.05	9.30	9.17	1.00
13	1.20	1.36	15.08	17.09	16.08	1.76
14	0.63	0.56	7.92	7.04	7.48	0.82
15	0.73	1.20	9.17	15.08	12.13	1.33
16	0.35	0.62	4.40	7.79	6.09	0.67
17	1.48	1.15	18.60	14.45	16.52	1.81
18	1.48	1.15	18.60	14.45	16.52	1.81
19	1.20	0.96	15.08	12.06	13.57	1.49
20	1.20	0.96	15.08	12.06	13.57	1.49
21	2.20	1.78	27.65	22.37	25.01	2.74
22	2.56	2.15	32.17	27.02	29.59	3.24
23	1.63	1.94	20.48	24.38	22.43	2.46

Tipo de apoyo: P: Poste T: Torre

Comúnmente se emplean diferentes puestas a tierra para las torres y postes, seleccionadas según la resistividad del terreno con el fin de obtener una resistencia menor a 20 Ω , como criterio general, o menor, si los estudios así lo muestran. Estas puestas a tierra se conforman con combinaciones de varillas (varilla de copper-clad) con diámetro de 0,0254 m, de 1,8 m de longitud y con contrapesos de acero galvanizado de 0,0095 m de diámetro y máximo 30 m de longitud y enterrados 0,50 m.

La resistencia esperada se calcula con las fórmulas de Sundae,:

$$R_{\text{varilla}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) [\Omega]$$

$$R_{\text{contrapeso}} = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{4ad}} - 1 \right) [\Omega]$$

Donde:

ρ : resistividad del suelo, $\Omega \cdot m$

l : longitud del conductor, m

a : diámetro del conductor, m

d : profundidad de enterramiento, m

Con varillas de $a = 0,0254$ m y $l = 1,8$ m y con contrapesos de $a = 0,0095$ m y $l = 30$ m la resistencia

equivalente, calculada como el paralelo de todos los conductores enterrados es:

Tabla 6. Puestas a tierra según resistividad del terreno

RANGO	PUESTA A TIERRA	RESISTENCIA
$0 \leq \rho \leq 300 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas sin contrapesos	$R = 0,1095\rho$
$300 < \rho \leq 1000 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y dos contrapesos	$R = 0,0216\rho$
$300 < \rho \leq 1000 \Omega \cdot m$	Una varilla dos contrapesos	$R = 0,0254\rho$
$300 < \rho \leq 1000 \Omega \cdot m$	Una varilla y cuatro contrapesos	$R = 0,0131\rho$
$1000 < \rho \leq 1600 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y cuatro contrapesos	$R = 0,0120 \rho$
$1600 < \rho \leq 2200 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y seis contrapesos	$R = 0,0083\rho$
$\rho > 2200 \Omega \cdot m$	Cuatro varillas y ocho contrapesos	$R = 0,0063\rho$

En la Tabla 6 se resumen las resistencias esperadas a lo largo de la trayectoria de la línea empleando los criterios antes mencionados y considerando puestas a tierra conformadas por cuatro varillas sin contrapesos.

Para las torres que conforman los apoyos 6 y 8, se recomienda implementar una puesta a tierra con las siguientes características con el fin de obtener resistencias menores o muy cercanas a 10Ω .

T6	Cuatro varillas y dos contrapesos	$R = 3,28 \Omega$
T8	Cuatro varillas y cuatro contrapesos	$R = 10,58 \Omega$

Se deben realizar medidas posteriores a la instalación de las varillas y contrapesos para asegurar el logro de los valores requeridos.

5.7 Diseño del aislamiento según sobretensiones atmosféricas

Con ayuda del programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) se realiza una modelación completa de la línea de transmisión partiendo de su geometría y de las características de los conductores. Esta modelación incluye todos los parámetros RLC de la línea y es adecuada para estudios de transitorios.

Cuando se obtiene el modelo se simula el efecto que tiene sobre los aislamientos de la línea, la aplicación de una descarga atmosférica sobre uno de sus conductores (cable de fase o cable de guarda) y se determinan las corrientes de rayo que superarían su soportabilidad dieléctrica.

Se hace también un análisis de sensibilidad a las principales variables que afectan el fenómeno tales como la puesta a tierra, el número de aisladores, etc. Con la información obtenida en el EMTP (corriente mínima de la descarga atmosférica que produce falla del aislamiento de la línea) se realiza una simulación Montecarlo en la que se generan aleatoriamente un gran número de descargas atmosféricas, y se calcula el índice de descargas que producen salida de la línea.

5.7.1 Modelo para la simulación digital emtp

Siguiendo las recomendaciones de la literatura, los conductores de la línea se representaron por el modelo K. C. Lee para líneas no transpuestas conformado por la impedancia característica y la velocidad de propagación de cada conductor y una matriz de acople entre los diferentes conductores.

Para encontrar estos parámetros se ejecuta la rutina LINE CONSTANTS del EMTP con los datos de los conductores y cables de guarda de la línea. Se

modelan los cables de guarda y una de las fases inferiores, pues sobre esta aparecen las mayores diferencias de tensión sobre los aisladores debido a que tienen un acople capacitivo menor con respecto al cable de guarda.

En el modelo se implementaron ocho vanos en total, cada uno con la longitud del vano promedio, como se ilustra en la Figura 13; una matriz resistiva con una impedancia característica (Z_c) igual a la de la línea, se conecta en los extremos del modelo para representar la continuidad de la línea y evitar reflexiones que perturben la simulación.

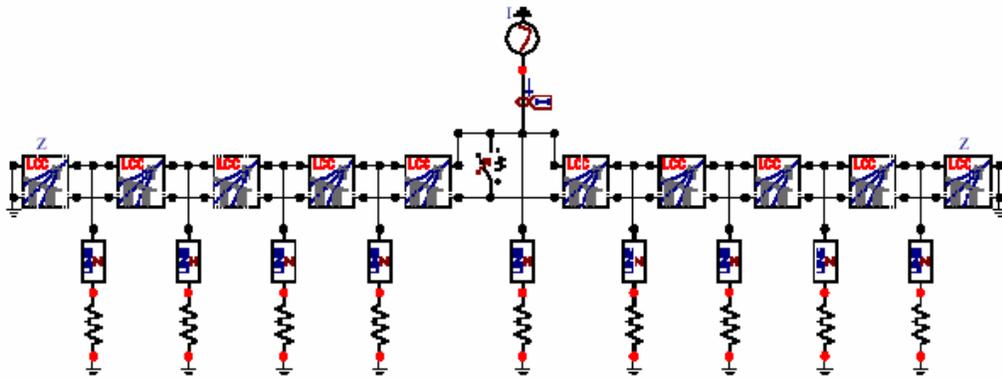


Figura 13. Modelo implementado en el EMTP

Las torres fueron representadas por una impedancia característica y una velocidad de propagación cercana a la de la luz. La impedancia característica fue calculada de acuerdo con la geometría típica de la torre y la siguiente fórmula:

$$Z_T = 30 \cdot \text{Ln} \left[2 \cdot \frac{(h^2 + r^2)}{r^2} \right] [\Omega]$$

Donde:

h : altura de la torre (23,0 m para torre y 22,0 m para poste)

r : radio en la base de la torre (2,8 m para torre y 1,0 m para poste)

Z_T : impedancia características de la torre (147.6 Ω para torre y 206,3 Ω para poste)

Para las simulaciones se trabaja con 210 Ω representando la impedancia característica máxima obtenida, lo que produce una mayor exigencia a los aislamientos de la línea.

Uno de los parámetros más significativos en las consecuencias del fenómeno de descargas atmosféricas es la resistencia de puesta a tierra. Esta se representa en el modelo, por una resistencia concentrada conectada entre la impedancia característica de la torre y tierra.

Las mediciones de resistividad y los cálculos de las resistencias de puesta a tierra realizados y resumidos en la Tabla 6 muestran un terreno con buenas características conductivas. Se partió de un valor de 20 Ω para la implementación de las simulaciones y se exploraron otros valores para determinar el tipo de puesta a tierra que se requiere cada uno de los apoyos de la línea.

La soportabilidad de los aisladores (kVpico) al impulso atmosférico varía según su forma, su polaridad, el tiempo de cresta y el tiempo de cola. El CIGRÉ propone el uso de curvas de tensión - tiempo para flameos en el frente de la descarga (2 ms a 6 ms); estas curvas se rigen por la siguiente ecuación empírica deducida de los estudios de Darveniza, Popolansky and Whitehead:

$$V = 0,4L + \frac{0,71L}{t^{0,75}} \text{ [MV]}$$

Donde:

V = tensión crítica de flameo (Critical Flashover - CFO), MV

L = longitud de aislamiento, m

t = tiempo de cresta, ms

En la simulación con el EMTP, los aisladores se modelan como interruptores permanentemente abiertos y se analiza la caída de tensión en ellos como; el flameo se determina cuando la sobretensión se hace igual o mayor a los valores de tensión - tiempo de las curvas mencionadas.

La descarga atmosféricas se simuló como una fuente de corriente tipo doble rampa definida por medio de un tiempo de cresta y un tiempo de cola.

El tiempo de cresta de la onda está correlacionada estadísticamente con la magnitud pico; así, para una corriente menor, menor es el tiempo de cresta. Para las simulaciones se tomó el valor medio de las distribuciones estadísticas.

Con descargas directas (aplicadas al cable de fase):

$$t_{cresta} = 0,0834 \times I^{0,828}, \text{ para corrientes pico entre 3 kA y 20 kA}$$

Para 10 kA el valor medio del tiempo de cresta es de 0,5 ms.

Con descargas indirectas (aplicadas al cable de guarda):

$$t_{cresta} = 0,154 \times I^{0,624}, \text{ para corrientes pico mayores de 20 kA}$$

Para 100 kA el valor medio del tiempo de cresta es de 2,7 ms.

Se tomó un tiempo de cola de 77 ms ubicado a la mitad del valor pico, este es el valor medio encontrado en la referencia.

5.8 Resultados de la simulación de descargas atmosféricas en el EMPT

5.8.1 Flameo inverso

Las sobretensiones alcanzadas en las cadenas de aisladores de la línea, por una descarga en la torre o en el cable de guarda (descarga indirecta) presentan una forma similar a la de la Figura 14, en la cual se ilustra un caso con descarga de 100 kA y 2,7 ms de frente de onda y 20Ω de puesta a tierra.

En las Tablas 7, 8 y 9 se presentan los resultados completos obtenidos en las simulaciones para distinto número de platos aislantes y para resistencias de puesta a tierra de 20Ω , 15Ω y 10Ω , respectivamente.

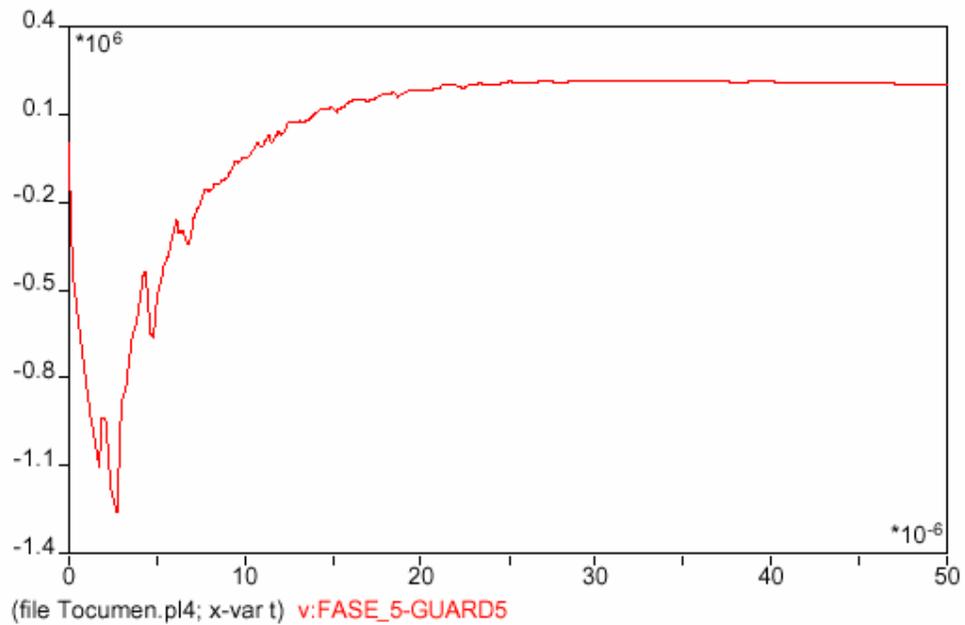


Figura 14. Sobretensión en cadena de aisladores por descarga indirecta

Tabla 7. Resultados de simulaciones atmosféricas para RPT = 20 Ω

Platos	Flameo	CFO [MV]	I flameo [kA]	Salidas ¹ [salidas/100 km año]	Salidas línea ¹ [salidas/año]
7	Inverso	0,751	46,00	28,38	2,09
	Directo	1,528	5,99	0,00	0,00
8	Inverso	0,858	56,00	18,61	1,37
	Directo	1,746	6,84	0,00	0,00
9	Inverso	0,965	68,00	11,95	0,88
	Directo	1,964	7,70	0,00	0,00
10	Inverso	1,073	80,00	8,04	0,59
	Directo	2,183	8,55	0,00	0,00
11	Inverso	1,180	90,00	6,08	0,45
	Directo	2,401	9,41	0,00	0,00
12	Inverso	1,287	98,00	4,85	0,36
	Directo	2,619	10,26	0,00	0,00

Tabla 8. Resultados de simulaciones atmosféricas para RPT = 15 Ω

Platos	Flameo	Flameo [MV]	I flameo [kA]	Salidas 2 [salidas/100 km año]	Salidas línea 1 [salidas/año]
7	Inverso	0,751	57,00	18,03	1,33
	Directo	1,528	5,99	0,00	0,00
8	Inverso	0,858	71,00	10,87	0,80
	Directo	1,746	6,84	0,00	0,00
9	Inverso	0,965	86,00	6,77	0,50
	Directo	1,964	7,70	0,00	0,00
10	Inverso	1,073	97,00	4,93	0,36
	Directo	2,183	8,55	0,00	0,00
11	Inverso	1,180	107,00	3,91	0,29
	Directo	2,401	9,41	0,00	0,00
12	Inverso	1,287	117,00	3,08	0,23
	Directo	2,619	10,26	0,00	0,00

Tabla 9. Resultados de simulaciones atmosféricas para RPT = 10 Ω

Platos	Flameo	CFO [kV]	I flameo [kA]	Salidas 1 [salidas/100 km año]	Salidas línea 1 [salidas/año]
7	Inverso	0,751	77,00	9,19	0,68
	Directo	1,528	5,99	0,00	0,00
8	Inverso	0,858	96,00	5,24	0,39
	Directo	1,746	6,84	0,00	0,00
9	Inverso	0,965	110,00	3,64	0,27
	Directo	1,964	7,70	0,00	0,00
10	Inverso	1,073	123,00	2,71	0,20
	Directo	2,183	8,55	0,00	0,00
11	Inverso	1,180	139,00	2,01	0,15
	Directo	2,401	9,41	0,00	0,00
12	Inverso	1,287	163,00	1,31	0,10
	Directo	2,619	10,26	0,00	0,00

CFO es la Tensión crítica de flameo de la cadena de aisladores, calculada mediante ecuación 4; cuando esta tensión es superada por la sobretensión obtenida en las simulaciones en el EMTP, se encuentra la corriente de descarga crítica que se conoce como la corriente mínima de flameo inverso; el número de salidas se encuentra en los resultados estadísticos obtenidos por medio de la simulación Montecarlo.

