

Normas técnicas sobre protección contra rayos y sus aplicaciones

Introducción

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.

Normas nacionales sobre protección contra rayos

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.

Tabla 1.
Normas nacionales sobre protección contra rayos.

País	Documento fuente	Parámetro
Australia	AS 1768-1991	NC
Gran Bretaña	BS 6651-1992	DDT
Canadá	ANSI/NFPA 780-1992	NC
Colombia	NTC-4552 - 1999	NC y DDT
Finlandia	SFS-handbook 33	ALS
Francia	UTE C15-531- 1986	NCD
Alemania	DIN 57185/VDE 0185-1983	NC
Italia	CEI 81-1 - 1990	DDT
Kenya	KS 04-503; Parte 1:1990	NC
Holanda	NEN 1014-1991	NC
Nueva Zelanda	NZS/AS 1768-1991	NC
Polonia	PN-55/E-05003	NC
Singapur	CP33-1985	NC
Sudafrica	SABS 03-1985	DDT
Suecia	SS487 01 10 - 1978	NC
USA	IEEE C62.41 - 1991	NC
USA	ANSI/NFPA 780 - 1992	NC

Notas:

NC: Días tormentosos-año (nivel ceráunico)

NCD: Días tormentosos por departamento

ALS: *Average annual lightning strikes* (Promedio anual de impactos de rayo)

GFD: Densidad de descargas a tierra

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.

Objeto 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.

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.

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 1 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.

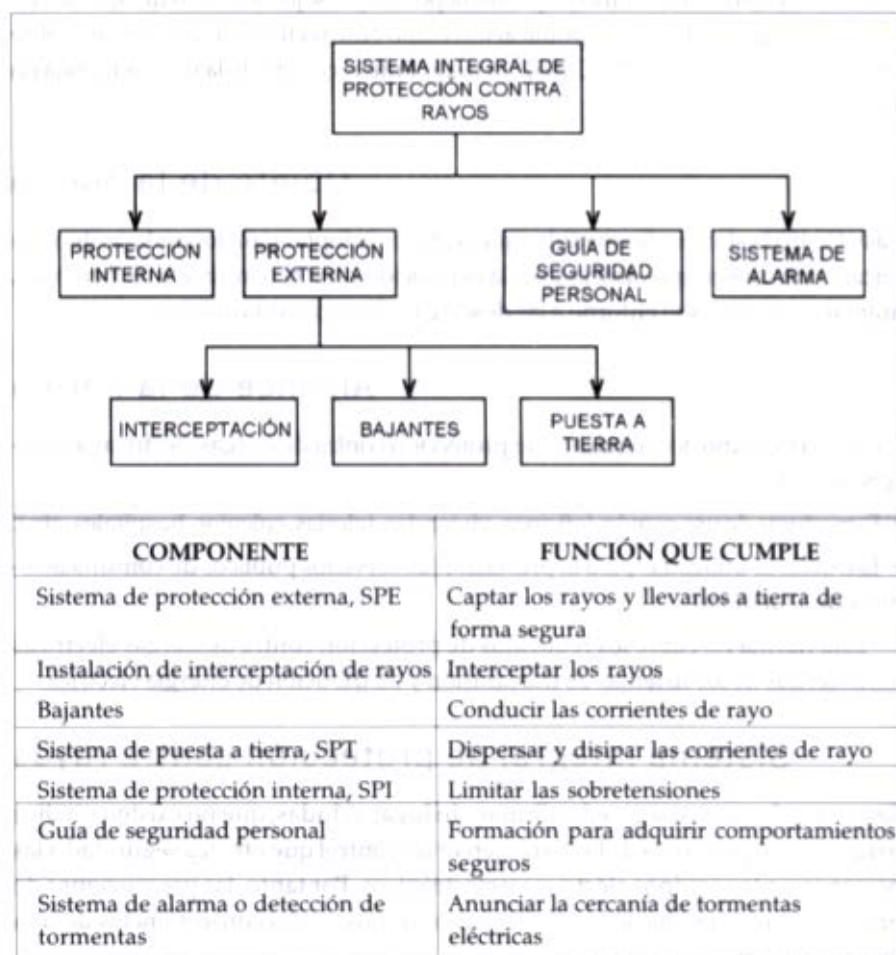


Figura 1. Elementos del sistema de protección contra rayos y la función que cumplen.

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 lineamientos generales para establecer las protecciones internas de equipo eléctrico y electrónico, susceptibles de daños por rayos.

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:

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

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 km^2 ($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$) o menos, teniendo en cuenta la exactitud en la localización (*location accuracy*) y la exactitud en la estimación de la corriente pico de retorno (*lightning peak current 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 2.
Valores del índice relacionado con el uso de la estructura.

Índice de riesgo por rayos				
Densidad de descargas a tierra [Descargas/km ² - año]	Corriente pico absoluta promedio [kA]			
		40 I _{abs}	20 I _{abs} < 40	I _{abs} < 20
	RI _{abs} R _{DDT}	1	0.65	0.30
30 DDT	1	1.000	0.895	0.790
15 DDT < 30	0.75	0.825	0.720	0.615
5 DDT < 15	0.50	0.650	0.545	0.440
DDT < 5	0.25	0.475	0.370	0.265

Severas
 Altas
 Moderadas
 Bajas

Clasificación de estructuras	Uso de la estructura	Valor del índice
Estructuras de uso común	Teatros, colegios, escuelas, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas, hospitales, prisiones, ancianatos, jardines infantiles, guarderías, hoteles	40
	Oficinas y viviendas de tipo urbano y rural	30
	Bancos, compañías aseguradoras, industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20
Estructuras utilizadas para la prestación de servicios públicos	Estructuras de comunicaciones, instalaciones para acueducto	10

Tabla 3.
Valores del índice relacionado con el tipo de estructura.

Tipo de estructura	Valor del índice
No metálica	40
Mixta	20
Metálica	0

Tabla 4.
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

Nota: El ingeniero encargado de la evaluación del factor de riesgo para protección contra rayos debe tomar en consideración la influencia de estructuras adyacentes o cercanas a la evaluada.

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 2, 3 y 4, 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 5.

Tabla 5.
Niveles 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					
Altos					
Moderados					
Bajos					

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. Apantallamientos 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.

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 A_E mediante la fórmula:

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

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

- Se evalúa el número de rayos por año N_C , 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 $\varepsilon = 1 - \frac{N_C}{N_d}$
- Se escoge el nivel de protección, de acuerdo con la tabla 6.

Tabla 6.
Nivel de protección.

Eficiencia	Nivel de protección
0.98	I
0.95	II
0.90	III
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.

La Norma Británica Bs 6651-1992

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:

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

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 .

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 7).

Tabla 7.
Relación entre nivel ceráuneo y densidad de rayos a tierra según BS 6651-1992.

Nivel ceráuneo	Rayos (<i>flashes</i>) 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

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.

Área efectiva del conjunto

Está dada por la fórmula:

$$A_E = A_S + C_{SG} + C_{AS} + C_{MP} + C_{DE}$$

donde:

A_S : Área de planta de la estructura (m^2)

C_{SG} : Área conjunta de la tierra (*ground*) alrededor (m^2)

C_{AS} : Área conjunta de estructuras adyacentes asociadas y sus respectivas tierras (m^2)

C_{MP} : Área conjunta de las entradas y salidas de la(s) alimentación(es) de energía (m^2)

C_{DE} : Área conjunta de redes de datos llevando la tierra de referencia de la edificación (m^2)

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 8, 9 y 10.

Tabla 8.
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 9.
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 10.
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

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 entien- de 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.

Protección para niveles de exposición

La Norma BS 6651-1992 da una clasificación de cuatro tipos de instalaciones basa- da en los efectos de daño a los contenidos de esa instalación. Esta clasificación se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. 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 12.

Tabla 12. 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

Evaluación de normas mediante aplicación a casos reales

A continuación se presentan tres casos reales de aplicación con los siguientes objetivos:

- Establecer la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura, mediante la aplicación de las normas IEC 61024, BS 6551-1992, NFPA 780 y NTC 4552.
- Hacer un análisis comparativo de las normas internacionales, y determinar su aplicabilidad en un país, como Colombia, con diferentes parámetros de incidencia de rayos a los estimados en los países de origen.
- Hacer un análisis global de las sobretensiones que pueden aparecer en la estructura por un impacto directo e indirecto del rayo.

Caso 1: Cine Domo Maloka

Características técnicas:

<i>Nombre</i>	CINE DOMO MALOKA
<i>Localización</i>	Bogotá - Colombia
<i>Ubicación geográfica</i>	74°49' Longitud O 4°36' Latitud N
<i>Uso de la estructura</i>	Proyección de películas educativas
<i>Capacidad</i>	320 personas
<i>Área de la estructura</i>	804 m ²
<i>Altura de la estructura</i>	18 m
<i>Estructura</i>	Aluminio - concreto

Aplicación de la Norma NTC 4552

Evaluación de la necesidad de un sistema de protección contra rayos

Determinación de la densidad de rayos a tierra

Para determinar el valor de densidad de descargas a tierra se tomaron los datos proporcionados por el sistema de medición y localización de rayos TSS420 del programa PAAS-UN, encontrándose un valor promedio multianual de 2 rayos por km²-año.

Determinación de la corriente pico absoluta promedio

La determinación de esta variable se hizo utilizando la distribución de frecuencia acumulada de amplitudes de corriente de rayo según el comité Cigre, 1979.

De acuerdo con resultados de investigaciones se ha planteado la hipótesis de que en países tropicales, como Colombia, se pueden esperar valores de parámetros de rayo superiores a los de otras latitudes. Es por ello que en Colombia se recomienda utilizar para diseños de protección contra rayos, valores de parámetros de rayo con baja probabilidad de ser superados.

Teniendo en cuenta la recomendación de la norma, se hizo un análisis para diferentes valores de probabilidad de corriente pico, buscando encontrar un rango de valores para el riesgo, entre un 20 y un 50% de probabilidad.

Probabilidad	Corriente pico (kA)
50%	30 kA
20%	50 kA

Determinación del índice de riesgo por rayos

Valores del índice relacionado con el uso de la estructura: por el uso que se le da a la estructura en estudio se le asignó el valor máximo (40), que corresponde a una estructura de uso común en donde puede haber un gran número de personas.

Valores del índice relacionado con el tipo de estructura: por el material con el cual está construida la estructura (aluminio y concreto), la clasificamos como mixta, que tiene un valor asignado de (20).

Valores del índice relacionado con la altura y el área de la estructura: teniendo en cuenta la altura y el área de la estructura en estudio:

Área:	780 m ²
Altura:	15.75 m

se le da a este índice el valor mínimo (5).

Sumando los índices relacionados con la estructura, se obtiene la gravedad que se puede presentar en la estructura.

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

Teniendo el nivel debido a los parámetros del rayo y el nivel de gravedad debido a las características de la estructura, se establece el factor de riesgo en la matriz del factor de riesgo:

Parámetros	Gravedad				
	Severa	Alta	Moderada	Baja	Leve
Severos					
Alto					
Moderado					
Bajo					

Alto
 Medio
 Bajo

Según la Norma técnica colombiana NTC-4552, para un factor de riesgo medio se debe instalar protección externa y protección interna.

Aplicación de la Norma NFPA 780

Esta guía de evaluación de riesgo fue preparada para ayudar en el análisis de varios criterios que determinan el riesgo de pérdidas debido a rayos. Con esta guía es imposible que se cubran todos los elementos que puedan hacer a la estructura más o menos susceptible a los daños por rayos. En casos especiales, las personas y los factores económicos pueden ser importantes y podrían ser considerados para la evaluación obtenida por esta guía.

Determinación del riesgo

El índice de riesgo R está clasificado en las siguientes categorías:

Tabla 13.
Índice de riesgo R .

Valor de R	Valor del riesgo
0 - 2	Bajo
2 - 3	Bajo a moderado
3 - 4	Moderado
4 - 7	Moderado a severo
Superior a 7	Severo

en donde el valor de R se calcula a partir de la siguiente forma:

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

Aplicación de la norma NFPA a la estructura en estudio

- Índice A: Tipo de estructura. Se refiere al uso para el que está destinada la estructura. Lugares de congregación pública, como colegios, iglesias, teatros, estadios. *Valor: 9.*
- Índice B: Tipo de construcción. Se refiere al material con el cual está construida la estructura. Estructura de concreto con techo de material metálico eléctricamente continuo. *Valor: 1.*
- Índice C: Ubicación relativa. Se refiere a las características de las estructuras alrededor de la estructura en estudio. Estructuras menores de 929 m², en áreas donde existen estructuras de mayor altitud alrededor. *Valor: 1.*
- Índice D: Topografía. Estructura ubicada en terreno plano. *Valor: 1.*
- Índice E: Ocupación y contenido de la estructura. Estructura ocupada por un número mayor a 50 personas. *Valor: 6.*
- Índice F: Frecuencia de rayos-nivel ceráuneo. Se asocia un valor a este índice dependiendo del nivel ceráuneo en el área de la estructura.
- Nivel ceráuneo promedio multianual en la ciudad de Bogotá: 80 (superior a 70). *Valor: 1.*

Evaluación del riesgo

$$R = \frac{9+1+1+1+6}{1} = 18$$

El riesgo determinado por ser superior a 7 es clasificado como severo. Esta norma no relaciona la protección que se debe utilizar para ningún riesgo, es decir, no utiliza la evaluación del riesgo para diseñar el sistema de protección que hay que utilizar.

Aplicación de la Norma IEC 61024-1-1

Frecuencia admitida de descargas a la estructura N_c

Se tiene en cuenta el número de personas que pueden encontrarse en la estructura por evaluar (3000 personas), el valor de los equipos que pueden haber en la estructura y los valores medidos de la densidad de rayos a tierra en la ciudad de Bogotá (2 rayos por $\text{km}^2\text{-año}$). Se asume un valor proporcional al área de la estructura, ya que de esta manera se está dando un valor crítico para N_c , que exige la protección de vidas humanas y bienes, dando obvia ponderación a las primeras.

$$N_c = 2 (\text{rayos por km}^2\text{-año}) * 7.06 * 10^4 (\text{km}^2) = 1.4 * 10^3 \text{ rayos-año}$$

Aproximando a los datos de las curvas, se escoge un valor de $N_c = 10^3$ rayos por año.