5.8.2 Flameo directo

Las sobretensiones en los aisladores por descargas en las fases (descarga directa), presenta un caso similar al de la Figura 15, en la cual se ilustra un caso para una descarga de 10 kA y 0,5 ms de frente de onda, con 20Ω de puesta a tierra.

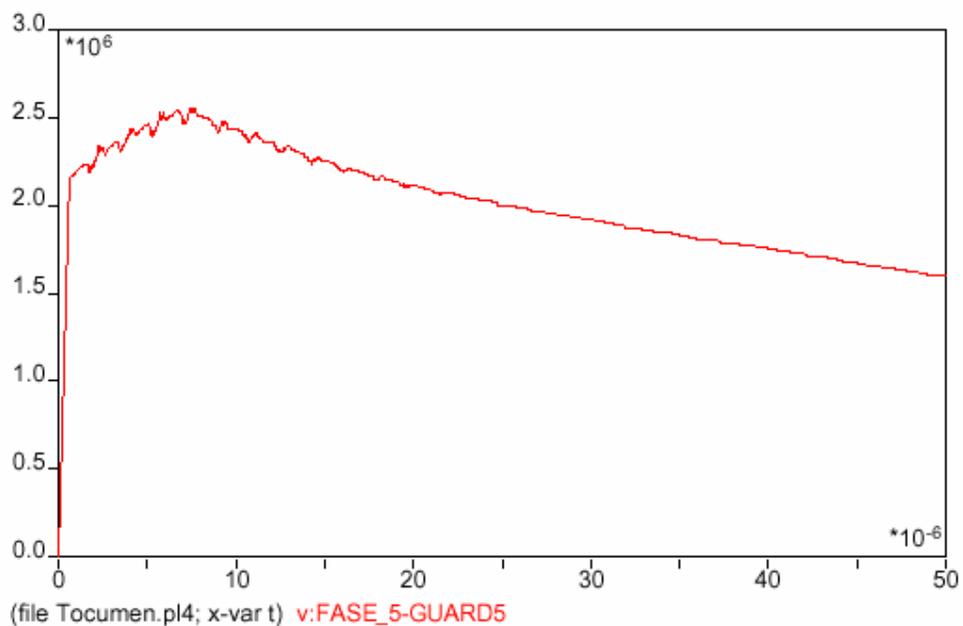


Figura 15. Sobretensión en cadena de aisladores por descarga directa

En las Tablas 8, 9 y 10 se presentan también, los resultados obtenidos en las simulaciones de descargas directas para distinto número de platos aislantes y para resistencias de puesta a tierra de 20 Ω, 15 Ω y 10 Ω, respectivamente. Se observa que para descargas directas las tensiones no son afectadas por el valor de la puesta a tierra.

5.9 Simulación Montecarlo

En la simulación Montecarlo se obtiene un histograma de flameos inversos y directos en la línea y su valor medio, con base en los datos de nivel cerámico, corrientes mínimas de flameo directo e inverso obtenidas en las simulaciones con el EMTP, coordenadas de los conductores de fase y de guarda en la torre, longitud de la línea y el número de descargas a simular.

En las Tablas 7, 8 y 9 se presentan los resultados completos para los todos los casos simulados.

Relacionando los resultados obtenidos del EMTP con los resultados logrados en la simulación Montecarlo, se obtiene el índice de comportamiento de la línea (salidas/100 km año) por flameo inverso con sensibilidad al número de aisladores.

En las Tablas 8 y 9 se observa que con una resistencia de puesta a tierra en las torres de 20 Ω y 15 Ω , respectivamente, se presentan más de 3 salidas por 100 km por año, aún con 12 platos en la cadena de aisladores, el cual es el criterio recomendado por la literatura.

Para obtener el índice de 3 salidas/(100 km año) las torres deberán tener una resistencia de puesta a tierra del orden de 10 Ω en todas las torres y las cadenas de aisladores deberán contar mínimo con 10 platos o tener una longitud equivalente si se utilizan aisladores poliméricos ($L = 1460$ mm).

6. NORMAS TÉCNICAS SOBRE PROTECCIÓN CONTRA RAYO

El propósito de este capítulo es ayudar a entender al lector la forma como cada país busca solucionar el problema de la protección contra rayos. En el caso colombiano se ha desarrollado la Norma NTC 4552-1999, la cual tuvo en cuenta las experiencias de varios países y los resultados de investigaciones de diferentes instituciones, consultorías y universidades colombianas, durante más de 18 años.

La protección contra rayos es un asunto de primordial importancia para la seguridad de los seres vivos y el adecuado funcionamiento de los dispositivos, equipos y sistemas eléctricos y electrónicos. Los sistemas y medios de protección deben, entonces, proteger físicamente a las personas, reducir el riesgo de fuego y evitar la degradación de los dispositivos y equipos y las interrupciones en la producción, a niveles tolerables. Para llenar estos requerimientos y evitar acciones legales, incluidas demandas por pérdidas económicas, las normas de protección contra rayos deben estar basadas en principios científicos probados y argumentos técnicos incuestionables.

6.1 Normas Nacionales sobre protección contra rayo

Alrededor de 16 países del mundo han desarrollado normas de protección contra rayos, las cuales, en su mayoría, tienen como base la Norma internacional IEC 61024. La tabla 1 presenta la información sobre estos países, el documento fuente respectivo y el parámetro del rayo en que se basan para evaluar el riesgo por rayo.

6.1.1 La norma técnica colombiana de protección contra rayos NTC 4552

Esta norma fue desarrollada durante cuatro años (1994-1999) por ingenieros e investigadores de todo el país, convocados por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Icontec, puesta a consulta pública durante tres meses,

evaluada por el Comité Técnico Colombiano y aprobada por el Consejo Directivo del Icontec en septiembre de 1999, para su publicación como Norma técnica colombiana sobre protección contra rayos, NTC 4552. Actualmente el comité de la norma trabaja en su revisión.

6.1.1.1 Objetivo de la Norma.

La NTC 4552 establece las medidas que se deben adoptar para lograr la protección eficaz contra los riesgos asociados a la exposición directa o indirecta de personas, animales, equipos y el entorno a las descargas eléctricas atmosféricas.

6.1.1.2 Alcance de la norma

La NTC 4552 cubre los requisitos de protección contra descargas eléctricas atmosféricas para:

- Estructuras de uso común (oficinas, viviendas, iglesias, colegios, hospitales, etc.).
- Estructuras utilizadas para la prestación de servicios públicos de comunicaciones y de acueducto.

Esta norma no cubre los requisitos de protección contra descargas eléctricas atmosféricas de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

6.1.1.3 Sistema integral de protección contra rayos

Respecto a los rayos, se puede afirmar, sin lugar a dudas, que no existen medios para evitarlos pero sí medidas para ejercer un control que ofrezca seguridad a las personas y a los equipos eléctricos y electrónicos. Por tanto, las precauciones de protección apuntan hacia los efectos secundarios y a las consecuencias de una descarga eléctrica atmosférica.

En la figura 16 se presenta esquemáticamente el Sistema integral de protección contra rayos, Sipra, que se recomienda utilizar para una eficaz protección contra rayos, y la explicación de la función que cumple cada uno de sus componentes.

Como se aprecia, el sistema de puesta a tierra es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos. Dentro de la protección externa, su

propósito es hacer posible la descarga y dispersión de las elevadas corrientes del rayo hacia la tierra a través de un elemento conductor enterrado en el suelo, sin causar sobretensiones peligrosas para las personas y para los equipos. En la protección interna sirve como referencia de tensión para los equipos y para disipar las corrientes de sobretensiones, derivadas por los dispositivos de protección fina.



COMPONENTE	FUNCION QUE CUMPLE
Sistema de protección externa, SPE	Captar los rayos y llevarlos a tierra de forma segura.
Instalación de interceptación de rayos	Interceptar los rayos
Bajantes	Conducir las corrientes de rayo
Sistema de puesta a tierra, SPT	Dispersar y disipar las corrientes de rayo
Guía de seguridad personal	Formación para adquirir comportamientos seguros
Sistema de alarma o detección de tormentas	Anunciar la cercanía de tormentas eléctricas

Figura 16. Elementos del sistema de protección contra rayos y la función que cumplen.

6.1.1.4 Metodología para implementar el Sistema integral de protección contra rayos en estructuras

Las medidas de protección para una estructura o un conjunto de estructuras se enfocan hacia los efectos directos e indirectos de los impactos cercanos de rayos. Los efectos directos se refieren a la corriente del rayo que impacta en el sistema de interceptación, y los indirectos, a las tensiones inducidas dentro de la instalación debidas a la variación de corriente del rayo (di/dt). A partir de esto, aunque ninguna protección contra rayos es ciento por ciento confiable, puede alcanzarse un alto grado de seguridad si se concibe el sistema de protección contra rayos mediante la combinación de varios elementos:

- Protección externa
- Protección interna
- Sistema de puesta a tierra
- Guía de seguridad personal

Para realizar el estudio de protección contra rayos se debe partir de la caracterización espacial del sitio en estudio, para así tener en cuenta las condiciones de aleatoriedad, propias de cualquier fenómeno meteorológico.

A partir de la caracterización espacial de la estructura se realiza la evaluación del riesgo de daño por rayos.

Con base en la teoría del método electrogeométrico, se hace el diseño de protecciones externas contra rayos y luego se estudian los lincamientos generales para establecer las protecciones internas de equipo eléctrico y electrónico, susceptibles de daños por rayos.

6.1.1.5 Evaluación del factor de riesgo para protección contra rayos

El propósito de la evaluación del factor de riesgo es establecer la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura dada, y determinar si este sistema debe ser integral.

La evaluación del riesgo es el elemento más importante en el procedimiento para diseñar un sistema de protección contra rayos, y especialmente en el procedimiento de selección del nivel de protección. Por ello el método de evaluación debe ser efectivo y relativamente simple.

Para encontrar el nivel de riesgo se tienen en cuenta cuatro índices, clasificados y ponderados dentro de dos características:

los parámetros de los rayos y los índices que están relacionados con la estructura.

Los parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas utilizados para encontrar el nivel de riesgo son la densidad de descargas a tierra, DDT, y la corriente pico absoluta promedio, I_{abs} expresada en kiloamperios, asignando una mayor relevancia a la primera de éstas, debido a que existe mayor probabilidad de que una estructura se vea afectada dependiendo de la cantidad de descargas a la que está expuesta, que de la intensidad de las mismas. Por esta razón se toman proporciones de 0.7 para la DDT y 0.3 para la I_{abs} , obteniendo la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = 0.7 * R_{DDT} + 0.3 * R_{iabs} \quad (1)$$

siendo R_{DDT} el aporte al riesgo debido a la densidad de descargas a tierra, y R_{iabs} el aporte al riesgo ocasionado por la magnitud de la corriente pico absoluta promedio.

Los valores de I_{abs} y de DDT deben tener el 50% de probabilidad de ocurrencia, o menos, a partir de datos multianuales. Además se debe tomar un área de 9 km² (3 km x 3 km) o menos, teniendo en cuenta la exactitud en la localización (*location accuracy*) y la exactitud en la estimación de la corriente pico de retomo (*lightning peakcurrent accuracy*) del sistema de localización de rayos.

Al encontrar la densidad de descargas a tierra con sistemas de localización confiables, implícitamente se considera la orografía del área, es decir, montaña, ladera, plano, etc., y la latitud.

Tabla 10. Valores del índice relacionado con la altura y el área de la estructura

Altura y área de la estructura	Valor del índice
Área menor a 900 m ²	
Altura menor a 25 m	5
Altura mayor o igual a 25 m	20
Área mayor o igual a 900 m ²	
Altura menor a 25 m	10
Altura mayor o igual a 25 m	20

Sumando los valores de los índices relacionados con la estructura, como son el uso, el tipo y la combinación de altura y área, de acuerdo con las tablas 8,9 y 10, se obtiene la gravedad que se puede presentar en la estructura.

Las estructuras que obtengan valores superiores a 80 presentan una gravedad severa; las que obtengan entre 66 y 80, se identifican como de gravedad alta; las que obtengan entre 51 y 65, como de gravedad moderada; las que obtengan entre 36 y 50, como de gravedad baja, y las menores a 36 se consideran de gravedad leve. Esto se puede apreciar en la tabla 11.

Tabla 11 nivel de gravedad

Suma de índices de gravedad	Gravedad
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Moderada
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

Luego de esto se plantea la matriz del factor de riesgo, teniendo en cuenta los parámetros de la zona y la gravedad según el tipo de estructura; con ello se obtiene:

Parámetros	Gravedad				
	Severa	Alta	Moderada	Baja	Leve
Severos	Alto	Alto	Alto	Medio	Bajo
Altos	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo
Moderados	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Bajos	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Factor de riesgo ■ Alto ■ medio □ bajo

El factor de riesgo es una herramienta que le indica al diseñador de una protección la magnitud del riesgo debido a rayos a que está expuesta una instalación, sus ocupantes y los equipos que se encuentren en el sitio evaluado. En cualquier caso, es responsabilidad del diseñador realizar las especificaciones de la instalación para una segura protección contra rayos; sin embargo, se dan las siguientes recomendaciones:

Riesgo	Recomendación
Bajo	Diseñar e implementar un sistema de protección interna y un sistema de puesta a tierra de acuerdo con las normas IEEE 1100, NTC 2050 y NTC 4552
Medio	Diseñar e implementar un sistema de protección externa, un sistema de protección interna y un sistema de puesta a tierra de acuerdo con las normas IEEE 1100, NTC 2050 y NTC 4552
Alto	Diseñar e implementar un sistema de protección interna y un sistema de puesta a tierra de acuerdo con las normas IEEE 1100, NTC 2050 y NTC 4552. Apartallamientos de equipos sensibles y estricto mantenimiento de protecciones internas cada vez que se presenten descargas de rayos directas o cercanas

El sistema de alarma se requiere en sitios abiertos como estadios de fútbol, canchas de golf, centros recreacionales al aire libre o similares, donde el factor de riesgo sea medio o alto. En cualquier caso se debe difundir una guía de seguridad personal específica para el sitio que hay que proteger.

6.2 Procedimiento recomendado por la Norma IEC 61024-1-1

De acuerdo con la Norma IEC 61024-1-1, el siguiente es el procedimiento recomendado para seleccionar un sistema de protección contra rayos:

- Se evalúa el número de impactos de rayo por año para un área efectiva AE mediante la fórmula:

$$N_d = N_G A_E 10^{-6}$$

con $N_G = 0.04 T_d^{1.25}$ [$\text{km}^2/\text{año}$]; T_d : nivel ceráuneo

- Se avalúa el número de rayos por año N_o el cual, según la Norma IEC, debe ser establecido por normas nacionales en cada país.

- Se **compara** N_d con N_c :

- Si $N_d \leq N_c$, entonces no se necesita un sistema de protección
Contra rayos

- Si $N_d > N_c$, se calcula la eficiencia $\xi = 1 - N_c / N_d$

- Se escoge el nivel de protección, de acuerdo con la tabla 12.

Tabla 12. Nivel de protección.

Eficiencia	Nivel de protección
0.98	I
0.95	n
0.90	m
0.80	IV

Como la Norma IEC 61024-1-1 propone que el número de rayos por año sea establecido por normas nacionales -ya que todos tenemos problemas similares pero formas diferentes de solucionarlos-, se presenta a continuación la forma como lo propone la Norma Británica BS 6651-1992 para luego compararla en casos concretos con la Norma técnica colombiana NTC 4552 y la americana NFPA 780.

6.3 La Norma Británica Bs 6651-1992

6.3.1 Número probable de impactos de rayo

El número probable de impactos de rayo se deriva multiplicando la densidad de rayos a tierra, N_G (valor probable por kilómetro cuadrado-año) por el área efectiva del conjunto, A_E .

Esto es dado por la fórmula:

$$P = A_E \cdot N_G \cdot 10^{-6} \text{ donde:}$$

P: Número probable de impactos de rayo por año. En la Norma IEC 61024-1-1 se denota N_d

A_E : Área efectiva total del conjunto (m^2)

N_G : Densidad de rayos a tierra por km^2 por año

10^{-6} : Factor de conversión para tener en cuenta el hecho que N_G y A_E están en diferentes unidades, entonces P da en km^2 .

6.3.2 Densidad de rayos a tierra

La Norma BS 6651-1992 presenta un mapa de densidad de rayos a tierra para la Gran Bretaña. Adicionalmente presenta un cuadro de conversión de valores de nivel ceráuneo a densidad de rayos a tierra (véase tabla 13).

Tabla 13. Relación entre nivel ceráuneo y densidad de rayos a tierra según

Nivel ceráuneo	Rayos (flashes) por km ² año	
	Media	Límite
5	0.2	0.1 a 0.5
10	0.5	0.15 a 1
20	1.1	0.3 a 3
30	1.9	0.6 a 5
40	2.8	0.8 a 8
50	3.7	1.2 a 10
60	4.7	1.8 a 12
80	6.9	3 a 17
100	9.2	4 a 20

BS 6651-1992.

Cabe destacar que esta tabla está basada en mediciones de latitudes templadas. Si pretendemos aplicarla al caso colombiano en latitud tropical, sus valores difieren grandemente de los que ya hemos medido. Por ejemplo, existen zonas en Colombia que con similar nivel ceráuneo, la densidad varía considerablemente:

Bogotá tiene un nivel ceráuneo promedio multianual de 80 y su densidad de rayos a tierra promedio multianual es menor de 2, mientras que la zona donde se ubica la estación experimental de medición directa de rayos, Ilyapa, en Samaná, Caldas, tiene un nivel ceráuneo cercano a 100 y una densidad de rayos a tierra por kilómetro cuadrado-año promedio de 40.

6.3.3 Área efectiva del conjunto

Está dada por la fórmula:

$$A_E = A_s + C_{SG} + C_{AS} + C_{MP} + C_{DL}$$

donde:

A_s : Área de planta de la estructura (m²)

C_{SG} : Área conjunta de la tierra (*ground*) alrededor (m²)

C_{AS} : Área conjunta de estructuras adyacentes asociadas y sus respectivas tierras (m²)

C_{MP} : Área conjunta de las entradas y salidas de la(s) alimentación(es) de energía (m²)

C_{DL}: Área conjunta de redes de datos llevando la tierra de referencia de la edificación (m²)

6.3.4 Vulnerabilidad del sistema

El riesgo general de un equipo electrónico, debido a los efectos secundarios de un rayo, dependerán de P (probabilidad de impacto) y:

- El tipo de estructura (F)
- El grado de aislamiento (G)
- El tipo de terreno (H)

Los factores de peso basados en grados relativos de riesgo son asignados por la Norma Británica BS 6651-1992 en las tablas 14,15 y 16.

Tabla 14. Valor de F, tipo de estructura

Clasificación de la estructura Valor de F	
Edificios con protección contra rayos y unión equipotencial, según BS 6651	1
Edificios con protección contra rayos y unión equipotencial, según CP 326	1.2
Edificios donde la unión equipotencial para equipo eléctrico y electrónico puede ser difícil (por ejemplo, edificios de más de 100 m de altura)	2.0

Tabla 15. Valor de G, grado de aislamiento.

Grado de aislamiento	Valor de G
Estructura localizada en un gran área de estructuras o árboles de igual o mayor altura (por ejemplo, en una gran ciudad o en el bosque)	0.4
Estructura localizada en un área con pocas estructuras o árboles de altura similar	1.0
Estructura completamente aislada o excediendo al menos dos veces la altura de las estructuras circundantes o árboles	2.0

Tabla 16. Valor de H, tipo de terreno.

Tipo de terreno	Valor de H
Plano a cualquier nivel	0.3
Colinas	1.0
Montañosos entre 300 y 900 metros	1.3
Montañosos por encima de 900 metros	1.7

6.3.5 Cálculo del riesgo total

El Riesgo (R) de un impacto de rayo que se acopla a un sistema eléctrico o electrónico a través de las redes de alimentación de energía o redes de datos es:

$$R = P.F.G.H$$

El número promedio de años entre sobretensiones transitorias causado por rayos está dado por $1/R$, basado en períodos de muchos años. El riesgo R se entiende en la Norma Británica BS 6651-1992 como una guía para que el usuario tome una decisión respecto a la protección.

Tanto los impactos comerciales por daños en los sistemas como las salidas de los sistemas de potencia e implicaciones de salud y seguridad deben ser tenidos en cuenta. Frecuentemente la decisión de proteger estará basada en una simple comparación de: a) el costo del daño y salida del sistema de potencia, comunicaciones o datos, y b) el costo de la prevención y protección.

6.3.6 Protección para niveles de exposición

La Norma BS 6651-1992 da una clasificación de cuatro tipos de instalaciones basada en los efectos de daño a los contenidos de esa instalación. Esta clasificación se muestra en la tabla 21.

Tabla 17. Clasificación de estructuras y contenidos

Uso de estructuras y efectos de daño en su contenido	Clasificación de pérdidas
Casas de habitación y estructuras con equipo electrónico de bajo costo y bajas penalizaciones por pérdidas	1
Edificios comerciales o industriales con procesamiento de datos, donde el daño de un equipo o la salida de operación del sistema eléctrico causa problemas significativos	2
Aplicaciones industriales o comerciales donde la pérdida de datos o control de procesos computarizados tendría severos costos financieros	3
Procesos altamente críticos donde las pérdidas del control de una planta o la operación computarizada puede llevar a severos daños del medio ambiente o costos humanos (por ejemplo, plantas nucleares, químicas, etc.)	4

Es importante destacar que la clasificación de pérdidas de la norma británica está basada enteramente sobre pérdidas financieras, a excepción de la última clasificación de la tabla que considera la evaluación de procesos altamente críticos (plantas nucleares, químicas, etc.) donde puede haber altos costos por pérdidas de vidas humanas.

Combinando el riesgo R con la clasificación de pérdidas se puede determinar el nivel de exposición para el cual las protecciones contra sobretensiones transitorias se deben diseñar, según la tabla 18

Tabla 18. Clasificación del nivel de exposición.

Clasificación de pérdidas	Nivel de exposición: R =			
	< 0.005	0.005-0.0499	0.05-0.499	>0.5
1	Despreciable	Despreciable	Bajo	Medio
2	Despreciable	Bajo	Medio	Alto
3	Bajo	Medio	Alto	Alto
4	Medio	Alto	Alto	Alto

7. SISTEMAS LOCALIZADORES Y MEDIDORES DE PARÁMETROS DEL RAYO

Para medir los impulsos de corriente upo rayo, actualmente se utilizan dos procedimientos: medición indirecta y medición directa.

Los sistemas de medición indirecta se utilizan para hacer el análisis de la cantidad de descargas a tierra en una región y en un período de tiempo determinado, a través de equipos que censan su presencia a distancia, bien sea con sensores de campo electromagnético o por medio de localización satelital.

Por su naturaleza, las descargas eléctricas atmosféricas no pueden ser medidas por un solo instrumento. Por eso la medición directa implica la captación del recorrido temporal de la descarga durante impactos directos y su transformación a cantidades equivalentes que permitan el registro de los parámetros de acción del rayo, utilizando una torre captadora y un elemento derivador de baja resistencia acoplado entre la torre y un elemento de registro. La transformación de la señal se hace por medio de resistencias Shunt, medios inductivos como cinta magnética, la bobina de Rogowski, transformadores Pearson o la bobina Munich, donde la mayor parte de la corriente pasa por la resistencia de esta derivación y una pequeña cantidad que fluye por el elemento de registro es proporcional a la corriente total.

7.1 Sistemas localizadores de rayos (Medición indirecta)

En general, se puede decir que hay dos métodos ampliamente utilizados para la localización indirecta de rayos; el primero está basado en la tecnología conocida como *Direction Finding* (DF) y el segundo en la tecnología *Time of Arrival* (TOA).

La firma norteamericana Lightning Location and Protection (LLP) desarrolló y fabricó el sistema DF y la firma, también norteamericana, Atmospheric

Research Systems Inc. (ARSI) desarrolló y fabricó el sistema TOA. En el año 1995 estas dos empresas fueron integradas en una sola: Global Atmospheric Inc., y actualmente bajo la empresa VAISALA (2002) cubren más del 95% de los sistemas de localización de descargas eléctricas atmosféricas a nivel mundial con el sistema IMPACT que unió las dos tecnologías. El 5% restante de los sistemas localizadores de rayos lo cubren los siguientes sistemas:

- El sistema desarrollado en Francia por la French Aero Spatial Research Office (Onera), fabricado por la compañía Dimensions. Utiliza imágenes interferométricas tridimensionales y sensores de campo eléctrico para localización de rayos a grandes distancias.
- En el Reino Unido el Electricity Council Research Center desarrolló el EA *Technology Lightning Location System*. Las estaciones, basadas en la tecnología DF usan tres lazos verticales con diferencia en azimut de 120 grados. La frecuencia de operación del sistema es de 1070 Hz, con un ancho de banda de 350 Hz. Operan cinco estaciones en el sur y centro del Reino Unido. En los últimos seis años el sistema se ha ido desarrollando de experimental a comercial.
- Konovalov *et al.* (1992) hacen una interesante descripción del sistema ruso para localizar rayos usando el concepto de la diferencia de fase E-H a una frecuencia de 1 kHz. En Rusia han sido desarrollados sistemas comerciales de localización de rayos. Dos de éstos son la estación Ochag-2P y Molniya (tecnología DF) y un analizador de prevención de tormentas y localización FAG-1. De acuerdo con sus estudios, pueden registrar rayos en un área hasta 70 km con un error de cerca de 10 km.
- El sistema francés Safir es más usado como sistema de prevención, con capacidad para delimitar zonas peligrosas en tierra y altitud. El primer sistema operacional fue instalado en la Guayana Francesa y el segundo por el Centre d'Essais des Landes, un centro de pruebas aéreas al sudoeste de Francia.
- El más reciente sistema de localización de rayos fue desarrollado por el Centro Espacial Marshall de la NASA en Estados Unidos, basado en el principio de detección óptica. El detector óptico de transitorios (OTD, por su sigla en inglés) es un equipo científico montado sobre la estación satelital

MicroLab -1, la cual fue lanzada a órbita por la NASA en un cohete Pegasus en abril de 1995. La misión fundamental de los instrumentos del OTD es mejorar el entendimiento de la distribución de tormentas, procesos de formación de nubes y variación de las tormentas, mediante la detección y localización de la actividad eléctrica atmosférica sobre grandes áreas de la superficie de la Tierra.