Frecuencia esperada de rayos directos a la estructura (N_d)

La frecuencia de rayos directos a la estructura puede ser evaluada por:

$$N_d = N_g * A_E * 10^6 \text{ por año}$$

en donde N_g es la densidad de rayos a tierra en la región donde la estructura está ubicada, expresada en rayos por $\text{km}^2\text{-año}$.

A_E es el área equivalente en m^2 .

El área equivalente es el área de la superficie de tierra, la cual tiene la misma densidad de rayos que la estructura en consideración.

Las estructuras cercanas son importantes en la determinación del área equivalente si la distancia a la estructura es menor que $3 * (h + h_s)$, donde h es la altura de la estructura en consideración y h_s es la altura de la estructura cercana.

En este caso, el área equivalente de la estructura en consideración y de la estructura cercana se superpone una con la otra. El área equivalente A_e de la estructura bajo consideración es reducida en una distancia igual a:

$$R = \frac{d + 3 * (h_s - h)}{2}$$

donde d es la distancia horizontal entre la estructura bajo consideración y la estructura cercana a ella.

En la tabla 14 se listan las estructuras tenidas en cuenta como estructuras adyacentes por estar a una distancia menor de $3 * (h + h_s)$

Tabla 14.

Estructura	Distancia	Altura	Xs
Conjunto residencial 1	24 m	25.2 m	Xs1 = 26.35 m
Conjunto residencial 2	69 m	26 m	Xs2 = 51.49 m
Prisma	73 m	14.7 m	Xs3 = 34.64 m
Torre de iluminación	12 m	20 m	Xs4 = 12.45 m
Asta de banderas	25 m	19 m	Xs5 = 17.45 m



Figura 2. Determinación del área equivalente.

En la figura 2 se presenta gráficamente el cálculo del área equivalente.

$$A_E = 2700 \text{ m}^2$$

$$N_d = 2 (\text{rayos por km}^2 \cdot \text{año}) * 2700 \text{ m}^2 * 10^{-6} = 5.4 * 10^{-3} \text{ rayos por año.}$$

Al comparar la frecuencia esperada de rayos directos a la estructura N_d , con la frecuencia admitida de descargas a la estructura N_c se ve que el valor de $N_d > N_c$; por tanto, según la Norma IEC 61024-1-1, se necesita un sistema de protección de una eficiencia:

$$\epsilon \geq 1 - N_c / N_d \geq 81.48\%$$

De acuerdo con la tabla 6 del sistema de protección contra rayos en función de N_c y N_d , el nivel de protección acorde al valor de eficiencia calculado corresponde al nivel IV.

El propósito de selección de un nivel de protección es reducir por debajo del máximo nivel tolerable el riesgo de daño por una descarga directa a una estructura.

Aplicación de la Norma BS-6651-1992

Determinación del área efectiva

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

A_S : Área de la planta de la estructura = 774 m²

C_{SG} : Área conjunta de la tierra. Para este caso se calculó, tomando en cuenta una resistencia del suelo de 100 Ω /m. Para que no existiera un acople resistivo que pudiera ser nocivo por efectos de descargas indirectas, se tomó una distancia D de 100 m. El área de la tierra conjunta es = 31,416 m².

C_{AS} : Área conjunta de estructuras adyacentes asociadas y sus respectivas tierras. La estructura en consideración no tiene conexiones eléctricas, con estructuras adyacentes exteriores. Bajo esta premisa el área conjunta de estructuras adyacentes es = 0 m².

C_{MP} : Área conjunta de las entradas y salidas de la alimentación de energía. La alimentación de la estructura está separada de la misma por una distancia de 70 m. El área conjunta de las entradas y salidas de alimentación se calcula de la siguiente forma: 70 m * 2 * 100 m = 14,000 m².

C_{DL} : Área conjunta de redes de datos llevando la tierra de referencia de la edificación.

A la edificación no llegan redes de datos del exterior; por tanto el área conjunta de redes de datos es = 0 m².

El área equivalente es:

$$\begin{aligned} A_E &= (774 + 31,416 + 0 + 14,000 + 0) \text{ m}^2 \\ &= 46,190 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Determinación de la probabilidad de impacto, p

$$P = A_E * N_g * 10^{-6}$$

$$P = 46,190 \text{ m}^2 * 2 (\text{rayos por km}^2\text{-año}) * 10^{-6}$$

$$P = 0.092 \text{ rayos - año}$$

Índice F. Tipo de estructura.

Edificios con protección contra rayos y unión equipotencial según BS 6651-1992.

Índice F: 1

Índice G. Grado de aislamiento.

Estructura localizada en una gran área de estructuras o árboles de igual o mayor altura (por ejemplo en una gran ciudad o en un bosque)

Índice G: 0.4

Índice H. Tipo de terreno.

Plano a cualquier nivel.

Índice H: 0.3

Determinación del riesgo total

Como se había mencionado, el riesgo total se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = P * F * G * H$$

$$R = 0.092 * 1 * 0.4 * 0.3 = 0.011$$

Clasificación de pérdidas

Cabe anotar que la evaluación del riesgo para el diseño de un sistema de protección interno tiene en cuenta daños y pérdidas sobre equipos eléctricos y electrónicos que pueden tener un alto costo económico, dejando en segundo plano la protección de vidas humanas, ya que este factor es cubierto con la evaluación de riesgo para el diseño de la protección externa.

Teniendo en cuenta el valor de los equipos dentro de la estructura, clasificamos las pérdidas en la categoría de 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. Esta categoría tiene índice asignado de 2.

De acuerdo con los valores para el nivel de exposición y la clasificación de pérdidas, se puede determinar el 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

La decisión de proveer protección debe tener presente los efectos de daño en equipos eléctricos y electrónicos importantes. El costo de la no operación del sistema perjudicado debe compararse con el costo de la protección y prevención.

Evaluación de las sobretensiones

El Cine Domo del centro Maloka presenta diversas características por las cuales el efecto de las posibles sobretensiones originadas por descargas directas o indirectas no es tan alto.

Estas características son:

- Disposición física de la instalación eléctrica: toda la instalación eléctrica en Maloka es llevada a través de bandejas. De esta manera se evita la formación de bucles o lazos cerrados entre cables de suministro de energía y cables de control del sistema de proyección (sonido, imágenes, iluminación).
- El Cine Domo cuenta con un sistema de puesta a tierra al cual está conectada su estructura.
- El Cine Domo es una estructura metálica cerrada conectada a tierra. Estas características son propias de una jaula de Faraday en la cual todo lo que esté en su interior va a estar protegido contra efectos causados por campos electromagnéticos producidos por descargas eléctricas atmosféricas.

Sobretensiones debido a descargas eléctricas indirectas

Las sobretensiones transitorias inducidas por acoples magnéticos causados por impactos de rayos cercanos pueden ser estimadas mediante la siguiente ecuación:

$$U = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{di_L}{dt} \cdot l \cdot \ln \frac{d+b}{d}$$

A manera de ejemplo, se calculan a continuación las sobretensiones para un lazo cerrado que se crea entre los cables de control del sistema de audio, según la figura 3:

$$U = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} [V \cdot s / A \cdot m]}{2\pi} \cdot 10 [kA / \mu s] \cdot 2 [m] \cdot \ln \frac{15+10}{15}$$

$$U = 2.04 kV$$

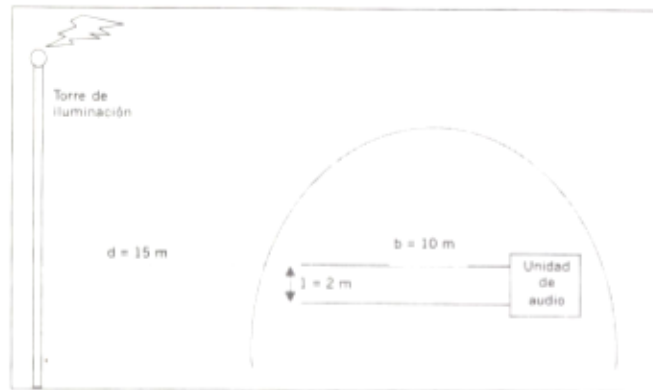


Figura 3.

Sobretensiones debido a descargas eléctricas directas

Las sobretensiones debido a descargas directas sobre la estructura son despreciables, ya que por la propiedad de jaula de Faraday que tiene el Cine Domo hay un mayor número de bajantes que anulan las componentes de campo magnético causante de las sobretensiones en los lazos cerrados.

Evaluación del sistema de protección

Debido a que la NTC 4552 está en proceso de desarrollar lo correspondiente a protecciones internas, para la evaluación del sistema de protección interna del Cine Domo se utilizó la norma ANSI-IEEE C62.41 con el fin de complementar este estudio, en lo referente a áreas de protección.

El IEEE ha cotejado extensas investigaciones de sobretensiones causadas por rayos, y en su edición IEEE C62.41-1991¹ considera que:

- El caso típico más desfavorable (*typical worst case*) presentará un SVT de 6,000 voltios dentro de un sistema de distribución en un edificio.
- En subestaciones dentro de un edificio, las corrientes de rayo no serán mayores de 10,000 amperios.

El caso más desfavorable de transitorios para redes de comunicación de datos, señales y telefonía es menos fácil de cuantificar. Sin embargo, basado en las recomendaciones de la CCITT, el peor caso presentará 5000 voltios y cientos de amperios.

En puntos anteriores se desarrolló la evaluación del factor riesgo de acuerdo con la Norma NTC-4552, dando como resultado para la estructura bajo consideración un nivel *alto*, para el cual –dice la norma– es necesario la instalación de protección externa y de protección interna.

1 "Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltages AC Power Circuits", February 1991.

Protección externa

Sistema de interceptación de rayos

Tiene la función de interceptar los rayos que pueden impactar en cercanías o directamente a la estructura. Los dispositivos de interceptación de rayos deben ser varillas sólidas tubulares en forma de bayoneta, con una altura por encima de las partes altas de la estructura no menor a 0.25 m para intervalos máximos de 6 m entre puntas. La estructura bajo consideración no posee en la actualidad un sistema de interceptación contra rayos, por razones que tienen que ver con la conservación del diseño arquitectónico de la estructura. Al no tener una protección externa de este tipo, es necesaria una robusta protección interna.

Bajantes

El objeto de las bajantes es derivar la corriente del rayo que incide sobre la estructura e impacta en las puntas de captación. La estructura bajo consideración, debido a la forma semiesférica y al material en el que está construida (aluminio), ofrece múltiples caminos a la corriente, en el caso de un impacto directo a la estructura.

Sistema de puesta a tierra

El sistema total de puesta a tierra es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos que contribuye a la seguridad de personal y de los equipos en caso de la incidencia de una descarga, puesto que provee una solución equipotencial a los equipos. El Cine Domo cuenta con un sistema de puesta a tierra, al que está conectada la estructura y a donde todas las partes metálicas no portadoras de corriente están conectadas a través del barraje equipotencial (ductos de aire, ductos de agua) para evitar efectos debidos a un impacto directo del rayo a la estructura y para ofrecer un camino de baja resistencia para la corriente del rayo en el caso de un impacto directo. La instalación eléctrica de la estructura cumple con todos los requerimientos técnicos, existe un barraje equipotencial con el cual se obtiene un potencial común, y se logra que las instalaciones se eleven al mismo potencial, evitando diferencias de potencial peligrosas.

Protección interna

Cubre efectos secundarios provocados por la caída directa o indirecta de un rayo a la estructura. Por efecto de inducción o conducción, éstas pueden ocasionar sobretensiones peligrosas para las personas, las estructuras y los equipos. A través de las acometidas de redes de energía eléctrica, de redes telefónicas o datos que

alimentan la edificación pueden llegar sobretensiones, ya sea por inducción o por descargas directas. Para la selección de las protecciones por utilizar, la Norma ANSI C62.41 recomienda dividir la edificación en sectores de protección, dependiendo del riesgo de cada sector.

En el Cine Domo de Maloka –con el fin de evitar efectos de este tipo, y teniendo en cuenta que no tiene un sistema de protección externa totalmente constituido como se mencionó anteriormente– se implementó un sistema de protección interna conformado por:

Protección primaria

Todos los ductos y conductores no energizados están conectados al barraje equipotencial.

Los conductores de fase están conectados al barraje equipotencial a través de descargadores de sobretensión.

Protección secundaria

Instalación de protecciones a la entrada de las líneas telefónicas o de datos o a la entrada de la alimentación de los equipos que la requieran.

La capacidad de supervivencia de las protecciones depende del tamaño del transitorio. Éste, a su vez, depende de la localización de la protección, pues debido a la impedancia de los cables y la división de corrientes, la señal transitoria se atenúa a medida que viaja dentro de una instalación. La Norma ANSI-IEEE C62.41 considera tres categorías de localización:

Categoría C. Definida como:

- Fuera de la edificación, o
- Al lado de la alimentación principal, entrando al tablero de distribución de baja tensión, o
- Al lado de carga de un tablero de distribución que alimenta otra edificación o a un equipo en el sitio.

Categoría B. Definida como:

- En el sistema de distribución, entre el lado de carga del tablero principal y una toma, o
- Dentro de aparatos que no están alimentados desde una toma de pared, o
- Tableros de distribución localizados dentro de una distancia de 20 metros de un cable en categoría C, o
- Equipos conectados o protegidos localizados dentro de una distancia de 20

metros de un cable en categoría C.

• *Categoría A.* Definida como:

- Equipos conectados o protegidos a más de 20 metros de un cable en categoría C.

Las sobretensiones sobre redes de datos no son atenuadas significativamente por el cable; por tanto, las protecciones deben estar siempre referidas a la localización categoría C. Independientemente de dónde estén instalados en la edificación, el peor caso será similar. Se toma como una forma de onda transitoria de 10/700 μ s.

Según la ANSI-IEEE C62.41-1991, los valores recomendados de protección, de acuerdo con la categoría de localización y la forma de onda se presentan en la tabla 15.

Tabla 15.
Valores de protección recomendados por ANSI-IEEE C62.41-1991, según la categoría de localización.