Los instrumentos del OTD detectan y localizan rayos que ocurren dentro de su campo de acción visual, registra el tiempo de ocurrencia y mide la energía radiada por los rayos. La resolución espacial de los instrumentos es de 10 km, y la resolución temporal es de 2 ms. El OTD detecta descargas intranubes y descargas nube-tierra durante el día y la noche con alta eficiencia en la detección. La trayectoria orbital del satélite MicroLab-1 permite al OTD dar una vuelta alrededor de la Tierra cada 100 minutos a una altitud de 740 metros.

Usando un arreglo de fotodiodos de 128 x 128 píxeles y un lente gran angular, los instrumentos del OTD son capaces de cubrir áreas totales de 1300 x 1300 km. Con el campo de acción visual y la trayectoria orbital, el OTD puede monitorear tormentas individuales y sistemas de tormentas cada cuatro minutos, un período suficiente para obtener una medida de la rata de descargas por tormenta.

Los datos de rayos son los pulsos ópticos que detecta el OTD mientras pasa sobre una tormenta activa. Estos pulsos son agrupados en clases individuales llamados "eventos", "grupos", "*flashes*" y "áreas". Un evento es el pulso que registra el OTD cuando un pixel, en un plano focal, sobrepasa un valor umbral. Un grupo es definido como uno o más eventos adyacentes que ocurren durante un tiempo de 2 ms. Un *flash* se define como uno o más grupos suficientemente cercanos en el espacio. Un "área" es definida como un agrupamiento de uno o más "*flashes*" que están suficientemente separados.

7.1.1 Principio de operación del sistema DF

El sistema DF, desarrollado por la firma LLR descrito por Krider *et al.* (1976 y 1980), consta de dos partes: el sensor o antena receptora (*directionfinder*) y el analizador de posición. El sistema puede operar como una estación DF (TSS¹)

o múltiples estaciones. Para una sola estación la exactitud angular está en ± 2.5 grados.

Para sistema multiestaciones, el analizador recibe datos de tres o más sensores en un arreglo con líneas base de 100-200 km, dependiendo de la sensibilidad escogida para las estaciones.

El sensor consta de una antena de campo magnético de lazos ortogonales, una antena de campo eléctrico de placas y un microprocesador. El ancho de banda del sistema de sensores es aproximadamente 1-400 kHz, tal que la forma y polaridad de las ondas electromagnéticas generadas por el rayo pueden ser registradas con relativa buena precisión. La antena de lazos ortogonales sensa la variación del campo magnético del rayo, y se induce una tensión en cada lazo, proporcional a la derivada del campo magnético multiplicada por el coseno del ángulo entre el plano del lazo y la dirección de propagación del campo incidente. La relación de la tensión integrada en los lazos ortogonales da la dirección de la descarga eléctrica atmosférica.

La antena de campo eléctrico omnidireccional es usada para determinar la polaridad de la carga transportada por el rayo y eliminar la ambigüedad de 180 grados que es inherente en las mediciones azimut de la antena de lazos cruzados cuando la dirección de la corriente es desconocida.

El microprocesador realiza un número de pruebas a la forma de onda del campo magnético para aceptar únicamente aquellas que correspondan a descargas de retorno nube-tierra y rechazar descargas entre o intranubes. Los criterios para las formas de onda son modificados automáticamente dependiendo de la polaridad y amplitud del pulso inicial y si es de la primera o subsecuentes descargas de retorno. Una vez la forma de onda ha sido aceptada, el microprocesador digitaliza las amplitudes de los valores máximos para cada lazo, determina el azimut al punto de impacto de la descarga y transmite los datos al analizador de posición.

El analizador de posición confronta los datos de los diferentes sensores para determinar si un dato ha sido detectado por dos o más sensores dentro de un intervalo de tiempo de 20 ms. Si es así, la localización se calcula por

triangulación. Para cada *stroke* localizado, el sistema analizador registra el tiempo, las coordenadas, la amplitud y polaridad del valor máximo de la onda, el número de *strokes/flash* y los sitios de los sensores que detectaron el rayo. En diciembre de 1990 se instaló el primer sensor de tormentas (TSS420-430) en Colombia, con financiación de Colciencias, dentro del proyecto de caracterización espacio-temporal de las descargas eléctricas atmosféricas.

7.1.2 Principio de operación del sistema TOA

El sistema *Lightning Position ana Tracking System* (LPATS) para localización de rayos a tierra fue desarrollado hacia 1980.

Este sistema, descrito por Bent y Lyons (1984), mide las diferencias de tiempo de arribo (*Time of Arrival*, TOA) de una señal de descarga de retorno mediante tres o más sensores y localiza el sitio de impacto por medio de la intersección de las correspondientes hipérbolas sobre una superficie esférica. Las líneas base de las estaciones varían de 10 a 400 km, dependiendo de la sensibilidad seleccionada; las estaciones están conectadas a un analizador central por medio de canales de comunicación dedicados.

Cada estación consta de una antena omnidireccional de recepción de descargas de rayo (*stroke antenna*) y una antena de sincronización (GPS *antenn*). Una antena vertical recibe la señal de referencia de tiempo y la otra sensa la variación de campo eléctrico del rayo. Para mantener una buena exactitud (*accuracy*) en la localización del rayo, la señal de tiempo de las diferentes estaciones deberá estar sincronizada dentro de una fracción de un microsegundo. Ellas están sincronizadas a una señal de tiempo de referencia común.

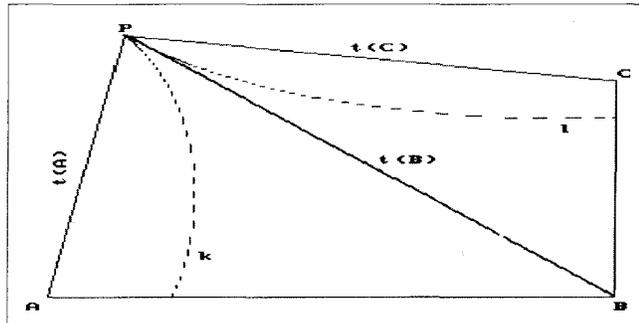
El receptor responde a cualquier frecuencia dentro de la banda de 50 Hz a 500 kHz. Cualquier señal será detectada por el sensor en esta banda de frecuencia de una amplitud suficientemente grande para disparar el umbral (*threshold*) del receptor, el cual digitalizará la forma de onda completa de la señal.

En la digitalización de la forma de onda, el receptor determinará el pico del *stroke*, su impresión de tiempo y determina tiempo de ascenso, rata de ascenso pico y, usando un proceso ARSI patentado, identifica si el *stroke* fue

nube-nube o nube-tierra. El mensaje enviado al analizador central incluye información sobre la polaridad y amplitud.

Asumiendo que la superficie de la tierra es plana, el punto P de la figura 1 es el punto donde se presenta la descarga de un rayo. La onda electromagnética, generada por la corriente del rayo, se propagará en todas las direcciones a la velocidad de la luz. Esta onda alcanzará los puntos A, B y C después de un tiempo $t(A)$, $t(B)$ y $t(C)$, respectivamente. Debido a que el tiempo de inicio de viaje de la onda electromagnética es desconocido, no es posible calcular los tiempos de viaje $t(A)$, $t(B)$ y $t(C)$.

Sin embargo, la diferencia en el tiempo de viaje $t(A) - t(B)$ y $t(C) - t(B)$ puede ser establecida.



Por geometría, todos los puntos que tienen una diferencia constante e distancia de dos puntos fijos forman una hipérbola.

En el caso de $t(A) - t(B)$ se encuentra la hipérbola k y en el caso de $t(C) - t(B)$, la hipérbola m . El punto de intersección de las dos hipérbolas da el punto p .

Para cubrir un área completa se necesita un mínimo de tres receptores. En el caso de cuatro o más receptores y todos ellos reportando, el sistema puede hacer una escogencia entre todas las posibles diferencias de tiempo.

El siguiente procedimiento es llevado a cabo por el sistema:

- Determina todas las diferencias de tiempo.
- Calcula la relación entre estas diferencias de tiempo, y con las relaciones y líneas base relevantes forma las relaciones con valores ascendentes.
- Determina la combinación de dos diferencias de tiempo, el cual forma una triada con la suma más baja de las relaciones.

- Almacena esta combinación y repite el procedimiento hasta que todas las combinaciones son encontradas.

El sistema toma la primera combinación y trata de hallar una solución. Si una solución no es encontrada, se trata con la siguiente combinación, hasta considerar todas las combinaciones.

El sistema satelital GPS (*Global Position System*) es el más utilizado actualmente a nivel mundial para sincronización de tiempo de los sensores, por exactitud y cubrimiento

7.2 Errores en los sistemas DF y TOA

Tanto el sistema DF como el TOA son afectados por un número de factores que producen errores acimutales. En el sistema DF, los conocidos errores casuales (*random errors*) son principalmente producidos por ruido de fondo (*background noise*) en los amplificadores del receptor, canales de rayo no verticales y fluctuaciones en la electrónica DF. Este tipo de errores ha producido históricamente errores de ángulo de 0.7 - 0.9 grados (RMS).

Los errores de sitio (*site errors*) es la segunda fuente de error en el sistema DF. Estos errores tienen varias fuentes, siendo las más relevantes las anomalías en el sitio de instalación, causadas por estructuras cercanas, tales como edificios, líneas de transmisión de energía y cables y por variaciones en el terreno circundante.

Tales errores en cada DF pueden causar diferencias de ángulo de azimut entre lo medido y lo real. En pruebas realizadas con el sensor TSS/420 instalado en la Universidad Nacional de Colombia, en Bogotá, los errores comprobados han estado por debajo de lo especificado por sus fabricantes (menor a + 2.5 grados).

Estos errores pueden ser fácilmente corregidos una vez ellos han sido determinados; el sistema LLP tiene la capacidad de hacer estas correcciones durante operación en tiempo real, garantizando así actualmente errores acimutales menores a 0.5 grados.

En el sistema TOA hay dos fuentes principales de error: la primera es el efecto de la propagación por tierra sobre el tiempo del pico de forma de onda usado

en la tecnología TOA. Éste puede producir inconsistencias en localización de 1 o más kilómetros. Por ejemplo, Montandon reporta en resultados de más de dos años con el sistema LPATS de Suiza, errores de localización entre varios cientos de metros hasta 4.2 km para Hohen Peissenberg y hasta 1.3 km para St. Chriscona.

La segunda fuente de error de TOA es la contraparte de los errores de sitio de LLR. Es bien conocido que la conductividad finita de la tierra y la topografía producen dispersión en la forma de onda y tiempos de propagación variables. Ambos efectos son una función de la dirección para cualquier sensor y no son corregibles.

La conductividad a tierra afecta la señal del rayo, y aunque la magnitud exacta de estos efectos es desconocida, se pueden esperar errores del orden de varios microsegundos.

Las variaciones en el terreno debido a colinas o montañas pueden tener un efecto mayor sobre el tiempo de propagación, debido a que el camino de tierra se incrementa. Este efecto produce diferencias de tiempo (las cuales son función del ángulo) del orden de microsegundos.

En este contexto la conductividad a tierra y la topografía afectan tanto las correcciones temporales como los tiempos de propagación de rayos.

7.3 Exactitud (accuracy) y eficiencia (efficiency) de los sistemas DF y TOA

Desde comienzos de la década de 1990, el número de sistemas localizadores de rayos (SLR) instalados en el mundo se ha incrementado considerablemente. Los datos obtenidos a partir de los SLR se usan actualmente para hacer mapas de densidad de descargas a tierra y estadísticas de distribuciones de amplitud de corriente de retorno y forma de impulso de la corriente del rayo, entre otras. Estos proporcionan información redundante muy útil para el diseño de sistemas de potencia y aparatos de protección. Infortunadamente, el desempeño de los SLR es afectado por varios factores, como errores aleatorios y sistemáticos y configuraciones erróneas del sistema, que influyen la calidad de los datos recolectados.

Durante 1997 se hizo una encuesta a nivel mundial, como parte de una investigación en el Proyecto PAAS de la Universidad Nacional de Colombia, cuyo objetivo era identificar los sistemas utilizados y su funcionamiento en aspectos tales como exactitud en la localización, eficiencia en la detección y precisión en la determinación de la corriente pico de retorno del rayo. En los diez países encuestados, actualmente hay siete redes LLP (basados en DF) instaladas en Italia, Dinamarca, Estados Unidos, Finlandia, Colombia, Japón y Suecia; cinco sistemas LPATS (basados en TOA) instalados en Colombia, Israel, Japón, Estados Unidos y Suecia; cinco sistemas IMPACT, instalados en Austria, Estados Unidos, Italia, Japón y Suecia, y un sistema SAFIR instalado en Japón. Los valores de la eficiencia en la detección reportados están entre el 30-90%, pero generalmente estos valores son más bajos que los especificados por el fabricante. Aunque en algunos países la exactitud en la localización no ha sido calibrada, los valores obtenidos están entre 3.5-10 km. La precisión en la determinación de la corriente pico de retorno del rayo es otro parámetro que no ha sido evaluado en algunos países, y en donde se ha hecho, los valores reportados están entre el 20-50%.

En cualquier comparación de sistemas localizadores de rayos hay tres factores fundamentales de comparación:

- La exactitud (*accuracy*) en localización y estimación de corriente
- La discriminación de rayos a tierra (*Ground stroke discrimination*)
- La eficiencia en la detección (*detection efficiency*)

La exactitud en este contexto, expresada generalmente en kilómetros o ángulos acimutales, se refiere a la diferencia de distancia entre el sitio de impacto del *stroke* registrado por el sensor y el sitio real.

La eficiencia en la detección, expresada en porcentaje, se refiere a la relación entre el número de *strokes* o *flashes* registrados por el sensor, al número de *strokes* o *flashes* que realmente han impactado en tierra.

7.4 Exactitud y eficiencia del sistema DF

La firma francesa Meteorage que cubre totalmente el territorio francés con 16 estaciones DF, reporta (Le Bouich and Plantier, 1990) exactitudes de localización menores a 4 km para el 50% de todos los rayos y menor a 8 km para el 90%, dentro de prácticamente la misma área.

Tuomi (1991) hace un interesante análisis de la red finlandesa DF. Usando algunas consideraciones teóricas, Tuomi muestra cálculos de eficiencia con datos de 1990 entre 70-80% y separaciones entre DF de 200-300 km. Tuomi describe que la eficiencia en la detección también fue determinada mediante comparación de resultados con contadores de rayos, dando eficiencias del orden de 78%.

La experiencia colombiana con este sistema estableció, mediante medición con el sensor LLP-TSS/420 y corroboración con los eventos registrados y reportados por la Empresa de Energía de Bogotá (EEB) y las Empresas Públicas de Medellín (EPM) en el sitio de descarga (líneas de transmisión o subestaciones), las exactitudes en tres casos, mostradas en la tabla 19.

Tabla 19. Exactitud en localización de rayos del sensor LLP TSS/420, mediante comparación con el evento producido en líneas o subestaciones de la EEB, por el rayo detectado.

Fecha	Hora	Exactitud grados-km	Evento reportado por la EEB
12.02.93	16:12:05	5-0.74	Cadena de aisladores rota
25.02.93	14:31:24	2-0.46	Cable de guarda roto
25.02.93	14:26:18	3-0.27	Pararrayos estallado

En una evaluación de la red LDN (*Lightning Detection Network*) de los Estados Unidos, Cummins *et al.* (1992) predijeron una exactitud de localización promedio de 1.7 km después de las correcciones de errores de sitio. Orville (1992) calcula una eficiencia en detección para la misma red de 70%.

Un comentario final sobre el sistema multiestación DF puede ser importante de considerar. De acuerdo con López y Passi (1991), el error de posición del rayo

decrece drásticamente cuando se incrementa el número de estaciones DF, como se corroboró en la red española.

7.5 Exactitud y eficiencia del sistema TOA

De acuerdo con el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología SMHI, el cual cuenta con una red de seis estaciones del sistema LPATS, la exactitud en la localización, determinada por comparación con radar de eco, es del orden de 5 km (Oskarsson, 1989). Al norte de Suecia, sin embargo, se ha reportado que el sistema ha perdido gran cantidad de rayos y en algunos casos la cantidad total de la tormenta, cuando se compara con datos de satélite.

Lo anterior puede tener algunas conexiones con las observaciones de Janssen y Kema (1990) en el sistema LPATS de Holanda: "Durante la primera estación de tormentas se observó que el receptor estaba saturado durante el tiempo que la nube de tormenta estaba justamente sobre el receptor. Cuando esto pasa simultáneamente en dos receptores, que ocurrió un número de veces, el sistema no puede operar, debido a que dos receptores están fuera".

McGorman y Rust (1988) colocan la eficiencia en detección del sistema LPATS entre 40-55%: "el sistema DF parece ser algunas veces más exacto que el sistema TOA. Los errores debidos al sistema DF en la región fueron menores de 10 km. Para un rango de 250 km y más, el sistema TOA fue el de mejor exactitud, pero así mismo produjo tormentas fantasmas en regiones a más de 100 km de donde fue indicado".

Mironov *et al.* (1992) dicen que "el sistema LPATS da una eficiencia de detección hasta de 55% (mientras que el correspondiente sistema LLP alcanza hasta 70%)". Petrenko y Kononov (1992) describen que "... el sistema TOA instalado en Leningrado, en cuatro sitios y línea base de 30-80 km, mostró errores de posición de 1 km para el área dentro de la red".

En 1991, la red suiza PTT de LPATS detectó un rayo que impactó en la torre de Hohen Peissenberg y lo registró a 0.1 km de la torre. Así mismo registró otro a 4.2 km.

8. LA RED COLOMBIANA DE MEDICIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS, RECMA

En 1988, la Universidad Nacional de Colombia -Programa PAAS y la Empresa de Energía de Bogotá, EEB-, luego de varios años de trabajos conjuntos y exitosos en estudios sobre el tema de las descargas eléctricas atmosféricas, propusieron la reunión de empresas del sector eléctrico colombiano con el objetivo de conocer las experiencias de cada una en este campo y tratar de desarrollar un programa sistemático de cubrimiento nacional sobre el tema.

Se concluyó de esta primera reunión que existía gran interés de todas las empresas (ISA, EPM, Corelca, ICEL, CVC, EEB) en desarrollar el programa y la decisión de manejarlo administrativamente a través de ISA y académicamente por la Universidad Nacional de Colombia.

De esta manera se creó en noviembre de 1988 el Grupo Nacional de Investigación en descargas eléctricas atmosféricas, como grupo de apoyo y asesoría del sector eléctrico colombiano. Como resultado, nació la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas, Recma.

8.1 Sistema LPATS

Interconexión Eléctrica S.A. ESP-ISA adquirió, en 1994, el sistema LPATS, el cual consta actualmente de seis sensores que se localizaron en los sitios mostrados en la figura 16; estos sitios se escogieron de acuerdo con las necesidades básicas para el adecuado funcionamiento de la red:

- Facilidad de comunicación para la transmisión de los datos suministrados desde los sitios de recepción de la señal (sensores o antenas receptoras) hasta el sitio donde se procesa la señal (*Center Analyzer Processor*).
- El sistema de sensores debía garantizar la mayor cobertura de la red de interconexión eléctrica nacional y futuras expansiones. Para ello la configuración ideal de la red, con respecto a la localización de los sensores, es

la de un pentágono regular en la cual se obtiene la máxima eficiencia en localización del sistema. Sin embargo, con la configuración actual de la red se presentan problemas en la localización, debido a que el sensor ubicado en Cerromatoso se encuentra alineado con los sensores de Sabanalarga y San Marcos.

En la tabla 20 se presentan los sitios de ubicación de los sensores. Las distancias entre los sensores se muestran la tabla 25, y la distribución de los mismos se muestra en la figura 16.

Tabla 20. Ubicación de los sensores LPATS en Colombia.

Sensor	Municipio	Coordenadas	Altura (msnm)
Sabanalarga	Sabanalarga (Atlántico)	N:10°39'00" W:74°54'14"	150
Cerromatoso	Montelibano (Córdoba)	N:07°56'25" W:75°29'18"	96
San Carlos	San Carlos (Antioquia)	N:06°12'51" W:74°48'41"	616
San Marcos	San Marcos (Valle del Cauca)	N:30°36'26" W:76°29'17"	992
Torca	Bogotá (Cundinamarca)	N:04°47'19" W:74°02'13"	2561
Los Palos	Bucaramanga (Santander)	N:07°10'19" W:73°08'02"	850

	S/C	Torca	Palos	S/L	C/M	S/M
S/C		198	229.5	492	204	360
Torca	198		292.5	667.5	397.5	318
Palos	229.5	292.5		433.5	282	567
S/L	492	667.5	433.5		306	823.5
C/M	204	397.5	282	306		517.5
S/M	360	318	567	823.5	517.5	

Nota: Las distancias están dadas en kilómetros (km). S/C: San Carlos, C/M: Cerromatoso S/L; Sabanalarga, S/M: San Marcos

8.2 Sistemas LLP, Empresas Públicas de Medellín y Universidad Nacional de Colombia

El sistema de medición y localizador» de descargas eléctricas atmosféricas adquirido en 1994 por Empresas Públicas de Medellín, EPM, cuenta con cuatro sensores (Troneras, Río Grande II, La Fe y Playas) localizados en el departamento de Antioquia.

El sensor TSS-420 de la Universidad Nacional, instalado en diciembre de 1990, se encuentra ubicado en predios de la Ciudad Universitaria de Bogotá y tiene un radio de cubrimiento de aproximadamente 185 km.

La tabla 21 presenta la ubicación de los sensores de tecnología LLP-DF, y la figura 16 su ubicación en Colombia.

Tabla 21. Ubicación de los sensores LLP - DF en Colombia.

Sensor	Latitud	Longitud	Alturas msnm
Troneras	6° 46'42"	75°15'7.3"	1809
Río Grande II	6° 30'16.2"	75°26'53.9"	2310
La Fe	6° 5'4 5.3"	75°29'28.6"	2192
Playas	6° 17'36.4"	74°56'24.2"	1015
TSS-420 U.N.	4° 38'28.2"	74°05'33.1"	2630

□

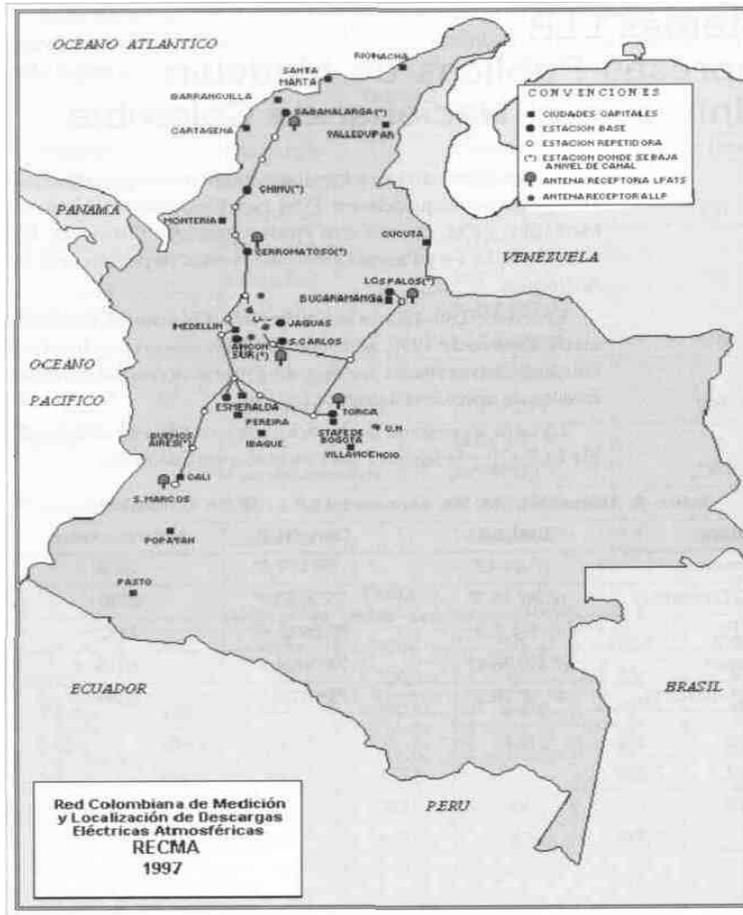


Figura 16

Figura 16 Red colombiana de localización y medición de descargas eléctricas atmosféricas, RECMA, situación de 1997.

8.3 Descripción de los sistemas de medición

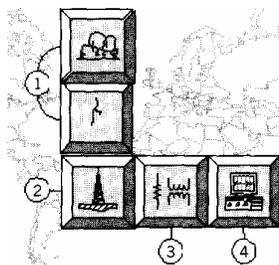


Figura 17. Componentes del sistema de medición directa.

Las estaciones de medición directa deben soportar la magnitud del

valor nominal de los parámetros del rayo, los cuales están ligados a su lugar de ubicación. Esto implica considerar las diferentes condiciones y variables propias de cada estación, puesto que podrían afectar valores o rangos de referencia de algunos instrumentos, para lo cual se prevé que no se alteren las características de funcionamiento cuando el fenómeno esté presente.

En la figura 17 se muestra la distribución de los equipos de adquisición (2) y de medida (3) y (4) del sistema de medición. Este sistema, además de contar con un medio propicio, nube de tormenta y canal de descarga (1), posee varios tipos de instrumentos, clasificados en: instrumentos receptores (2) como la antena de descarga ubicada generalmente en la punta de una torre; instrumentos ciegos (2) y (3) como la antena de descarga, la torre y los elementos de derivación como la resistencia Shunt, por ejemplo; instrumentos indicadores y registradores (4) como el osciloscopio o el oscilógrafo, según la tecnología aplicada; instrumentos transmisores (3) como los elementos de derivación Shunt o conductores de la señal al elemento registrador; instrumentos transductores, convertidores y controladores (3) como lo es a la vez el elemento de derivación. Además, suelen estar complementados con técnicas de fotografía y detección de campo eléctrico.