Categoría	Forma de onda			
	1.2/50 μ s[KV]	8/20 μ s[KA]	0.5 μ s	100 KHz
C1	6	3	-	-
C2	10	5	-	-
C3	20	10	-	-
B1	2	1	170 A	2 KV
B2	4	2	330 A	4 KV
B3	6	3	500 A	6 KV
A1	-	-	2 KV	70 A
A2	-	-	4 KV	130 A
A3	-	-	6 KV	200 A

En este punto vale la pena aclarar que la evaluación de las sobretensiones en una estructura es una actividad relativamente compleja, y más en esta estructura que tiene unas condiciones de construcción muy particulares.

En el punto anterior se estimó la posible sobretensión debido a un impacto de un rayo cercano a la estructura. La localización que da la norma es de categoría A. En esta categoría la Norma ANSI-IEEE C62.41 ha hecho pruebas para ondas de tipo toque, subdividiendo la categoría de acuerdo con la amplitud

del transitorio. Se subdivide la categoría de localización en tres clasificaciones que van desde 1 hasta 3.

Teniendo en cuenta que la sobretensión estimada es de aproximadamente 2 kV, podemos ubicar la protección en una categoría A1. Es decir, la protección debe ser especificada para este tipo de onda y para esa determinada amplitud.

Caso 2: Hemeroteca Nacional

Para la evaluación de la necesidad de implementar un sistema de protección contra rayos para la estructura de la Hemeroteca Nacional Universitaria, se realizó un estudio comparativo de la Norma NTC 4552-1999 con la BS 6651-1999, IEC 1024-1-1 y el código NFPA 780. A continuación se presentan los resultados obtenidos de las normas aplicadas a la estructura seleccionada.

Aplicación de la NTC 4552

La Norma técnica colombiana realiza en el numeral 7.1 la evaluación del factor de riesgo para protección contra rayos, con el propósito de establecer la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura.

Para encontrar el nivel de riesgo se tienen en cuenta cuatro índices, clasificados y ponderados dentro de dos características, como son los parámetros del rayo e índices que están relacionados con la estructura.

Los parámetros del rayo que se utilizan para encontrar el nivel de riesgo son:

- Densidad de descargas a tierra, DDT , R_{DDT}
- Corriente pico absoluta promedio, I_{abs} , R_{abs}

Mediante la expresión:

$$R = 0.7 * R_{DDT} + 0.3 * R_{abs}$$

A partir de datos multianuales, obtenidos a través del sistema de localización de rayos TSS420 del grupo PAAS-UN para Bogotá, se obtiene:

Densidad de rayos a tierra = 2 descargas/km²-año

Corriente pico absoluta promedio = 40 KA

Tomando la valoración de riesgo para estos dos parámetros indicada por la norma, se obtiene:

Índice de riesgo por rayos		
Densidad de descargas a tierra [Descargas/km ² -año]	R_{Iabs} R_{DDT}	Corriente pico absoluta promedio [KA]
		Menor o igual a 40 KA
DDT < 5	0.25	1
		0.475

Este índice de riesgo por rayos es considerado como moderado.

Índices relacionados con la estructura: sumando los valores relacionados con la estructura, como son el uso, el tipo y la combinación de altura y área, se obtiene la gravedad que se puede presentar en la estructura.

Valor del índice relacionado con el uso de la estructura: para darle un valor al índice relacionado con el uso de la estructura a la Hemeroteca Nacional Universitaria, se tiene en cuenta que ésta se encuentra entre las dos clasificaciones mostradas a continuación y cuyos valores dados por la norma son:

Valor del índice relacionado con el uso de la estructura

Clasificación de estructura	Uso de la estructura	Valor índice
Estructuras de uso común	Teatros, colegios, escuelas, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas, hospitales, prisiones, ancianatos, jardines infantiles, guarderías, hoteles	40
	Bancos, compañías aseguradoras, industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20

Se considera que la Hemeroteca Nacional Universitaria es un lugar similar a un colegio, por la presencia continua de estudiantes de todas las edades, y además es una biblioteca. Por consiguiente, se le da un valor de 30 a este índice.

Valor del índice relacionado con el tipo de estructura: la Hemeroteca Nacional Universitaria, según la norma se clasifica como:

Valor del índice relacionado con el tipo de estructura

Tipo de estructura	Valor del índice
No metálica	40

Valor del índice relacionado con la altura y el área de la estructura: las dimensiones de la estructura de la Hemeroteca Nacional son:

Largo:	80.34 m
Ancho:	40.05 m
Altura:	20.00 m
Área:	3217.6 m ²

El valor del índice según la norma es:

Valor de índice relacionado con la altura y el área de la estructura

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

Sin embargo, teniendo en cuenta que alrededor de la Hemeroteca se encuentran algunos árboles de altura similar, se le da un valor de 15, por la influencia que éstos pueden tener sobre ella.

Sumando los índices por el uso, el tipo y la combinación de altura y área, se obtiene la gravedad:

$$\text{Gravedad} = 30 + 40 + 15 = 85$$

Niveles de gravedad

Suma de índices de gravedad	Gravedad
81 a 100	Severa

Aplicando la matriz del factor de riesgo, y teniendo los parámetros de la zona y la gravedad, se obtiene:

Factor de riesgo

Gravedad	Severa
Parámetros	
Moderados	FR = Alto

Dado que el factor de riesgo resulta alto, se concluye que es necesario la instalación de un sistema de protección contra rayos, tanto externo como interno, y un sistema de puesta a tierra.

Esquema de protección externa en la Hemeroteca Nacional, según la NTC 4552.

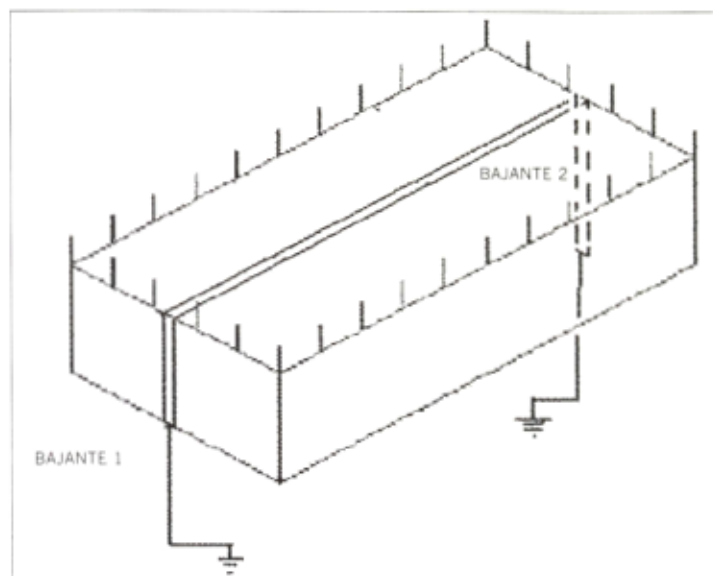


Figura 4. Las puntas sobre la estructura son de 60 cm, y están espaciadas entre sí 8m.

Aplicación de la Norma técnica británica BS 6651-1992

La Norma técnica británica evalúa la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura, en el numeral 10.1, siempre que el lugar cumpla con alguna de las siguientes condiciones:

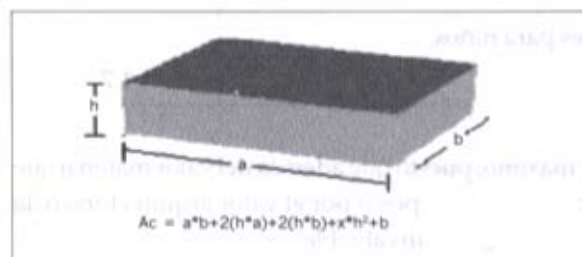
- Donde exista un número considerable de personas
- Donde se preste un servicio público
- Donde el área tenga un nivel alto de actividad de rayos
- Donde la estructura se considere de importancia histórica o cultural
- Donde existan contenidos de materiales explosivos e inflamables

Sin embargo, cuando se desea tomar una decisión precisa de la necesidad de un sistema de protección, se evalúa:

La probabilidad que presenta la estructura de ser impactada por rayos en un año, como el producto de la densidad de descargas a tierra (N_g) y el área colectiva efectiva de la estructura (A_e).

Para el caso de la Hemeroteca, $N_g = 2$ descargas/km²-año

El área colectiva efectiva (A_c), es el área del plano de la estructura extendida en todas las direcciones para tomar en consideración su altura; el borde del área colectiva efectiva está desplazado del borde de la estructura por una cantidad igual a la altura de la estructura en ese punto. La Norma presenta una tabla con el cálculo de áreas colectivas efectivas de algunas estructuras comunes; para el caso de la Hemeroteca, se tiene:



Siendo

$$a = 80.34 \text{ m}$$

$$b = 40.05 \text{ m}$$

$$A_c = 9324 \text{ m}^2$$

$$h = 20 \text{ m}$$

Figura 5.

de donde la probabilidad de que la estructura sea impactada por un rayo en un año es:

$$P = N_g * A_c * 10^{-6}$$

$$P = 2 * 9324 * 10^{-6} = 0.0186$$

A continuación, el riesgo que tiene la estructura por impactos, teniendo en cuenta el peso que se le da a los siguientes factores:

Uso de la estructura:

Peso del factor A

Uso de la estructura	Valor del factor
Lugares de asambleas (iglesias, salones, teatros, museos, departamentos de historia, oficina postal, aeropuertos y estadios)	1.3
Colegios, hospitales y hogares para niños	1.7

Con el criterio de que la Hemeroteca es un lugar donde a diario se reúne una cantidad considerable de personas y se realizan conferencias, le damos al factor A un valor de 1.5.

Tipo de construcción:

Peso del factor B

Tipo de construcción	Valor del factor
Ladrillo, concreto sencillo o reforzado con algún techo diferente de metal o paja	1.0

Efectos o consecuencias dependiendo de los contenidos:

Peso del factor C

Efectos o consecuencias dependiendo de los contenidos	Valor del factor
Planta industrial, monumentos antiguos y edificios históricos, museos, galerías de arte o edificios con un contenido de valor especial	1.3
Escuelas, hospitales, hogares para niños, lugares de asamblea	1.7

A este factor se le da el valor máximo, puesto que además del valor material que puede contener la Hemeroteca por los equipos o por el valor arquitectónico, la vida de las personas presentes en el lugar es invaluable.

Grado de aislamiento:

Peso del factor D

Grado de aislamiento	Valor del factor
Estructura localizada en un área con pocas estructuras o árboles de altura similar	1.0

Localización de la estructura:

Peso del factor E

Localización de la estructura	Valor del factor
Ciudad plana, en algún nivel	0.3

Se calcula entonces el factor de riesgo como:

$$FR = P \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E$$

$$FR = 0.0186 \times 1.5 \times 1.0 \times 1.7 \times 1.0 \times 0.3$$

$$FR = 0.0142$$

La Norma BS 6651-1992 indica que si el factor de riesgo es superior a 10^{-5} , es necesario el sistema de protección contra rayos.

Aplicación de la Norma técnica IEC 61024-1-1

En el numeral 4.3, la Norma técnica IEC 61024-1-1 evalúa la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura.

Se deben conocer las dimensiones y localización de la estructura, actividad de tormentas en la región considerada; además, la estructura debe ser clasificada como común o especial, según definiciones dadas en los numerales 2.1 y 2.2 de la norma; estos datos permiten realizar la evaluación de:

Promedio anual de frecuencia de descargas (N_d), como un producto de la densidad de rayos a tierra (N_g) y el área colectiva equivalente de la estructura (A_c).

$$N_g = \text{Densidad de rayos a tierra} = 2 \text{ descargas/km}^2\text{-año}$$

El área colectiva equivalente (A_c) se define como un área de superficie de tierra, que tiene la misma frecuencia anual de descargas directas que la estructura.

Para una estructura como la Hemeroteca aislada, el área colectiva equivalente, A_c , es el área encerrada entre el borde de la línea b1 obtenida de la intersección entre la superficie de tierra y una línea recta con pendiente 1:3, la cual pasa por la parte superior de la estructura y rota alrededor de ella:

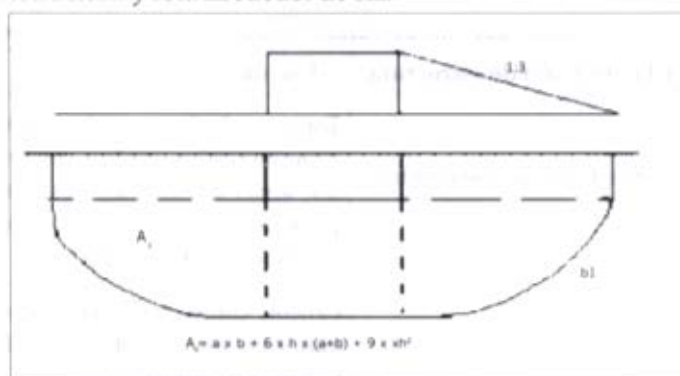


Figura 6.

$$A_c = 80.34 \times 40.05 + 6 \times 20 \times (80.34 + 40.05) + 9 \times 3.1416 \times 20^2$$

$$A_c = 28.924 \text{ m}^2$$

$$N_d = N_g \times A_c$$

$$N_d = 2 \times 28924 \times 10^{-6}$$

$$N_d = 0.058$$

Frecuencia anual aceptada de descargas a una estructura N_c : este factor es responsabilidad de un comité nacional de cada país, donde se relacionan las pérdidas humanas, sociales y culturales. Este valor es establecido por el dueño de la estructura o por el diseñador del sistema de protección. Puede ser estimado a

través del análisis del riesgo de daño, tomando un valor apropiado de factores como:

- Tipo de construcción
- Presencia de sustancias inflamables y explosivas
- Medida para reducir los efectos o consecuencias de las descargas
- Número de personas afectadas por el daño
- Tipo e importancia del servicio público afectado
- Valor de los artículos
- Otros factores

Ya que la norma indica que el valor de este factor se establece según normas nacionales de cada país, consideramos que al aplicar el índice de gravedad, calculado a través de la Norma NTC 4552, estamos teniendo en cuenta estos factores recomendados por la Norma IEC-61024-1-1; por tanto, se realizó una escala de la valoración dada por la Norma NTC 4552, para los índices relacionados con el uso de la estructura, tipo de estructura y área y altura de la estructura. Los valores obtenidos son:

Valor del índice relacionado con el uso de la estructura

Clasificación de estructura	Uso de la estructura	Valor índice
Estructuras de uso común	Teatros, colegios, escuelas, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas, hospitales, prisiones, ancianatos, jardines infantiles, guarderías, hoteles	$4 \cdot 10^4$
	Bancos, compañías aseguradoras, industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	$2 \cdot 10^4$

Valor dado al índice por uso de la estructura: $3 \cdot 10^4$.