8.3.1 El canal de descarga

El canal es la región donde se dan las condiciones adecuadas para producirse la descarga. Una de las principales causas en la formación de las descargas eléctricas atmosféricas son las nubes de tormenta del tipo cúmulos y cumulonimbus ubicadas entre 1.6 y 13 km de la troposfera. Debido a que la medición de la corriente de descarga es realizada en la mayoría de los casos al nivel de la tierra, la corriente de la descarga de retorno se mide directamente en la base del canal.

En la figura 18 aparece el canal formado por descarga de retorno vertical propagado en la dirección del eje Z a una altura hN , que es la altura de la nube de tormenta y cuya sección transversal presenta un decrecimiento en el radio del canal en forma ascendente y concuerda con el decaimiento, también exponencial ascendente, de la carga depositada a lo largo del líder. La distancia D es la existente entre el canal de descarga y el punto de observación P ; h es la distancia que recorre la onda de corriente en un determinado tiempo ($h = vt$).

Amoruso *et al.* (1994) obtienen una ecuación para estimar la corriente de retorno del canal de descarga en función del tiempo:

$$I_0 = I(t, h=0) \sqrt{etm/t} e^{-tm/2t} \quad (1)$$

En la cual tm e I_0 denotan el tiempo de ascenso de la corriente y el pico de la misma. Esta fórmula permite visualizar el comportamiento transitorio de la corriente procedente de las descargas eléctricas atmosféricas.

Una forma simplificada de la corriente en la base del canal es:

$$I(s, h) = I(s, h=0) e^{-h[k + \sqrt{k^2 + (s/c)^2}]}$$

en donde experimentalmente Amoruso obtiene un valor para k de $2 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$, ecuación en la cual se puede variar la altura del canal hN y utilizar la constante de propagación de la onda:

$$\gamma_0 = s \sqrt{LC} = s \sqrt{L_0 C_0} = s/c' = 1$$

donde $s = j\omega$, y para $C = C$ (como la velocidad de la luz) se obtiene una frecuencia de propagación de 47 MHz. En la figura 19 se señala la variación de la corriente del canal con la altura del canal normalizada (hN)

$$I_c(s, h) = I_0(s, h=0) e^{-\gamma_0(z-h)}$$

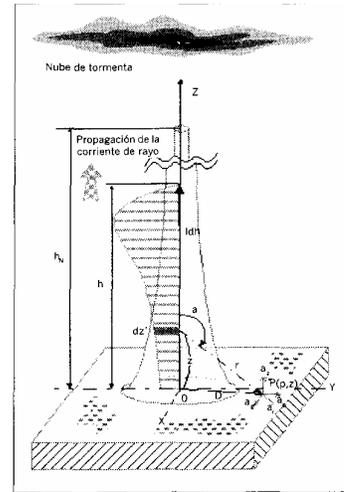


Figura 18 representación del canal de descarga como una línea de transmisión no uniforme a lo largo de línea del eje z de un sistema de

Cuando el canal de la descarga es alcanzado desde una estructura elevada, el punto de inicio de la propagación del rayo (en $t = 0$) es la punta de la estructura. La onda de la descarga se propaga, entonces, en forma ascendente a una velocidad v desde el punto de impacto hasta la nube de tormenta. Al mismo tiempo la corriente, con una polaridad opuesta, se propaga en forma descendente a la velocidad de la luz desde la punta de la estructura hasta la tierra. La corriente inyectada es reflejada a la tierra y nuevamente esta corriente es reflejada a la punta de la estructura, lo que indica un comportamiento del campo diferente en la punta y en la base de la estructura (figura 20).

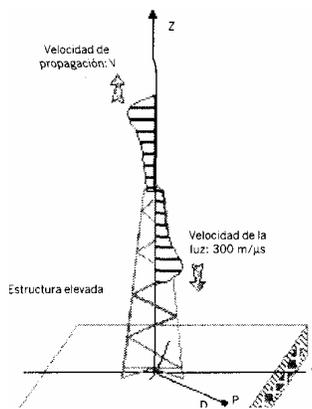


Figura 19 viaje de onda sin reflexión en la

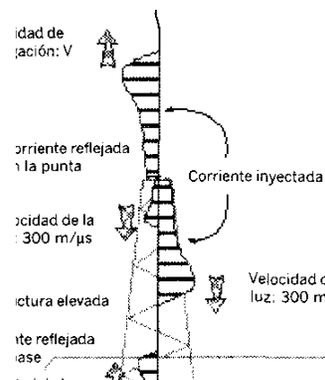


Figura 20 viaje de onda considerando la reflexión en la base

Existen diversos métodos para realizar los cálculos del campo electromagnético sobre una estructura vertical sobre la tierra. Uno de ellos es considerar que no hay ninguna estructura elevada y que la propagación de la corriente es en forma ascendente desde la tierra hasta la nube de descarga, como se muestra en la figura 18, considerando el punto del observador a nivel de tierra. Otra forma es considerar la propagación de la corriente a lo largo de la estructura, pero ignorando la reflexión de la corriente, como se ve en la figura 19. Finalmente, considerar las reflexiones de corriente en la base de la estructura, como aparece en la figura 20.

De este modo, con la configuración de las figuras 18, 19 y 20, utilizando el desarrollo propuesto por Motoyama *et al.* (1996), el estudio de radiación de

campos electromagnéticos a partir de desarrollos de las ecuaciones de Maxwell y la ley de Biot-Savart aplicadas a la distribución de cargas lineales en conductores, sabiendo que cualquier campo eléctrico radiado tiene la propiedad $\nabla \times E = 0$, que a su vez cualquier campo magnético radiado cumple con la propiedad

$\nabla \cdot B = 0$, se calcula la radiación del campo electromagnético debido a un pulso de corriente tipo paso en un elemento vertical y, por consiguiente, en su distribución lineal de carga.

La definición del campo eléctrico vertical en función de su escalar auxiliar de potencial estático (Φ) y de su potencial vectorial magnético variable en el tiempo (A), para el caso de una estructura verticalmente elevada en tierra está dado por:

$$E_z = E'_z + E''_z$$

$$H_\phi = H'_\phi + H''_\phi$$

Donde:

$$E'_z = Q' \left[\frac{(1 - \beta_1^2)}{\sqrt{(c_1 t - z)^2 + (1 - \beta_1^2) r^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right]$$

$$H'_\phi = (T/r) \left[\frac{(c_1 t + z)}{\sqrt{(c_1 t - z)^2 + (1 - \beta_1^2) r^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right]$$

$$E''_z = Q'' \left[\frac{(1 - \beta_1^2)}{\sqrt{(c_1 t + z)^2 + (1 - \beta_1^2) r^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right]$$

Con el análisis del campo electromagnético radiado se obtiene un radio de observación para el cual el valor del campo radiado que impacta en la punta de la estructura llegue directamente a tierra, radio para el cual se estimará un valor de la impedancia en el canal de la descarga.

8.4 Estación experimental de medición directa de rayos, Ilyapa

Durante los últimos diez años, la investigación colombiana ha estimado las magnitudes de los parámetros del rayo en zona tropical mediante resultados de mediciones indirectas a través de los sistemas colombianos de localización de descargas, LLS (por su sigla en inglés) (Torres *et al.*, 1996). En concordancia con los últimos resultados obtenidos por Torres y Williams (Torres, 1998,1997; Williams,1996) se llegó a la necesidad de complementar la caracterización del rayo en el trópico mediante la obtención de mediciones directas. En 1998 se inició el proyecto de investigación sobre este aspecto, denominado Ilyapa, el cual tiene tres objetivos principales:

1. Obtener, por medio de una torre instrumentada, mediciones directas de parámetros del rayo, con el fin de compararlos con los obtenidos mediante los LLS colombianos (Torres *et al.*, 1996). Los datos directos serán muy útiles para el ajuste de los LLS, mejorando así la confiabilidad de la información de descargas en zona tropical.
2. Comparar las magnitudes de parámetros del rayo en zona tropical con las reportadas para otras latitudes, con el fin de demostrar la hipótesis de variación espacio temporal de las magnitudes de los parámetros del rayo (Torres, 1998).
3. Introducir mejoras en los equipos eléctricos y electrónicos y sistemas de protección de los mismos, localizados en zona tropical, con el fin de lograr incrementos en la vida útil y reducir costos de reposición por fallas (Torres *et al.*, 1998).

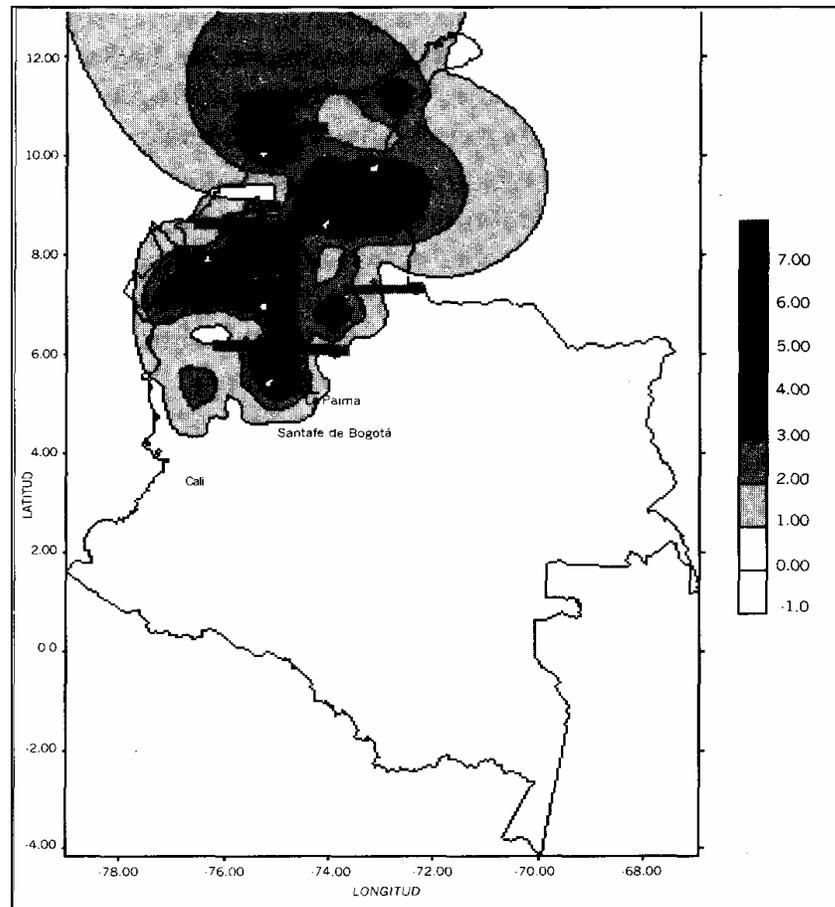
Diseño y construcción de la estación Ilyapa

8.4.1 Localización de la estación

La metodología para la localización de la estación se fundamentó en la hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo (Torres, 1998), tratando de encontrar un sitio que cumpliera los requerimientos de seguridad, facilidad de acceso y, principalmente, una alta densidad de descargas a tierra, DDT.

Con la información de descargas disponible para Colombia se elaboraron mapas de DDT. Como resultado, fueron identificadas tres grandes zonas de concentración de descargas eléctricas, que se pueden observar en la figura 21.

figura 21 mapa de DDT para colombia en 1996



Los mapas de DDT fueron sobrepuestos en mapas geográficos con información sobre regiones, pueblos, corregimientos, lugares, fincas, etc., en las zonas de mayor DDT.

Se encontró que las zonas de alta DRT coincidían con las zonas de mayor precipitación (en el trabajo de Torres *et al.*, 1994, se muestra una correlación del 44% entre actividad eléctrica atmosférica y datos de lluvias para la región andina), confirmando, de esta forma, que las zonas identificadas presentan una elevada actividad eléctrica atmosférica.

La información referente al comportamiento de los sistemas eléctricos para estas zonas mostró valores alrededor del 26% para el índice de fallas de transformadores de distribución y contadores de energía quemados (Cardona, 1998). Además, en conversaciones con moradores de las zonas se comentaban varias experiencias de falla de equipo eléctrico y electrónico durante las tormentas.

Finalmente, para la instalación definitiva de la estación fue seleccionado un sitio cercano al pueblo de Samaná (Caldas) con coordenadas Latitud: 5°26'36"N., Longitud: 74°56'12" W, Altitud: 1000 msnm, el cual cumplía con los requisitos predeterminados y DDT de 35 *strokes/km²-año*. Los otros dos sitios, pese a registrar valores de DDT superiores a los de Samaná, presentaban mayores dificultades para el acceso, que los hacían menos favorables para la instalación y mantenimiento de la estación.

8.4.2 Selección de la estación requerida

Como se discute en Anderson y Eriksson (1979), la altura de la estructura tiene una participación en el incremento de la presentación de descargas de tipo ascendente sobre las de tipo descendente. Considerando las diferentes características entre las descargas de tipo ascendente y descendente, la distribución estadística de corriente registrada en estructuras muy elevadas podría involucrar la mezcla de las dos poblaciones, introduciendo un sesgo en el análisis estadístico. Adicionalmente, las estructuras empleadas para transmisión de energía normalmente no superan los 60 metros.

Tomando en consideración lo anterior, se determinó instalar una torre instrumentada con una altura total por debajo de los 60 m, de forma que los parámetros registrados no conduzcan a sesgos estadísticos durante su análisis. Además, esta altura de la estructura permite su comparación con registros obtenidos en zonas templadas, como Italia o Suráfrica (Guerrieri *et al.*, 1998) o en zonas tropicales como Brasil (Cherchiglia *et al.*, 1998), en estructuras de alturas similares.