Valor del índice relacionado con el tipo de estructura

Tipo de estructura	Valor del índice
No metálica	$4 \cdot 10^4$

Valor de índice relacionado con la altura y el área de la estructura

Altura y área de la estructura	Valor del índice
Área mayor a 900 m ²	1*10 ⁻⁴
Altura menor a 25 m	

$$N_C = 3 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-4} + 1.5 \cdot 10^{-4}$$

$$N_C = 8.5 \cdot 10^{-4}$$

Se realiza una comparación entre el valor de N_d y N_C , obtenidos para la estructura:

$$N_d = 0.058$$

$$N_C = 8.5 \cdot 10^{-4}$$

$$N_d > N_C$$

La Norma IEC-61024-1-1 establece que si el valor de $N_d > N_C$, se requiere un sistema de protección contra rayos, con una eficiencia de:

$$E > 1 - N_C/N_d$$

$$E > 1 - 8.5 \cdot 10^{-4} / 0.058$$

$$E > 0.98$$

que corresponde a un sistema de protección de nivel I.

Aplicación de la Norma NFPA 780

La Norma NFPA 780 evalúa la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura, en el apéndice H, donde se realiza el cálculo del índice de riesgo R , el cual es obtenido por la división de la suma de los valores dados en las tablas H-2(a) a H-2(e) por el índice por nivel cerámico, obtenido de la tabla H-2(f).

$$R = (A + B + C + D + E) / F$$

Para la Hemeroteca, los valores de los índices son:

Índice A. Tipo de estructura

Estructura	Valor del índice
Bibliotecas, museos, edificios históricos	8

Índice B. Tipo de construcción

Marco de la estructura	Tipo de techo	Valor del índice
Concreto reforzado	Compuesto	3

Índice C. Localización relativa

Localización	Valor del índice
Estructuras en áreas de estructuras bajas Grandes estructuras que cubren áreas de más de 929 m ²	5

Índice D. Topografía

Localización	Valor del índice
Sobre terreno plano	1

Índice E. Ocupación y contenido

Ocupación y contenido	Valor del índice
Grandes asentamientos humanos de 50 o más personas	6

Frecuencia de rayos

Nivel ceráuneo	Valor del índice
Más de 70	1

Una vez realizada la evaluación de los índices, se calcula el riesgo por rayos R:

$$R = (8 + 3 + 5 + 1 + 6) / 1$$

$$R = 23$$

Se evalúa el riesgo por rayos, a través de la tabla H-2

Evaluación del riesgo por rayos

Valor R	Evaluación del riesgo
> 7	Severo

Puesto que el factor de riesgo por rayos es severo, se concluye según la Norma NFPA 780, que se requiere un sistema de protección para la estructura de la Hemeroteca Nacional Universitaria.

Esquema de protecciones en la Hemeroteca Nacional, Norma NFPA 780

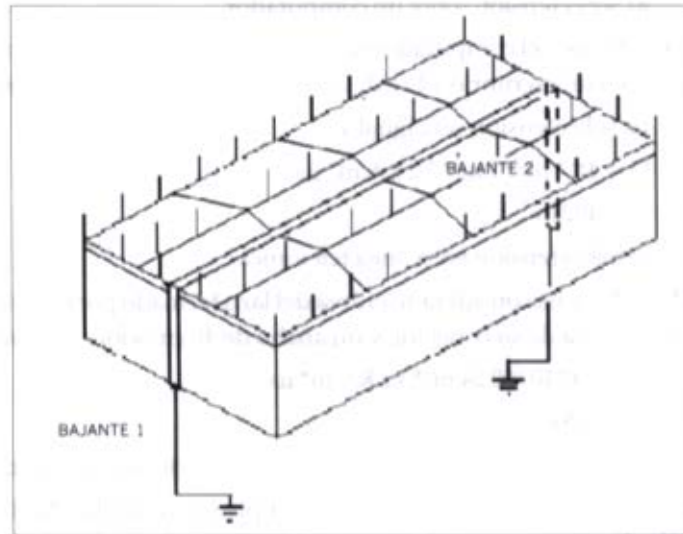


Figura 7. Las puntas sobre la parte superior del tejado son de 25 cm, y están espaciadas entre sí 7.6 m.

Cálculo de sobretensiones inducidas

Para el cálculo de sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas se tuvieron en cuenta dos casos: impacto cercano e impacto directo.

Para ello se consideraron tres equipos dentro del auditorio de la Hemeroteca que estarán sometidos a dichas sobretensiones y que por tanto deben ser protegidos internamente.

Se eligió un computador, una línea telefónica (conector y equipo telefónico) y un equipo de proyección, para los cuales se realizarán los cálculos:

Sobretensiones inducidas por impacto cercano

Éstas se pueden estimar a través de la siguiente ecuación:

$$U = \mu * S_b * \frac{Hm}{Tl}$$

Con $\mu_0 = 4 \pi * 10^{-7} (V * s / A * m)$

S_b es el área del lazo cerrado que forma cada uno de los equipos.

H_m es la intensidad de campo magnético de la estructura, que de acuerdo con parámetros de la Norma IEC, para una clase de protección I (eficiencia del 98%) es del orden de los 32 KA/m para la primera descarga de retorno.

T_1 es el tiempo de frente de la corriente del rayo, que para el caso se ha elegido de una onda que tiene $10 \mu\text{s}$ de frente.

a) Sobretensión sobre un computador

En este caso, el computador se encuentra conectado a una toma ubicada sobre el piso, en un escritorio a 1 m del nivel, y con un ancho aproximado de 1 m.

La sobretensión será igual a:

$$U = 4\pi * 10^{-7} * 1 \text{ m}^2 * 3.2 \text{ KA/m} * \mu\text{s}$$

$$U = 4021 \text{ v}$$

b) Sobretensión en la línea telefónica

Para ella se ha considerado el área del lazo formado por el cable conectado a 60 cm por encima de su conector, y un ancho de 40 cm sobre el plano horizontal.

$$U = 4\pi * 10^{-7} * 0.24 \text{ m}^2 * 3.2 \text{ KA/m} * \mu\text{s}$$

$$U = 965 \text{ v}$$

c) Sobretensión en un equipo electrónico de proyección de conferencias

También se considera a 1 m sobre el piso y un ancho de 50 cm, con lo cual su cálculo es:

$$U = 4\pi * 10^{-7} * 0.5 \text{ m}^2 * 3.2 \text{ KA/m} * \mu\text{s}$$

$$U = 2010 \text{ v}$$

Sobretensiones inducidas por impacto directo

Las sobretensiones inducidas por acoples magnéticos causados por impactos directos de rayos pueden ser estimados por:

$$U = \frac{\mu_0 * I_l}{40 * T_l} * l * \ln\left(\frac{d+b}{d}\right)$$

Con d como la distancia de la bajante al plano formado por el equipo a proteger, l y b las dimensiones del lazo definido, I_l la corriente del rayo en KA, que para el tipo de protección Clase I es de 200, y los restantes son parámetros descritos anteriormente.

Para la Hemeroteca Nacional se consideraron dos bajantes laterales, ubicadas como se indica en el gráfico.

a) Sobretensiones sobre el PC

Se deben calcular las sobretensiones debidas a cada una de las bajantes, ya que la distancia d cambia por la posición espacial del equipo en el auditorio.

- Sobretensión debida a la bajante de la vertical derecha

La resultante de la distancia d se encuentra por Pitágoras, y de acuerdo con las dimensiones del plano es:

$$d^2 = 10^2 + 16.71^2$$

$$d = 19.47 \text{ m}$$

$$U = (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \text{ KA} / 40 \cdot 10 \mu\text{s}) \cdot 10 \text{ m} \cdot \ln(21.47/19.47)$$

$$U = 614.38 \text{ V}$$

- Sobretensión debida a la bajante de la vertical izquierda

$$d^2 = 10^2 + 57.63^2$$

$$d = 58.5 \text{ m}$$

$$U = (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \text{ KA} / 40 \cdot 10 \mu\text{s}) \cdot 10 \text{ m} \cdot \ln(60.5/58.5)$$

$$U = 211.22 \text{ V}$$

b) Sobretensión en la línea telefónica

- Sobretensión debida a la bajante de la vertical derecha

$$d^2 = 10^2 + 19.71^2$$

$$d = 22.10 \text{ m}$$

$$U = (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \text{ KA} / 40 \cdot 10 \mu\text{s}) \cdot 10 \text{ m} \cdot \ln(24.5/22.10)$$

$$U = 647.77 \text{ V}$$

- Sobretensión debida a la bajante de la vertical izquierda

$$d^2 = 10^2 + 54.63^2$$

$$d = 55.53 \text{ m}$$

$$U = (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \text{ KA} / 40 \cdot 10 \mu\text{s}) \cdot 10 \text{ m} \cdot \ln(57.93/55.53)$$

$$U = 265.85 \text{ V}$$

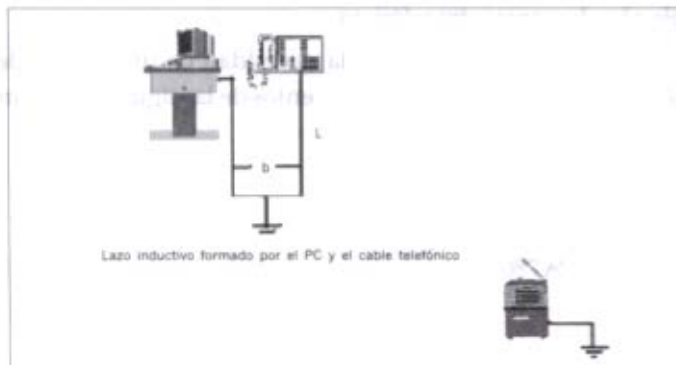


Figura 8. Esquema de lazos cerrados formados por los equipos que se van a proteger.

Caso 3: Iglesia Cosme y Damián

Las características geométricas y dimensiones de la iglesia ubicada en la ciudad de Bogotá se presentan en la figura 9:

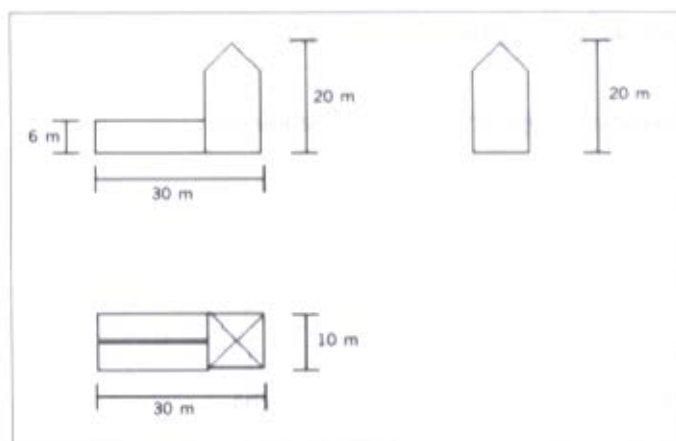


Figura 9.

A su alrededor existen algunas edificaciones de apartamentos, cuyas alturas aproximadas son las siguientes:

- Edificio A: 1 m
- Edificio B: 12.5 m
- Edificio C: 12.5 m

Existe un pequeño bosque cercano, donde hay algunos árboles de alturas mayores o iguales a la del campanario de la iglesia. Las cargas existentes en la iglesia son principalmente de iluminación y no se encontró equipo electrónico susceptible a las descargas atmosféricas.

Con el fin de determinar la necesidad de un sistema de protección contra rayos, se utilizaron los procedimientos de las siguientes normas:

- IEC 61024-1-1
- NTC 4552
- BS 6651-1992
- NFPA 780

Aplicación de la Norma IEC 61024-1-1

Según la tabla 1 de esta norma, se clasifica la iglesia dentro de la categoría de estructuras comunes, como teatros, escuelas, áreas de deportes, grandes almacenes, etc., ya que la iglesia es un lugar público en el cual, de llegar a presentarse una descarga atmosférica, hay riesgo de pánico.

Se evaluó inicialmente el número de impactos de rayo por año para el área efectiva de la iglesia de acuerdo con la fórmula, donde:

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

A_E : Área efectiva en m^2

$N_G = 0.04 \cdot Td^{1.25}$ donde Td es el nivel ceráuneo. Para el caso de Bogotá tomamos 80 según el mapa de niveles ceráuneos realizado por el PAAS.

$$N_G = 0.04(80)^{1.25} = 9.57 \text{ rayos / km}^2\text{-año.}$$

Cálculo del área efectiva

Según esta norma, se debe considerar inicialmente que alrededor de la estructura no existen otras edificaciones que pueden apantallarla. Se toma entonces tres veces la altura de la estructura y se traza un círculo con dicho radio en torno de la misma (con centro en el campanario; Véase figura 10).

Para considerar el efecto de otras estructuras cercanas, la norma considera que las edificaciones que estén dentro del círculo de radio $3h_s$ y que cumplan la condición $3(h_s + h) > d$ deben ser tenidas en cuenta como posibles apantallamientos.

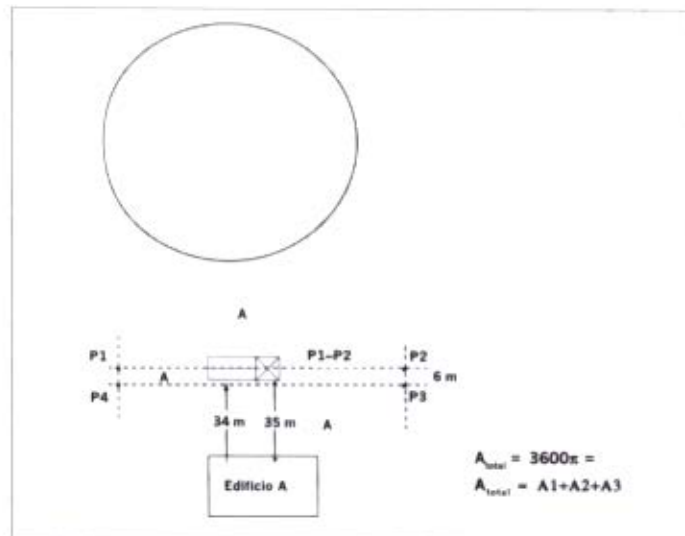


Figura 10. Cálculo del área equivalente.

Aplicando lo anterior se tiene:

h_i : Altura de la iglesia

h : Altura de la edificación cercana

d : Distancia más cercana a la iglesia

i: Edificio A: $3(31 + 20) = 153 > 35$ m

ii: Edificio B: $3(12.5 + 20) = 97.5 > 30$ m

Como el edificio B tiene menor altura que la iglesia, no se considera que apantalle la estructura; por esta razón se aplica la fórmula de la IEC 61024-1-1:

$$X_s = \frac{d + 3(h_i - h)}{2}$$

para el edificio A tenemos

$$X_s = \frac{35 + 3(31 - 20)}{2} = 34\text{m}$$

Se traza la línea recta entre la iglesia y el edificio A, tal y como se muestra en la figura 10, y perpendicular a ésta se dibuja otra a 34 metros contados desde el edificio A hasta la iglesia. El área por debajo de la línea $P_4 - P_3$ es descontada del área total, obteniéndose el área efectiva:

$$A_{TOTAL} = 3600 \cdot \pi = 11309 \text{ m}^2$$

Para calcular el área efectiva se traza la línea $P_2 - P_1$ que divide el círculo en 2 áreas iguales de 5654.5 m^2 . Se aproxima el área 2 al rectángulo $P_1 P_2 P_3 P_4$; entonces $A_2 = 120 \times 6 = 720 \text{ m}^2$, con lo que el área efectiva es $A_E = A_1 + A_2 = 6374.5$; por último se calcula:

$$N_d = 9.57 \cdot 6374.5 \cdot 10^6 = 0.061 \text{ rayos/año}$$

Número de rayos aceptado por año

Según la IEC 61024-1-1, el número de rayos aceptado por año (N_c) debe ser establecido por las normas nacionales de cada país. Para esto la norma establece varios parámetros de los cuales depende N_c :

- Tipo de construcción
- Presencia de sustancias inflamables
- Número de personas involucradas en caso de daños
- Importancia de los servicios públicos
- Medidas para reducir efectos por rayos

Se pudo determinar, de acuerdo con la figura 5 de la norma, que N_c varía entre 10^{-4} y 10^{-1} , siendo 10^{-4} el valor que ofrece mayor protección y 10^{-1} el que ofrece menor protección. Para seleccionar N_c se decidió evaluar cada uno de los factores de los cuales depende, dándoles un valor y luego promediando los resultados:

Parámetro	Criterio	N_c
Tipo de construcción	Construcción de concreto y ladrillo. Mixta	10^{-1}
Presencia de sustancias inflamables	Velas y bancos de madera. Presencia: media - baja	10^{-2}
Número de personas involucradas en caso de daños	Lugar público con concentración de personas, sólo a ciertas horas y días	10^{-1}
Importancia de los servicios públicos	Insignificante	10^{-1}
Medidas para reducir efectos por rayos	No presenta medida alguna para reducir efectos	10^{-3}
	VALOR PROMEDIO	0.0622

Según lo anterior, para $N_c > N_d$, la iglesia no necesita un sistema de protección contra rayos.

Aplicación de la NTC 4552

De acuerdo con el numeral 7.1 de la norma, se evalúa el factor de riesgo de la estructura en dos etapas; la primera son los riesgos asociados a parámetros eléctricos de las descargas atmosféricas, y la segunda son los índices relacionados con la estructura.

Riesgo por parámetros eléctricos

$$Riesgo = 0.7 \cdot R_{DDT} + 0.3 \cdot R_{labs}$$

donde:

R_{DDT} = Índice de riesgo por rayos. Riesgo debido a la densidad de descargas a tierra, DDT

R_{labs} = Riesgo debido a la magnitud de la corriente del rayo.

La densidad de descargas a tierra se calcula según la NTC como:

$DDT = (0.1 + 0.35 \text{ sen } (\delta)) \cdot 0.6 \cdot NC$, donde δ es la latitud y NC el nivel ceráuneo.

La latitud de Bogotá es $4^{\circ}35'56''$ y el nivel ceráuneo es 80; por tanto, $DDT = 6.14 \text{ rayos} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{año}$. De acuerdo con la tabla presentada en la NTC,

Índice de riesgo por rayos $R_{DDT} = 0.5$

Según la curva de probabilidad de corriente pico de rayo, para una probabilidad del 50% se tiene una $I_{atv} = 35 \text{ KA}$; por tanto de acuerdo con la misma tabla de la NTC, el índice

$R_{atv} = 0.65$, con lo que el riesgo por parámetros eléctricos es 0.545, considerado como alto.

Riesgo asociado a la estructura

De acuerdo con las tablas 1, 2 y 3, se tiene que la iglesia es una estructura de uso común (índice 40), mixta (índice 20), con un área menor a 900 m^2 y una altura menor a 25 m (índice 5). Sumando los índices anteriores, el nivel de gravedad es de 65, considerado como moderado según la tabla 4.

El riesgo resultante debido a parámetros eléctricos y de la estructura es considerado alto según la matriz de riesgo; por tanto se deben instalar protecciones tanto internas como externas.

Aplicación de la Norma BS 6651-1992

El riesgo total según esta norma depende de cuatro factores: P (número probable de impactos tipo rayo), F (tipo de estructura), G (grado de aislamiento) y H (tipo de terreno).

Número probable de impactos tipo rayo

Definido según la fórmula $P = N_G \cdot A_E \cdot 10^{-6}$, donde N_G es calculado de acuerdo con la tabla 1 que relaciona el nivel cerámico con la densidad de rayos a tierra, es decir que para el nivel cerámico de Bogotá (80) se tiene una densidad de rayos a tierra promedio de 6.9.

El área efectiva se calcula como $A_E = A_S + C_{SG} + C_{AS} + C_{MP} + C_{DL}$, donde:

$A_S =$ Área de la estructura: 300 m^2

$C_{SG} =$ Área conjunta de la tierra alrededor de la estructura: Asumimos que el suelo tiene una resistividad de $100 \text{ } \Omega/\text{m}^2$ y calculamos esta área según lo indicado en la norma (véase figura 11): $39,415 \text{ m}^2$.

$C_{MP} =$ Área conjunta de entradas y salidas de acometidas: en la iglesia objeto del estudio, la acometida es subterránea, un nivel de tensión de 110 V, el transformador de distribución que la alimenta está a unos 30 metros; de acuerdo con la norma, $C_{MP} = 2 \cdot D \cdot L$, con $D = \rho = 100 \text{ m}$ y $L = 30 \text{ m}$; entonces $C_{MP} = 6,000 \text{ m}^2$.

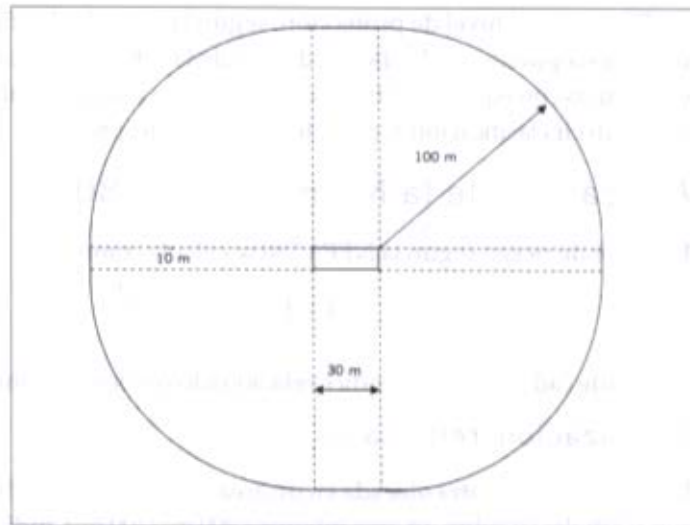


Figura 11. Cálculo del área de tierra alrededor de la estructura.

C_{AS} = Área conjunta de estructuras adyacentes y sus tierras: estimamos que esta área es aproximadamente $10,000 \text{ m}^2$.

C_{DL} = Área conjunta de redes de datos: no existen redes de datos.

Por tanto $A_E = 300 + 39,415 + 6,000 + 10,000 = 55,715 \text{ m}^2$

$$P = 6.9 \times 55,715 \times 10^{-6} = 0.384.$$

Tipo de estructura

Se clasifica la estructura con protección según la BS 6651; luego $F = 1$.

Grado de aislamiento

Para la estructura localizada en un área con edificios alrededor o árboles, $G = 0.4$.

Tipo de terreno

Para el caso de Bogotá, consideramos terreno plano a todo nivel, es decir $H = 0.3$.

El riesgo es entonces $R = 0.384 \times 1 \times 0.4 \times 0.3 = 0.046$. Según esta norma, el criterio para determinar si se necesita o no el sistema de protección es que si R supera 10^{-5} se necesita el sistema de protección contra rayos, de lo contrario no es requerido.

En cuanto al nivel de protección, según la tabla de clasificación de pérdidas, una iglesia puede ser clasificada dentro de la categoría de casas de habitación y estructuras con equipo electrónico de bajo costo y bajas penalizaciones por pérdidas, es decir clasificación 1, considerada como despreciable.

Aplicación de la Norma NFPA 780

El índice de riesgo según la NFPA 780 se calcula como

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

donde cada letra es un índice relacionado con los siguientes aspectos:

Localización relativa (A)

La iglesia se encuentra ubicada en un área con estructuras adyacentes altas (edificios y árboles) y cubre un área inferior a 900 m² (300 m²). Índice 1.

Tipo de estructura (B)

Lugar público. Índice 9.

Tipo de material de la construcción (C)

Armazón en concreto con pisos de cerámica. Índice 3.

Topografía (D)

Terreno llano. Índice 1.

Ocupación y contenido (E)

Grandes asambleas de más de cincuenta (50) personas. Índice 6.

Nivel ceráuneo (F)

Mayor a 70 (para Bogotá 80). Índice 1.

El riesgo $R = 21$, es considerado como severo por la NFPA 780.

Cálculo de las protecciones externas

En el cálculo de las protecciones externas se utilizó el método de la esfera rodante, usando la fórmula para el cálculo de la distancia efectiva de atracción (r_s):

$$r_s = 9.41 \cdot I^{0.65}$$

$$r_s = 9.41 \times 35^{0.65} = 94.9 \text{ m}$$

Figura 12. Método electrogeométrico. Estructura sin protección.

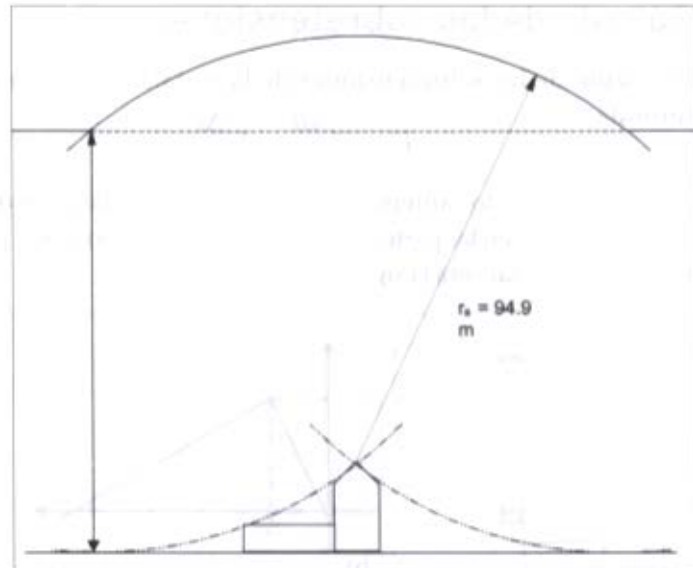
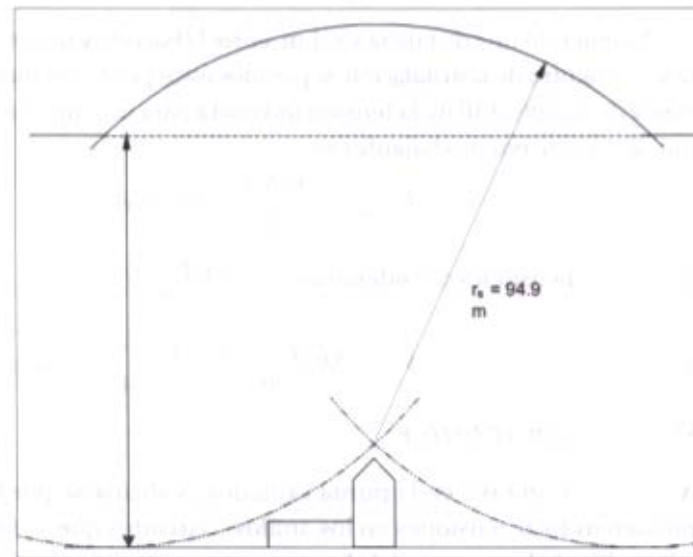


Figura 13. Método electrogeométrico. Estructura con protección.



En la figura 12 se muestra la estructura sin apantallamiento; los puntos que toca el arco no están siendo protegidos. La figura 13 indica el sistema de protección contra rayos escogido, compuesto por una bayoneta con una altura entre 50 y 100 cm, ubicada en la punta del campanario. Para una mayor seguridad se puede instalar una segunda bayoneta de la misma altura en la parte más alejada del campanario.

Cálculo de las sobretensiones

El cálculo de las sobretensiones de la instalación depende de la siguiente fórmula:

$$V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

En los apartados anteriores se consideró la instalación de dos bajantes que serán colocadas en las partes laterales de la torre de la iglesia; por tanto la configuración por utilizar será la siguiente:

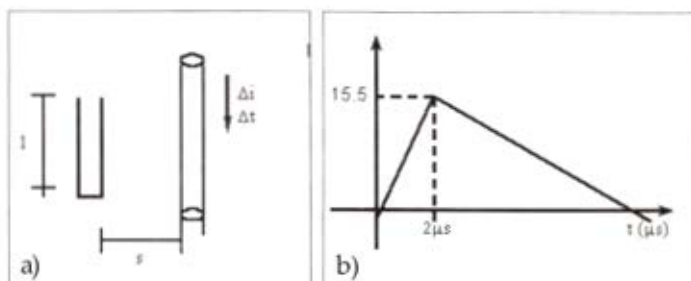


Figura 14.
a) Área de inducción.
b) Sobrecorriente.