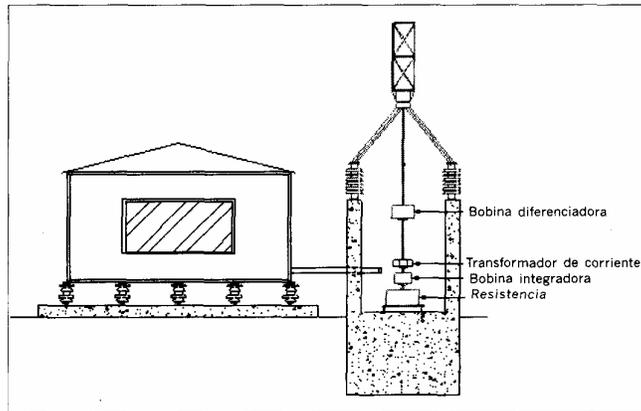
En lo referente al tipo de estructura más adecuado, se encontró que en el ámbito mundial existe una amplia variedad de torres instrumentadas empleadas para la captación y registro de la descarga (Guerrieri *et al.*, 1998). Sin embargo, la mayor parte de esas estructuras corresponde a torres para comunicaciones o difusión de televisión, a las cuales la incidencia de descargas orientó su empleo alterno para propósitos de investigación.

Para el proyecto inicial bautizado Ilyapa se eligió el uso de una torre venteadada de 30 m de altura y 60 cm de lado, empleando una base piramidal para la localización de los equipos sensores y remplazando una sección de los templetos de acero por aisladores poliméricos

En diciembre del año 2001 la torre fue trasladada a la población de Puerto Olaya en las instalaciones de la estación de bombeo de Sebastopol, de propiedad de la Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, y se aumentó su altura a 60 metros.

La figura 22 muestra el esquema de la estación. La altura total de la estructura, incluyendo la base y la punta tipo Franklin de terminación, es 65 m. La caseta de instrumentos, a la izquierda en la figura 16, se construyó aislada del piso para la seguridad de personas y equipos, así como para obtener señales sin distorsiones provenientes de tierra. Esta caseta es de construcción enteramente metálica y equivale a una jaula de Faraday.

Figura 22 esquema de la estación Ilyapa



La base de la torre se encuentra conectada a un tubo vertical de cobre de 3 m de altura, por el cual la corriente del rayo es evacuada a tierra. El tubo permite obtener una distribución simétrica del campo magnético. Adosados al tubo fueron colocados los sensores, que presentan un comportamiento basado en la detección del campo *magnético asociado a la comente del rayo*.

La configuración seleccionada para la base de la torre requería que en los sensores se evitaran las perturbaciones de tipo magnético causadas por objetos metálicos cerca del tubo que conduce la corriente del rayo a tierra. Con el fin de evitar dichas perturbaciones, se construyó una amplia base constituida por columnas de concreto y aisladores tipo poste. El área libre obtenida es de aproximadamente dos metros cuadrados alrededor del tubo de cobre. Los sensores seleccionados para registrar la señal de la descarga fueron: una bobina de Rogowski diferenciadora, una bobina de Rogowski autointegradora, una resistencia Shunt y un transformador de corriente comercial marca Pearson Electronic, modelo 1423.

8.5 Determinación de los parámetros de la estructura seleccionada

8.5.1 Impedancia al impulso de la torre

Para la determinación de este parámetro se llevó a cabo un ensayo de campo, consistente básicamente en la inyección de una señal conocida registrando, mediante un osciloscopio de 100 MHz de ancho de banda, la onda de

respuesta de la torre. La figura 23 muestra la respuesta medida en la torre, cuando se inyecta una onda tipo paso.

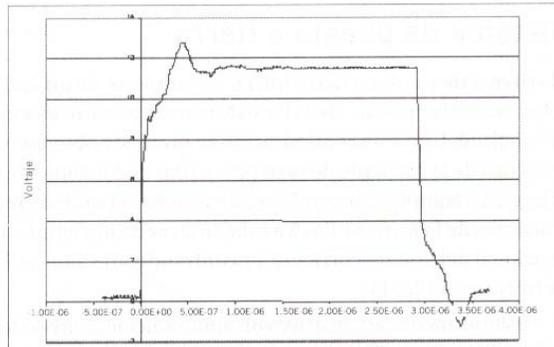


Figura 23

El análisis de la señal resultante lleva a la obtención de un valor de impedancia variable en función de la altura de la torre. Empleando para el análisis de la respuesta de la torre una simulación de varias impedancias en cascada, en el programa PSPICE 7.1 se encontró un valor de impedancia media al impulso para la torre alrededor de los 175 Ω , con una velocidad de propagación de la onda en la torre de 275 m/p, s. A modo de comparación, se realizó el cálculo teórico del valor de impedancia de la torre, para lo cual se utilizaron expresiones desarrolladas para estudiar el comportamiento de las líneas de transmisión ante descargas eléctricas atmosféricas (Jordán, Wagner-Hileman y Darveniza, Epri, 1982). Es evidente que éstas son fórmulas aproximadas y no consideran el movimiento real de la onda del rayo hacia tierra. La tabla 25 presenta los resultados de estas ecuaciones para la torre de la estación Ilyapa

Tabla 22. Impedancias de la torre de la estación Ilyapa para diferentes fórmulas.

Fórmula	Impedancia Ω
Jordán	208
Wagner-Hileman	175
Darveniza	270

A partir de las diferencias entre los resultados teóricos y experimentales, se destaca la importancia de realizar investigaciones que redunden en la

obtención de expresiones más adecuadas para el cálculo de este parámetro, que consideren el movimiento real de la descarga a través de una estructura metálica vertical.

8.5.2 Sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra inicial se compone de un anillo de conductor de cobre No. 2/0 alrededor de la base de la torre y cuatro electrodos de tres metros de longitud. Con esta configuración se pretende obtener una distribución homogénea de la corriente de rayo para evitar distorsiones de los campos magnéticos en los equipos sensores. Para determinar el valor de la puesta a tierra para el sistema de la torre, se llevó a cabo una medición empleando el método convencional del voltaje-corriente, encontrando un valor de 35Ω , para una señal de frecuencia 1275 Hz. Posteriormente se construyó un anillo adicional alrededor de la caseta y base de la torre, construido también en conductor No. 2/0 y con cuatro electrodos de seis metros de longitud. Adicionalmente se empleó suelo artificial alrededor de los electrodos. El valor final de resistencia obtenido fue de 8.2Ω .

8.5.3 Comportamiento de la torre cuando es golpeada por una descarga

Para estudiar esta respuesta de la torre y los equipos de medición se realizaron diversas simulaciones con métodos teóricos (Anderson; Epri, 1982 y Lattice) y métodos con modelos computacionales (SPICE y EMTP), inyectando ondas de impulso de corriente tipo 8/20 μs .

Los resultados muestran en todos los casos que la corriente que se espera medir en la parte más baja de la torre es similar a la onda incidente en magnitud y forma de onda.

También se observó un incremento en la pendiente en el frente de onda durante los primeros instantes de tiempo, debido al desplazamiento de la carga estática inicial en la torre al momento de la descarga. Las figuras 24 y 25

indican los resultados obtenidos con el método simplificado de los dos puntos y simulación en el EMTP para la corriente medida en la torre, respectivamente. Figura 24 onda incidente de (I_t) y teórica $iT(t)$ medidas en las torres, capturados por el método simplificado de los dos puntos.

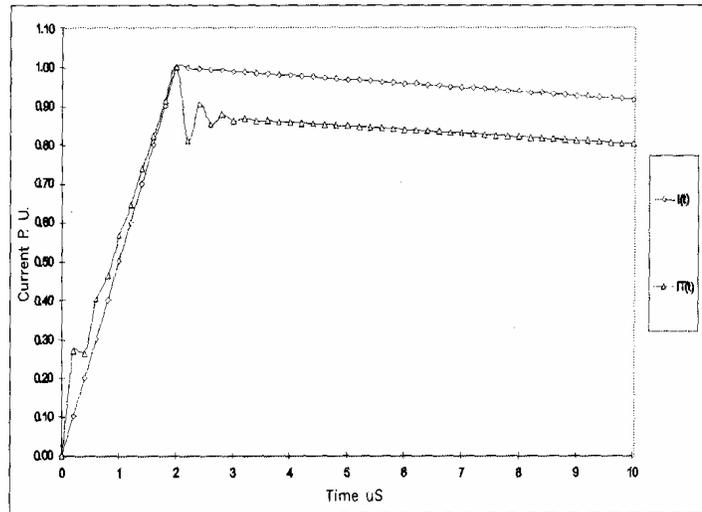


Figura 24

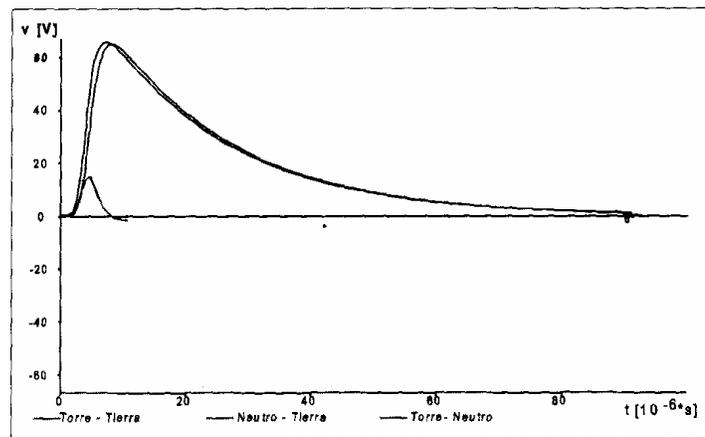


Figura 25

Número esperado de descargas a la torre

La incidencia promedio anual en una estructura localizada en un área con densidad de rayos a tierra de 1 rayo/ km²-año, viene dada por la expresión (Anderson y Eriksson,1979):

$$N_f = 0.04 \exp(0.015 H_s)$$

donde H_s es la altura de la estructura en metros. Para la torre venteadada de 35 m, esta magnitud resulta:

$$N_f = 0.04 \exp(0.015 * 35) = 0.07$$

Considerando una dependencia "lineal" entre N_f y DDT, y tomando una multiplicidad de dos strokes por rayo, para la zona seleccionada (la cual registra una DDT de 35 strokes/km²- año) el valor de N_f pasa a ser igual a 1.3 rayos por año.

Este número esperado de impactos a la torre es más susceptible de ocurrir durante los dos períodos lluviosos de la zona, que se presentan durante los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre. Para la estructura seleccionada, el radio de impacto está dado por (Anderson y Eriksson,1979):

$$R = 16.3 H_s^{0.61} \text{ (m)}$$

el cual resulta igual a 143 m para la estructura de 35 m. Este valor muestra una mínima incidencia de la altura de la torre en las características físicas del sitio de la estación; por esta razón no altera la actividad eléctrica atmosférica del mismo.

8.5.4 Diseño y construcción de los instrumentos de medida

El conocimiento de los parámetros del rayo (valor pico, tiempo de duración, forma de onda, polaridad y descargas subsecuentes) se obtiene a partir de mediciones directas o indirectas. En el primer caso, empleando torres instrumentadas o triggerai *lightning*. En el segundo, las estimaciones de varios

parámetros de la corriente del rayo se obtienen por medio de mediciones de campo eléctrico o de campo electromagnético, considerando algunas relaciones empíricas o modelos teóricos entre los campos medidos y la corriente del rayo.

En lo relativo a los parámetros de diseño, para obtener una medición confiable de los parámetros del rayo, se seleccionaron las siguientes magnitudes de referencia para los instrumentos:

Max. Amplitud pico de corriente: 400 kA

Max. Tasa de crecimiento de la corriente : 200 kA/s

Max. Integral de carga : $2 \times 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$

Mín. ancho de banda: 2 MHz

Max. Voltaje de salida: 200 V.

adicionalmente, y para obtener medidas redundantes, se adquirió un transformador de corriente de tipo comercial, el cual, como se presenta en Cherchiglia *et al.* (1998), posee características que lo hacen idóneo para ser empleado en este tipo de mediciones hasta un cierto ancho de banda.

8.6 Bobina de Rogowski

Las bobinas de Rogowski han sido empleadas generalmente cuando otros métodos no son convenientes. En la actualidad, son los instrumentos preferidos para la medición de corriente porque tienen características más convenientes que los transformadores de corriente y otros dispositivos con núcleo de hierro.

Con el propósito de medir la tasa de crecimiento de la corriente de rayo, se diseñó y construyó una bobina diferenciadora, y para medir la corriente pico se diseñó y construyó la bobina autointegradora, de acuerdo con lo presentado por Pellinen *et al.* (1980) y Baracaldo y Gutiérrez (1990).

Si una corriente variable I con el tiempo traspasa la bobina, su flujo Φ induce un voltaje en ella. La ecuación del circuito para la corriente producida por este voltaje U es:

$$\frac{1}{L} \frac{d\phi}{dt} = \frac{dI_c}{dt} + \frac{R}{L} I_c$$

donde:

(Φ) Flujo magnético que abraza los devanados

I_c Corriente en el devanado de la bobina

L Inductancia propia de la bobina

R Resistencia total de la bobina = $R_{CVR} + Z_s$

R_{CVR} Resistencia vista por la corriente

Z_s Resistencia de efecto piel

8.6.1 Bobina de Rogowski diferenciadora, BRD

La bobina debe ser configurada con una muy pequeña relación L/R en comparación con el ancho del impulso. Para esta configuración,

$$\frac{L}{R} \frac{dI_c}{dt} \ll I_c$$

En la ecuación (24), el voltaje de salida de la bobina resulta ser

$$R \cdot I_c = d\Phi/dt$$

Esta es una bobina diferenciadora dado que la corriente en la bobina es proporcional $d\Phi/dt$

Las ventajas de este sensor del $d\Phi/dt$ son una construcción sencilla y un alto voltaje de salida para una área dada de bobina.