Asumiendo una distancia $s = 1$ m, entre la bajante y un circuito formado por la fase y el neutro de la instalación, separados éstos por la distancia aproximada de 10 mm y de longitud 10 m, la tensión inducida para un impulso tipo rayo de 31 kA, que se reparte por dos bajantes es:

$$I_{bajante} = \frac{31 \text{ kA}}{2} = 15.5 \text{ kA}$$

para las dimensiones consideradas, $L = 2 \text{ nH/m}$

$$\text{entonces } V_L = 2 \text{ nH/m} \cdot 7.75 \text{ kA}/\mu\text{s} \cdot 10 \text{ m} = 155 \text{ V}$$

Protección interna

Al impactar un rayo en la punta captadora y disiparse por las dos bajantes, se pueden inducir tensiones en los anillos o circuitos que se formen dentro de la iglesia. De ahí la necesidad de las siguientes protecciones internas:

Primaria

Como las descargas pueden impactar en la red de alimentación de MT, desplazándose por las líneas hasta la iglesia, la protección primaria debe contar con descargadores de sobretensión entre la fase y el barraje equipotencial, y también entre el neutro y el barraje equipotencial.

Estos descargadores deben instalarse en la acometida de la iglesia y tener una tensión de sostenimiento entre 1.7 y 2 veces la tensión pico del sistema de alimentación de energía en condiciones normales. El criterio de selección para los limitadores de sobrecorriente es de mínimo 15.5 KA.

Secundaria

Debido a la inducción producida por la corriente del rayo, ya sea por impacto directo o lejano, se pueden inducir tensiones en los anillos o circuitos formados por cada uno de los equipos que se encuentren dentro de la estructura. Para el caso de la iglesia no existen equipos eléctricos ni electrónicos sensibles a los incrementos de tensión calculados; sin embargo, se debe evitar la formación de lazos verticales paralelos con las bajantes o la formación de anillos de gran superficie cerca de las bajantes para eliminar la probabilidad de que se induzcan tensiones peligrosas.

Los resultados para cada procedimiento de evaluación se resumen en la siguiente tabla:

Norma	LPS	Nivel de protección
IEC 1024-1-1	No requiere	
NTC 4552	Sí requiere	Para riesgo alto
BS 5661	Sí requiere	Para nivel de protección despreciable
NFPA 780	Sí requiere	Para nivel severo

Conclusiones generales

- 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. En una norma el método de evaluación debe ser efectivo y relativamente simple.

- La Norma NTC 4552 cumple con estos dos requisitos de efectividad y sencillez. Si bien las normas IEC y la británica difieren de la colombiana en cuanto al procedimiento, las evaluaciones hechas en éste y muchos otros trabajos de diseño de protección de estructuras contra rayos muestran una mayor sencillez en el cálculo del riesgo de parte de la norma colombiana con resultados similares a las europeas. Actualmente el comité Icontec de rayos está revisando la norma con el objetivo de mejorar algunos aspectos que han sido encontrados por ingenieros de diseño que la han aplicado en todo el país.

- La Norma NFPA 780, en la parte de evaluación del riesgo por rayos, tiene poca aplicación en Colombia debido al alto peso que le da al nivel ceráuneo para valores superiores a 70. En el caso colombiano, gran parte del territorio supera este valor; por tanto el valor de riesgo al aplicar la norma americana generalmente es severo, es decir no discrimina.

- Dentro de las ventajas de la NTC 4552, para la evaluación del riesgo se tienen que considerar los dos parámetros del rayo más importantes en la protección: la magnitud probable de la corriente pico del rayo y la densidad de descargas a tierra, otorgando a cada una un peso de 0.3 y 0.7, respectivamente. Las normas de otros países consideran en la evaluación del riesgo solamente la densidad de descargas a tierra (en el mejor de los casos), es decir, le asignan a la densidad un valor de 1. La NTC 4552 con estos valores está tomando en cuenta no sólo la frecuencia del evento (densidad de descargas a tierra) sino la amplitud de ésta, en términos probabilísticos.

Adicionalmente, la NTC 4552 considera la latitud del lugar donde está ubicada la estructura por proteger, con lo cual tiene en cuenta la variación de los parámetros del rayo respecto al espacio.

- La NTC 4552 presenta una guía de seguridad personal que ayuda a prevenir o reducir los posibles daños ante las descargas eléctricas atmosféricas.

- El procedimiento para calcular el área efectiva según la Norma británica BS6651-1992 es más claro y detallado que el de la IEC 61024-1-1.

- La Norma IEC 61024 no tiene definido un procedimiento para seleccionar el factor N_c , y lo deja para que sea definido por cada país. Sin embargo, la Norma británica y la IEC tienen resultados que son similares.

- Investigadores europeos, miembros del comité de rayos de la IEC (TC81)² están trabajando actualmente en la simplificación del método definido en la Norma IEC para evaluar el riesgo de daño a estructuras debido a rayos.

² Carlo Mazzeti, de la Universidad de Roma, y Z. Flisowski de la Universidad de Polonia.

Aplicación de la protección contra rayos a la falla de transformadores de distribución

La falla de transformadores de distribución, principalmente en zonas rurales de alta actividad de rayos, ha sido un problema constante para las empresas de energía del país en las últimas décadas. Centros de investigación y firmas de consultoría han realizado trabajos de diagnóstico particular y soluciones puntuales. Sin embargo, a la fecha, el problema de falla de transformadores de distribución en Colombia persiste, con costos que superan los US\$ 6 millones anuales (véase figura 15), y consecuencias directas en baja calidad de la energía eléctrica.

En el año 1989, se inició en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, Programa PAAS-UN, un proyecto de investigación continuo, sistemático, metodológico, con el objetivo de contribuir a encontrar soluciones técnico-económicas, sobre bases científicas y tecnológicas firmes y objetivas, a la alta mortalidad de transformadores de distribución.

Durante el primer período de investigación, que duró cerca de seis años, se trabajaron los modelos matemáticos de transformadores de distribución fabricados en Colombia. Para ello se contó con la colaboración de dos empresas multinacionales fabricantes de transformadores y la cofinanciación de la Empresa de Energía de Bogotá, Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia.

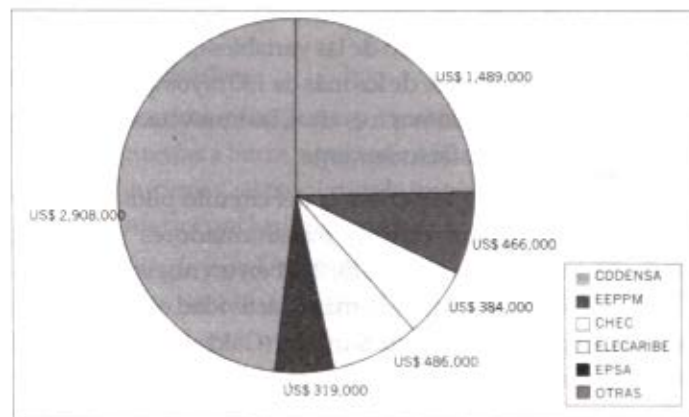


Figura 15. Costo anual de reposición de transformadores fallados (Total: US\$6.052.000)³.

³ Carlos Alberto Rodríguez, tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1999. Fuentes: DANE, Censo de 1993, Santander Investments (1997), CREG, 1999. Costos de reposición de transformadores apropiados para zonas tropicales.

Para poner a prueba los estudios teóricos y de laboratorio llevados a cabo con los modelos de los transformadores, en 1995 se propuso a la Empresa de Energía de Bogotá, EEB (hoy Codensa) un estudio sistemático de campo, desarrollado en dos fases.

En la primera fase de este estudio, que se denominó: "Metodología para la solución de un gran reto tecnológico: la falla de los transformadores de distribución", se efectuó una evaluación de los estudios realizados y de la información existente, tanto de mortalidad de transformadores como del entorno (descargas eléctricas atmosféricas, servidumbre, puestas a tierra, manipulación e instalación) con el fin de realizar un diagnóstico integral y plantear hipótesis preliminares para buscar una solución objetiva al problema.

En la segunda fase se plantearon las contingencias a las cuales puede estar sometido un sistema eléctrico de distribución rural. En 1997 se seleccionó un circuito piloto experimental localizado en una zona de alta mortalidad de transformadores y alto riesgo por rayos, en este caso ubicado en el municipio de Topaipí (Cund.), vereda Guachipay, con el objetivo de implementar dos innovaciones tecnológicas: el aumento del BIL en transformadores y un nuevo sistema de puesta a tierra.

Complementario a lo anterior, se controlaron las principales variables que inciden directamente en la falla de transformadores, como son: crecimiento de árboles alrededor de la zona de servidumbre, manipulación e instalación del transformador, componentes eléctricas de la red, elementos de protección, resistencia de puesta a tierra y actividad eléctrica atmosférica en la zona. Esta última fue monitoreada mediante la Red colombiana de localización de rayos.

El proceso de monitoreo de las variables que se ha llevado a cabo hasta el día de hoy muestra que, a pesar de los más de 130 rayos que han impactado a menos de 100 m del circuito en los últimos tres años, las innovaciones tecnológicas implementadas han respondido satisfactoriamente.

Como fruto de la experiencia del circuito piloto experimental, se diseñaron, fabricaron e instalaron otros 15 transformadores "prototipo nuevo diseño" a mediados del año 1999 y en abril de 2001 en un nuevo circuito experimental localizado en una de las dos zonas de mayor actividad eléctrica atmosférica del mundo: la zona rural del municipio de Samaná (Caldas), donde actualmente opera la estación experimental de medición directa de rayos, Ilyapa.

Metodología integral

Para lograr que una solución a un problema de ingeniería sea eficiente, adaptable, económica y de esa manera lograr altos estándares de calidad de la energía eléctrica, es necesario garantizar tres fases que deben estar integralmente relacionadas:

1. *Diagnóstico integral del problema*
2. *Alternativas tecnológicas e implementación de la solución*
3. *Control y monitoreo de variables*

Un diagnóstico integral implica:

- Evaluación de los estudios y soluciones previas que se hayan realizado
- Análisis de las causas del problema y sus efectos
- Caracterización del entorno
- Índices técnicos y económicos para evaluación

Hecho el diagnóstico integral del problema, se procede a plantear alternativas tecnológicas de su solución. Una vez analizadas estas alternativas, se escoge una o más y se procede al diseño e implementación de la solución propuesta, de una manera integral. Para ello se debe tener en cuenta:

- Modelamiento matemático de todos y cada uno de los componentes del sistema
- Mediciones *in situ* y en laboratorio
- Diseños apropiados, técnica y económicamente factibles
- Adecuación y mejoramiento de variables: redes, equipos, protecciones, mejoramiento de puestas a tierra
- Manipulación e instalación adecuadas

Finalmente es necesario el control, monitoreo y mantenimiento del sistema implementado (protecciones, puestas a tierra, equipos, red), de tal manera que se puedan ajustar o mejorar las soluciones, se mantenga la implementación en óptimas condiciones y se puedan inferir conclusiones confiables sobre la solución.

Estas tres fases de la metodología pueden tardar varios años y sus costos son relativamente altos. Pero, ante un problema crónico, como es el caso de la falla de transformadores de distribución, esta metodología resulta mucho más económica en el mediano y largo plazo que la solución a corto plazo, coyuntural y puntual como, generalmente, se atacan este tipo de problemas de ingeniería en Colombia.

A continuación se describe la manera como se desarrolló, implementó y se continúa aplicando la metodología propuesta en la solución al problema de

falla de transformadores de distribución para la Empresa de Energía de Bogotá (hoy Codensa).

Diagnóstico integral

Evaluación de estudios y soluciones previas

Para el circuito experimental de propiedad de la EEB (hoy Codensa) localizado en la vereda de Guachipay (Cundinamarca), se analizaron 26 estudios relacionados con falla de transformadores de distribución, realizados en Colombia por firmas consultoras, empresas de energía y universidades entre 1975 y 1996.

Los 26 estudios se clasificaron en cinco grupos así: selección de protecciones; análisis de descargas eléctricas atmosféricas; fabricación, selección y manejo de transformadores; análisis de fallas, coordinación de aislamientos y modelos.

Un aspecto común de los 26 estudios es que ninguno planteó índices de supervisión de la solución y tampoco se hizo un seguimiento de corto y mediano plazo, mediante monitoreo y control a la solución planteada, ni relación costo/beneficio de la solución.

Análisis causa-efecto

La falla de un transformador de distribución se presenta por la interacción de diversos factores, los cuales lo deterioran en mayor o menor grado, hasta conducirlo a la falla definitiva. Una de las herramientas de análisis más útiles para procesos de este tipo es el diagrama de causa-efecto, también conocido como diagrama de Ishikawa (véase figura 17), el cual permite observar las interacciones entre los diferentes factores involucrados y dar orientación sobre alternativas tecnológicas de solución.

Descripción del diagrama causa-efecto para falla de transformadores

Para elaborar el diagrama causa-efecto se siguieron los siguientes pasos:

- Se identificaron todos los factores relevantes, mediante consulta de la bibliografía existente y su posterior discusión con ingenieros expertos en el tema.
- Se determinaron los subsistemas componentes del sistema que intervienen en la falla de transformadores (transformador, carga, red y entorno) véase figura. 16.
- Se elaboró un diagrama (figura 17) que caracteriza cada subsistema del sistema.

- Se escogieron los elementos propios de cada subsistema, teniendo en cuenta cuáles son susceptibles de *innovación tecnológica* y cuáles solamente pueden ser objeto de un *seguimiento*.



Figura 16.
Componentes del sistema que intervienen en la falla de transformadores.