La BRD, diseñada y construida para la medición de la tasa de crecimiento de la corriente del rayo, está enrollada a lo largo de un núcleo toroidal de material sintético de 1.5 mm de radio menor y 5 cm de radio mayor. El devanado de 20 vueltas fue construido con alambre de Nikrotal (Ni 80/Cr 20) de 0.2 mm de diámetro.

La BRD se montó en un soporte acrílico y está contenida en una caja de aluminio que la apantalla de campos dispersos indeseados. La figura 27 muestra la sección transversal de la BRD.

Para calcular el ancho de banda máximo de la BRD, fue simulado en el software PSPICE 7.1 un modelo que consideraba la inductancia mutua, la capacidad propia de la bobina y el cable coaxial. La figura 28 muestra los resultados de la simulación

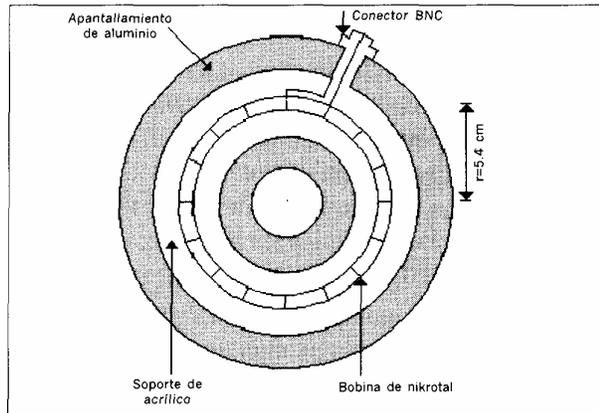


figura 27 seccion trasversal de la BRD

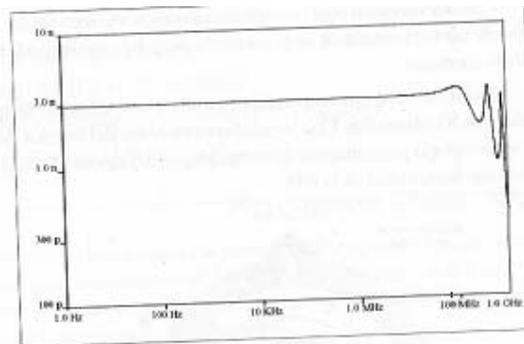


Figura 28

Los parámetros de la BRD construida son:

Autoinductancia de la bobina (L): 12 nH

Inductancia mutua (M): 0.6 nH

Coefficiente de transferencia (K): $0.6 \times 10^{-9} \text{ V/A-s}^{-1}$

8.6.2 Bobina de Rogowski integradora, BRI

Esta bobina debe ser configurada de forma que L/R sea mucho mayor que el ancho del pulso. En este tipo de configuración se nota de la ecuación (23) que:

$$\frac{L}{R} \frac{dI_c}{dt} \gg I_c$$

Por tanto
$$I_c \cong \frac{\phi}{L}$$

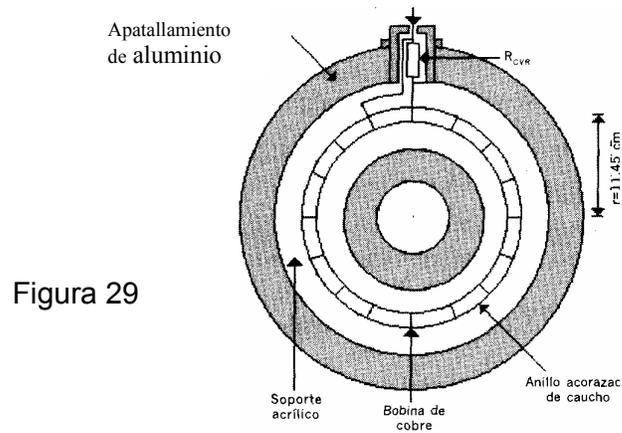
Esta es entonces una bobina autointegradora dado que la corriente en la bobina es proporcional a Φ por encima de $d\Phi/dt$.

La BRI es en esencia un arrollamiento toroidal de 120 vueltas conectado a una resistencia vista por la corriente o resistencia tubular (R_{CVR}). El devanado se construyó con alambre de cobre de 1 mm de diámetro, enrollado a lo largo de un anillo de caucho recubierto de 6.5 mm de radio menor y 11.45 cm de radio mayor. La resistencia tubular (R_{CVR}) se construyó empleando Nikrotal de 0.1 mm de espesor y 7 mm de diámetro extremo.

Considerando su buen comportamiento en alta frecuencia, la BRI se eligió para medir tanto la amplitud de la corriente pico del rayo como la tasa de crecimiento de la corriente.

La BRI se encuentra contenida en una caja metálica que la apantalla de campos dispersos indeseados. Una hendidura alrededor del interior de la cubierta metálica previene la presentación de corto circuito del devanado. La figura 29 muestra la sección transversal de la BRI.

Conector BNC



Para el cálculo del límite inferior del ancho de banda se simuló un modelo de la bobina en el PSPICE 7.1, de acuerdo con Schwab, 1972. La figura 30 muestra los resultados de la simulación.

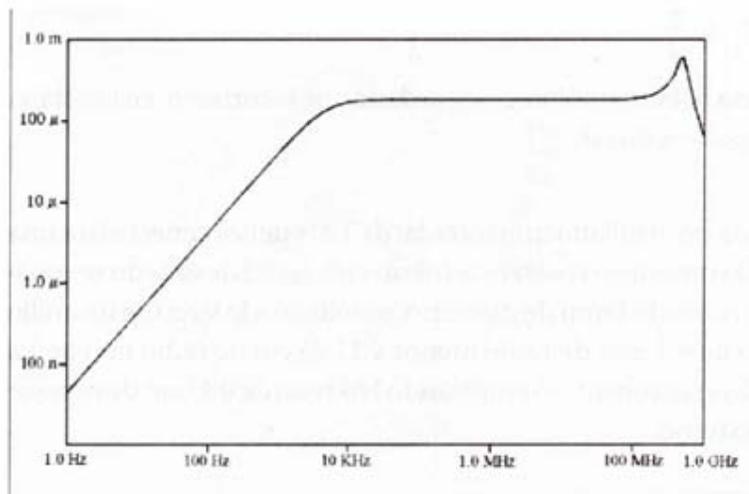


Figura 30: Simulación de la impedancia vs frecuencia de la IRC

Los parámetros de la IRC construida son:

Autoinductancia de la bobina (L): 4.35 mH

Resistencia de efecto piel a 50 kHz (Z_s): 0.0928 Ω

Resistencia de impedancia vista por la corriente (R_{CVR}): 0.0280 Ω

Coefficiente de transferencia (K): 1.834×10^{-4} V/A

8.7 Resistencia Shunt, RS

Debido a su comportamiento lineal desde DC hasta altas frecuencias, la resistencia Shunt, RS, se escogió para la medición de los siguientes parámetros del rayo:

amplitud de corriente pico, tasa de crecimiento de la corriente de rayo, forma de onda de la corriente de la descarga e integral de carga.

La resistencia consiste básicamente en un cilindro de Nikrotal, con 22.5 cm de radio, 19.5 cm de altura y espesor de 0.29 mm. Los extremos del cilindro se encuentran soldados a dos discos de bronce fosfatado de 22.5 cm de radio y 1 cm de espesor. El cilindro de Nikrotal se encuentra soportado por medio de un anillo interno de concreto refractario y cubierto en su parte exterior por dos láminas de asbesto. La figura 31 muestra el diagrama esquemático de la RS. Con esta configuración, una integral de carga de $2 \cdot 10^8 \text{A}^2\text{-s}$, elevaría la temperatura de la parte activa hasta en 350°C .

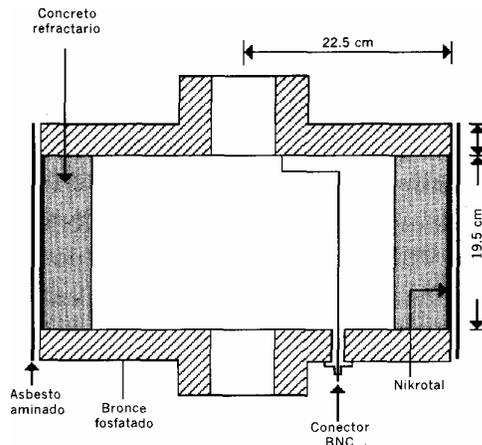


Figura 31. sección transversal de la BRI

Para calcular el ancho de banda de la RS, nuevamente se empleó una simulación de un modelo en el programa PSPICE 7.1, de acuerdo con Schwab, 1972. La figura 32 presenta los resultados de la simulación para la RS.

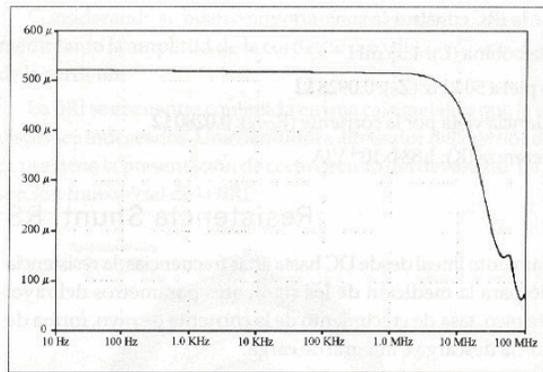


Figura 32. simulación de impedancia vs frecuencia de la RS

Los parámetros de la RS construida son:

Resistencia R : $521 \times 10^{-6} \Omega$

Ancho de banda: 15 MHz

Coefficiente de transferencia (K): $521E-6 \text{ V/A}$

Como las bobinas de Rogowski y la resistencia Shunt son lineales, ellas pueden ser calibradas para cualquier magnitud conveniente de corriente, y la calibración será apropiada para todas las magnitudes de corriente, incluidas las muy grandes. La determinación de los coeficientes de transferencia para cada bobina de Rogowski fue realizada mediante la aplicación en laboratorio de ondas de impulso de corriente tipo 4/10 μs , con amplitudes varias hasta 60 kA. En este caso se tomó como resistencia patrón la resistencia Shunt del generador de impulso de corriente (Haefelly) del Laboratorio de alta tensión de la Universidad Nacional de Colombia, la cual fue calibrada de acuerdo con NIST de Estados Unidos.

El valor de resistencia (R) obtenido para la RS fue determinado por diferentes métodos de voltaje corriente, con equipos de error menor que el 0.5%.

El transformador de corriente adquirido tiene las siguientes características:

máxima corriente pico de 500 kA, ancho de banda de 1.2 MHz y coeficiente de transferencia de 0.001 V/A.

CONCLUSIONES

En la investigación se describen de manera amplia y precisa de los riesgos que involucran el no tener un buen equipo de protección contra descargas eléctricas atmosféricas en las redes de alta, media y baja tensión.

Es muy importante para Colombia poder contar con un mapa ceráuneo que nos muestre la actividad de los rayos en el país, ya que al estar ubicados en una zona con tanta actividad eléctrica de la atmósfera, se deben hacer muchas consideraciones de seguridad en las redes de alta, media y baja tensión.

Es muy bueno para el país que se cuente con una normativa sobre las investigaciones de las protecciones contra las descargas eléctricas atmosféricas en Colombia, lo cual nos deja como uno de los pioneros en las investigaciones sobre las descargas eléctricas.

Es muy importante contar en Colombia con la R.E.C.M.A y el Grupo P.A.A.S, donde la R.E.C.M.A tiene como papel fundamental, la medición de los parámetros de los rayos y la P.A.A.S se encarga del posterior estudio y análisis de los datos. Esto es muy importante tenerlo presente ya que nos permite ver la relación tan estrecha que existe entre ambos.

Por último cabe anotar lo importante que sería crear un grupo de investigación sobre las “**descargas eléctricas atmosféricas**” en Cartagena, el cual fuese liderado por U.T.B. Ya que actualmente en nuestra ciudad no existe un grupo de este tipo, que se encargue de investigar la manera como se comporta el rayo en nuestra región.

BIBLIOGRAFÍA

TORRES SANCHEZ, Horacio. El Rayo mitos, leyendas, ciencia y tecnología. Bogotá. Unibiblos, 2002

ARTEGA, G y otros. " Estudios analítico y estadístico del comportamiento ante descargas atmosféricas de líneas de transmisión a 220 kV en Colombia" Proyecto de grado U. Nacional. Director: ING. Antonio Mejía Umaña. 1982.

MEJIA UMAÑA ANTONIO. "Características de las descargas Atmosféricas sobre las líneas de transmisión". Boletines Técnicos GAMMA". Primera Edición, Octubre de 1988.

Universidad Nacional de Colombia. Mapa Isocerámico. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1979.

ANSI C2-1984. National Electrical Safety Code. New York, IEEE, 1987, 399 p.

IEC 71-2. Insulation Coordination. Application Guide. 1996.

Leuven - EMTP Center. "Alternative Transients Program Rule Book". Version ATP5. 1991.

CASTILLO, G. y Otros." Metodología de diseño de aislamiento por descargas atmosféricas en líneas de transmisión". Proyecto de grado U. Nacional, 1981, Director: Ing. Antonio Mejía Umaña.

<http://www.eppm.com>

<http://jaibana.udea.edu.co/programas/electricas/altatension/informeDEAT>

<http://www.isa.com.co>

<http://www.paas.unal.edu.co>