El sistema eléctrico de distribución para análisis se descompone, de acuerdo con la figura 16, en:

- El *transformador*, que se descompone a su vez en un subsistema que involucra:
 - Diseño (bobinas, núcleo, accesorios, tanque, nivel de aislamiento - BIL)
 - Proceso de construcción del transformador
 - Operación y mantenimiento del transformador
 - La *red*, al igual que el transformador, se descompone en:
 - Diseño:
 - Civil (configuración, ruta, estructuras)
 - Eléctrico: Protecciones (descargadores de sobretensión, cortacircuitos, etc.)
 - Parámetros (potencia, tensión, regulación, etc.)
 - Nivel de aislamiento (BIL)
 - Puesta a tierra
 - Proceso de construcción de los elementos previamente diseñados (civil y eléctrico)
 - Operación y mantenimiento de la red en su conjunto (protecciones, estructuras y puesta a tierra)
 - La *carga*, que se considera un subsistema compuesto por:
 - Planeación por parte de la Empresa de Energía, en la cual se tienen en cuenta parámetros eléctricos (potencia, tensión, regulación)
 - Operación por parte del usuario, regulada por la empresa suministradora de energía.
 - El *entorno* del sistema, que se considera compuesto por:
 - Fenómenos naturales que intervienen en la falla (descargas eléctricas atmosféricas, viento, vegetación, etc.)

- Fenómenos no naturales (contaminación, errores humanos, vandalismo).

Un análisis del diagrama causa - efecto y de los 26 estudios realizados hasta la fecha muestran que la falla de transformadores ha tratado de solucionarse modificando únicamente los elementos que componen la red, como son las estructuras, las protecciones, la puesta a tierra, los aislamientos, pero no el transformador en sí.

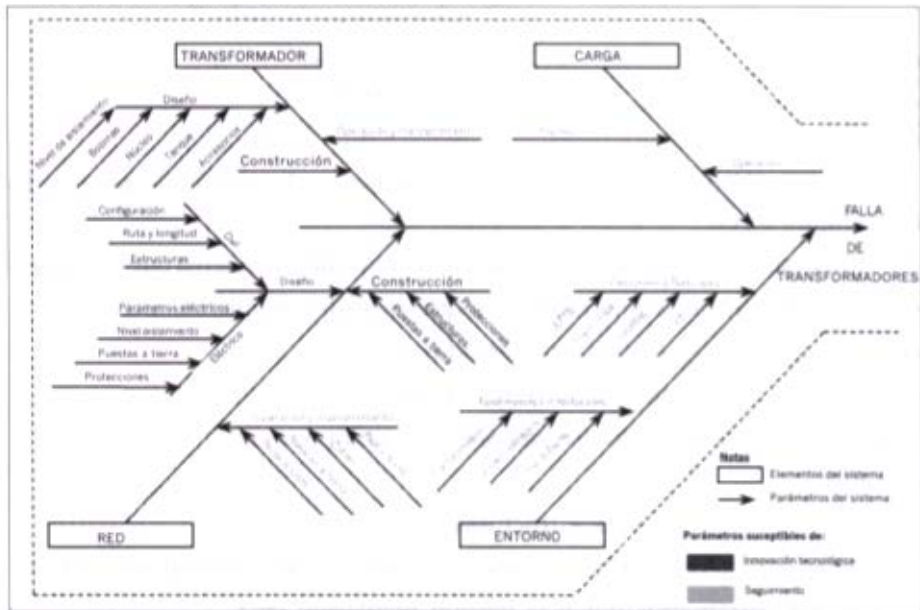


Figura 17. Diagrama de causa-efecto para análisis de falla de transformadores.

Caracterización del entorno

En los estudios sobre descargas eléctricas atmosféricas realizados por el Programa de Investigación PAAS-UN desde hace más de 18 años, se ha encontrado que Colombia, por su ubicación geográfica en zona tropical, presenta variaciones en las magnitudes de los parámetros de rayos respecto a las de otras latitudes.

Con base en los datos obtenidos hasta el momento de algunos parámetros del rayo, como son la corriente y la densidad de rayos a tierra, se elaboró una matriz de riesgo por rayos⁴, la cual indica que en Colombia existen zonas de alto, moderado o medio y bajo nivel de riesgo.

La figura 18, por ejemplo, presenta el mapa de riesgo por rayos para la zona del departamento de Cundinamarca, que cubre la actual empresa Codensa. Su distribución, como se puede observar, no es homogénea y presenta zonas de alto riesgo

4 El concepto de riesgo por rayos hace parte de la Norma técnica colombiana NTC 4552.

por rayos en el noroeste, municipio de La Palma, en donde se escogió un circuito piloto experimental para aplicar la metodología propuesta.

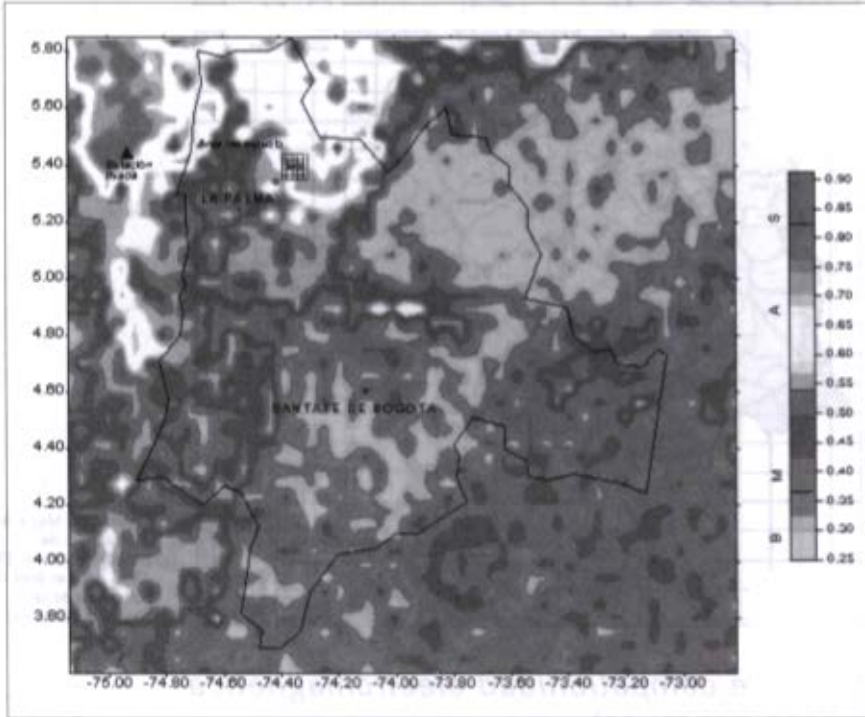


Figura 18. Mapa de índices de riesgo por rayos, 1997, para el departamento de Cundinamarca⁵.

Una evaluación de la información disponible en la antigua Empresa de Energía de Bogotá EEB sobre fallas de transformadores nos muestra resultados altamente correlacionados entre las zonas de alta mortalidad de transformadores y alto riesgo por rayos, tal como se presenta en el mapa de mortalidad de transformadores (figura 19).

Esta observación planteó la necesidad de estudiar con más profundidad los diseños, el modelamiento, mantenimiento, operación, manipulación y relación del transformador con el entorno electromagnético.

⁵ Datos del Sistema de información de descargas de interconexión eléctrica S.A., ESP-ISA.

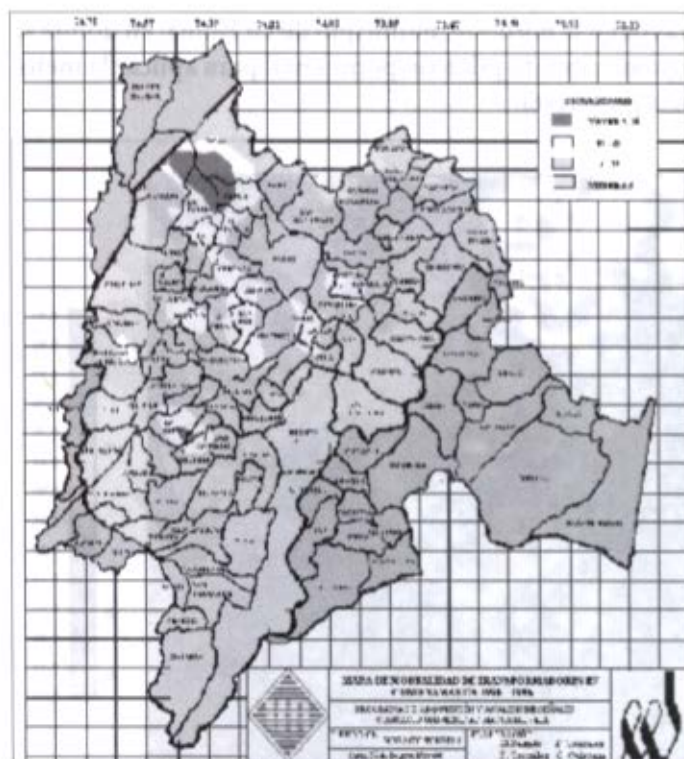


Figura 19. Mapa de mortalidad de transformadores 1995-1996 para el área de cobertura de la empresa Codensa.

Zonas de compatibilidad electromagnética (riesgo por rayos)

De acuerdo con la Norma IEC 61000-3, la compatibilidad electromagnética, CEM, se define como la capacidad de un equipo o sistema eléctrico o electrónico para operar satisfactoriamente en su entorno electromagnético. Operar satisfactoriamente significa no introducir perturbaciones intolerables en ese ambiente o en otros equipos y soportar las producidas por el ambiente electromagnético u otros equipos o sistemas.

Los parámetros de diseño de la mayoría de equipos eléctricos y electrónicos han sido estimados en latitudes no tropicales. Sin embargo, a escala local, entorno tropical, las condiciones particulares de operación de los mismos no siempre coinciden con las condiciones para las cuales fueron diseñados; es decir, no se tiene en cuenta el ambiente electromagnético en el que van a operar. Un mejor conocimiento (caracterización) de las exigencias propias del ambiente electromagnético existente en el medio tropical colombiano puede

cuantificar los niveles de perturbación y la interacción entre fuentes y receptores (el medio y los equipos o sistemas).

Dicha caracterización conduce al planteamiento de zonificar el fenómeno de la perturbación de las descargas eléctricas atmosféricas, determinando zonas de compatibilidad electromagnética, para llegar al planteamiento de cambios en el diseño de equipos y en las normas de construcción de una empresa, que posteriormente pueden llevarse a normas técnicas nacionales.

Índices para evaluación

Como un elemento del diagnóstico y seguimiento se estudiaron, para los transformadores de la EEB, doce índices de fallas, de los cuales se presentan tres de los más relevantes en las figuras 20 a 22.

Figura 20. Porcentaje por mes de transformadores fallados.

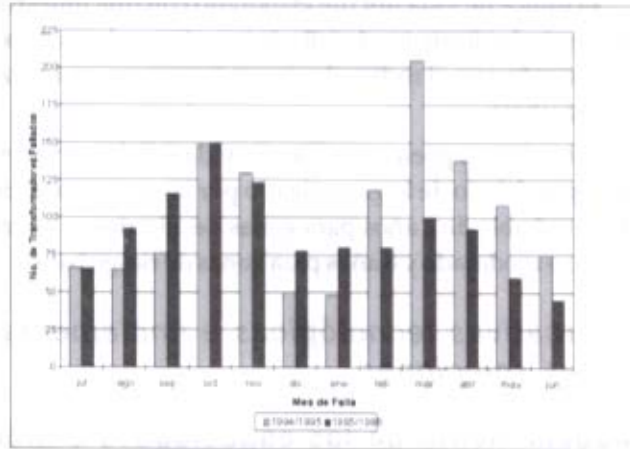
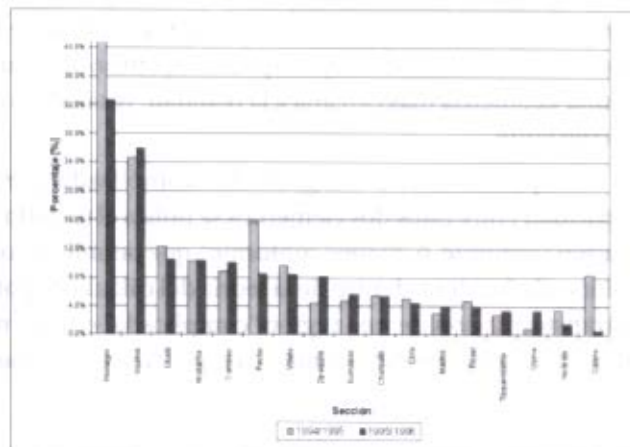


Figura 21. Porcentaje de transformadores fallados (Tf)/transformadores instalados (Ti) por región.



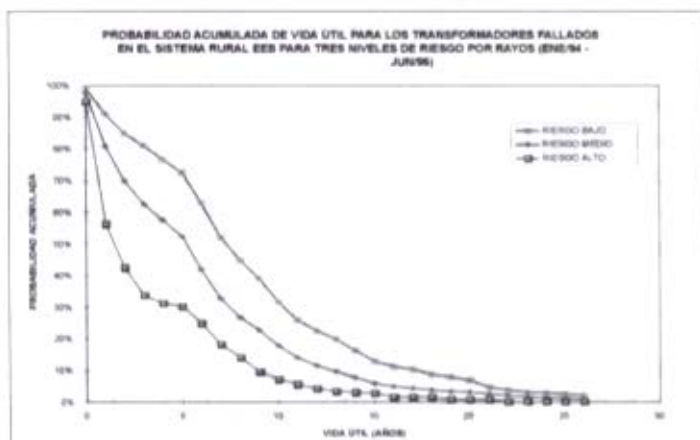


Figura 22. Probabilidad acumulada de vida útil de los transformadores de distribución.

El índice de vida útil fue elaborado con una muestra de 2500 transformadores, según los formatos de falla de transformadores de la antigua EEB. Se dividió, de acuerdo con el índice de riesgo por rayos, en tres zonas: alto, moderado o medio y bajo.

Estas curvas presentan años de vida útil de transformadores de distribución muy por debajo de lo garantizado por las empresas fabricantes, con valores del 50% probable de 2 años para zonas de alto riesgo por rayos, 6 años para riesgo medio o moderado y 8 años para zonas de riesgo bajo.

Alternativas tecnológicas e implementación de las soluciones

Modelamiento de las capacidades e inductancias

Debido a que la sección transversal de las bobinas de los transformadores de distribución no es circular, se aproxima, entonces, a una sección elíptica, que es una geometría más cercana a la realidad, resaltando que el foco no permanece constante.

La elipse es todavía una geometría complicada; por tanto, para encontrar la capacidad entre estos dos elementos se utiliza el método matemático de transformación conforme, o "mapeo conforme", que permite la solución de problemas con valor en la frontera, dentro de la teoría del cálculo de potencial. Con ello se logra la transformación de una región "complicada" en otra más sencilla en el nuevo plano, haciendo uso del axioma: "La capacidad es invariante bajo una transformación conforme".

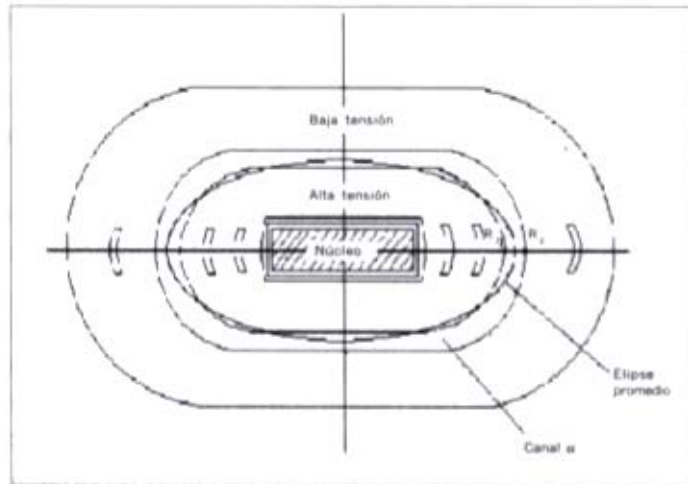


Figura 23. Forma elíptica de la bobina de los transformadores de distribución.

La expresión deducida parte de dos elementos elípticos de espesor infinitesimal, confocales y de radios mayores R_1 y R_2 . Haciendo dos transformaciones sucesivas a la región entre estas dos elipses se llega a la expresión de la ecuación:

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon \cdot l}{\text{arcosh}(R_2/c) - \text{arcosh}(R_1/c)} \quad [F]$$

donde:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\epsilon_0 = \text{Permitividad vacío} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

$$\epsilon_r = \text{Permitividad relativa de dieléctrico}$$

$$l = \text{Altura del devanado} \quad [\text{m}]$$

$$R_1 = \text{Semieje mayor de la curva 1} \quad [\text{m}]$$

$$R_2 = \text{Semieje mayor de la curva 2} \quad [\text{m}]$$

$$c = \text{Coordenada del foco} \quad [\text{m}]$$

Para el cálculo de las capacidades del transformador trifásico es más sencillo emplear un método numérico, como el de simulación de cargas, ya que la configuración física es más compleja que la de uno monofásico, lo que dificulta el empleo del método analítico anteriormente expuesto.

El método de simulación de cargas, MSC, consiste en la representación de un número de cargas ficticias colocadas en forma discreta dentro de un electrodo, en el cual se describen los efectos electrostáticos (potencial en la superficie y en el área

circundante) producidos por las cargas continuas que realmente se encuentran en el electrodo.

Las cargas deben distribuirse uniformemente dentro del electrodo, siguiendo la geometría de su contorno, para que los efectos producidos se asemejen a los reales.

Debido a su naturaleza discreta, el MSC requiere una buena selección del número de cargas además de una adecuada colocación, con el fin de obtener una precisión satisfactoria.

Dependiendo de la forma y la configuración del electrodo se escoge el número, la ubicación y el tipo de las cargas, que pueden ser puntuales, lineales, circulares o superficiales. Para cada grupo de capacidades se escogió el tipo de carga que facilitase el cálculo de acuerdo con la geometría de la configuración.

Las expresiones de cálculo de inductancia reportadas en la literatura se aplican a devanados de sección circular. Cuando la geometría del devanado no presenta una simetría cilíndrica, ella no permite evaluar de una forma confiable el valor de la inductancia, siendo necesario plantear nuevas expresiones para su cálculo.

El punto de partida para el cálculo es la ecuación de Neumann, la cual expresa la inductancia mutua entre dos elementos circulares en el espacio libre, separados una distancia (d) en el espacio. Planteando esta ecuación en términos matemáticos, utilizando los radios equivalentes r_1, r_2 de las elipses parametrizadas en función de un ángulo ψ , se obtiene una expresión que representa la inductancia mutua entre dos elementos elípticos.

Generalizando la ecuación hallada para dos devanados de longitudes l_1 y l_2 con N_1 y N_2 espiras respectivamente, con una distancia de separación entre las dos capas igual a cero (para bobinas coaxiales), encontramos la ecuación:

$$M = \mu_0 N_1 N_2 \int_{-l_2/2}^{l_2/2} \int_{-l_1/2}^{l_1/2} \int_0^\pi \frac{r_1 r_2 \cos \psi' d\psi' dz_1 dz_2}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos \psi'}}$$

con:

N_1, N_2 = Número de espiras por unidad de longitud de cada uno de los devanados en la dirección axial

ψ' = Ángulo de azimut

Un caso especial de esta expresión ocurre cuando se desea encontrar la inductancia propia de un devanado, cumpliéndose:

$$N_1 = N_2 = N$$

$$r_1 = r_2 = r$$

$$2l_1 = 2l_2 = h$$

de lo cual resulta:

$$L = \mu_0 N^2 \int_0^h \int_0^h \int_0^\pi \frac{a^2 b^2 \cos \psi'}{a^2 + (b^2 - a^2) \cos^2 \psi'} \frac{d\psi' dz_1 dz_2}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2 + \frac{2a^2 b^2 (1 - \cos \psi')}{a^2 + (b^2 - a^2) \cos^2 \psi'}}$$

a y b = Semiejes mayor y menor, respectivamente, de la elipse promedio del devanado

N = Número total de espiras del devanado por unidad de longitud

Los parámetros de todos y cada uno de los transformadores diseñados y construidos fueron medidos en laboratorio y comparados con los modelos matemáticos desarrollados para el EMTP/ATP. Los resultados de más de 50 transformadores probados en laboratorio y modelados en el EMTP/ATP durante cinco años muestran una muy buena correlación entre los valores obtenidos con el modelo matemático del transformador de distribución y los obtenidos en la medición, con errores que no superaron el 10%.

Una muestra de estos resultados de valores calculados y medidos de inductancias y capacidades se presentan en las tablas 16 y 17.

Tabla 16.
Valores de capacidades e inductancias calculadas y medidas para transformadores monofásicos.

Bobina	Cg HV(pF)	Cg.LV(pF)	C _{A_B} (pF)	L.HV:(mH)	L.LV:(mH)
Valor calculado	471.2	621.8	897.1	662.9	305.8
Valor medido	424.0	649.0	817.0	468.5	268.8

Tabla 17.
Valores de capacidades e inductancias calculadas y medidas para transformadores trifásicos.

Bobina	Cg .HV(pF)	Cg.LV(pF)	CA1_B1(pF)	CB1_B2(pF)	LHV(mH)	LLV(mH)
Valor calculado	317	192	784.5	126	653	341
Valor medido	340	215	744	99	580	435

Modelamiento en el EMTP/ATP

El programa digital para análisis de transitorios electromagnéticos (EMTP/ATP) permite, con la ayuda de un adecuado modelamiento, la predicción del comportamiento de los sistemas eléctricos en condiciones de estado estacionario o en condiciones de estado transitorio.

En esta investigación, el EMTP/ATP fue utilizado para evaluar el comportamiento del sistema en cuanto a sobretensiones presentes en la red, los transformadores, los descargadores de sobretensiones y la carga, cuando se presentan impactos de rayos sobre la red de distribución, dependiendo de los diferentes tipos de transformadores instalados.

Evaluación del pulso transferido

Durante cinco años se desarrollaron los modelos matemáticos de los transformadores de distribución fabricados en Colombia. Para el cálculo de las capacidades se usaron ecuaciones basadas en métodos electromagnéticos o por medio del método de simulación de cargas. Para los transformadores mono y trifásicos, la inductancia propia fue calculada por medio de una expresión analítica derivada de consideraciones de campos electromagnéticos.

Para la implementación computacional del modelo matemático del transformador de distribución se utilizó el módulo "Transformer" del programa EMTP/ATP, que permite incluir las capacidades y la curva de saturación. Se desarrollaron tres modelos para cada tipo de transformador, cada uno de los cuales permite representar el comportamiento del transformador ante señales de media, baja y alta frecuencia (60 Hz hasta impulsos tipo rayo).

Con la ayuda del modelo del transformador para altas frecuencias desarrollado para el EMTP/ATP (figura 24), las mediciones realizadas sobre los diferentes tipos y potencias de transformadores y cálculos teóricos, se elaboraron los modelos ma-

temáticos de todos y cada uno de los tipos y potencias de transformadores, con el objetivo de evaluar el fenómeno de tensiones transferidas entre el devanado de alta tensión y el de baja tensión y, de esta manera, determinar cuál es la mejor configuración para el mismo.

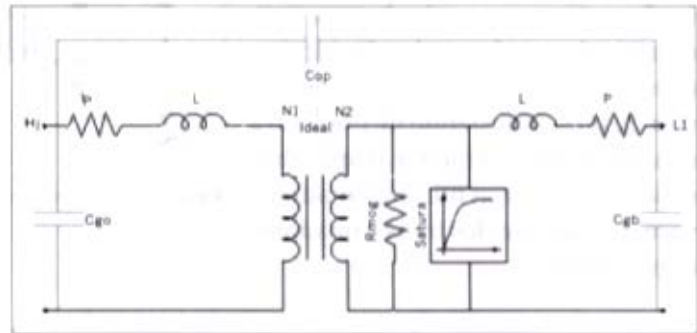


Figura 24. Modelo del transformador para altas frecuencias.

donde:

- C_{ga} = Capacidad a tierra devanado de alta tensión
- C_{gb} = Capacidad a tierra devanado de baja tensión
- C_{ab} = Capacidad entre devanados
- R, L = Resistencia e inductancia propias de los devanados
- R_{mag} = Resistencia de magnetización

Satura = Curva de magnetización del transformador (subrutina del ATP)

El objetivo de las simulaciones que se presentan a continuación fue el de comparar el comportamiento del transformador que hemos denominado "prototipo nuevo diseño", con el de los transformadores de diseño estándar.

Para tal fin se escogieron los siguientes tipos de transformadores:

1. Transformador de diseño estándar, BIL 95 kV. Construcción baja contra núcleo (que se llamará de ahora en adelante Tipo 1).
2. Transformador de diseño estándar, BIL 95 kV. Construcción alta contra núcleo (que se llamará de ahora en adelante Tipo 2).
3. Transformador de diseño estándar. BIL 150/45 kV. Construcción baja contra núcleo (que se llamará de ahora en adelante Tipo 3).
4. Transformador "Prototipo nuevo diseño", (que se llamará de ahora en adelante Tipo 4).

Las simulaciones se realizaron comparando los transformadores individualmente, con base en el pulso transferido a partir de ondas paso unitario e impulso, a un montaje como el que se muestra en la figura 25.

Se varió la amplitud del paso desde 10 V hasta 100,000 V y se obtuvieron las curvas presentadas en la figura 26, para cada uno de los cuatro tipos de transformadores. Como se puede observar fácilmente, el transformador "prototipo nuevo diseño" presenta valores de tensión de pulso transferido de primario a secundario 4 veces menor al tipo fabricación estándar con BIL aumentado y 6 veces menor para los transformadores tipo estándar.

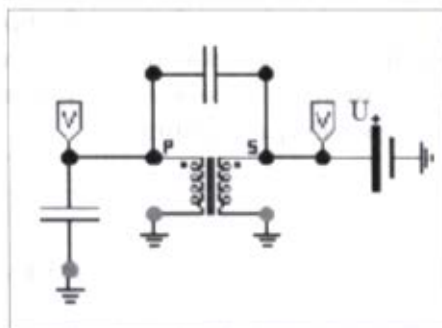


Figura 25. Modelo de transformador para análisis de pulso transferido.

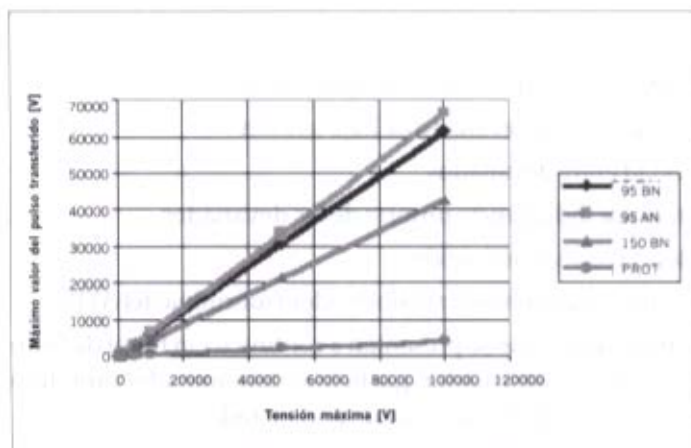


Figura 26. Pulso transferido para cuatro tipos de transformadores (onda paso).

Una muestra de las formas de onda del pulso transferido se muestra en la figura 27.

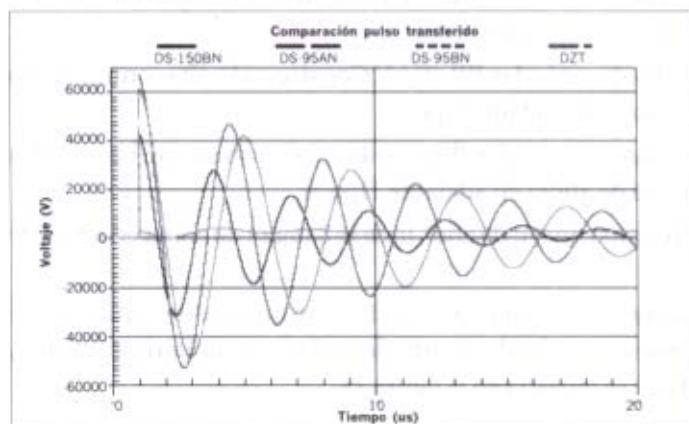


Figura 27. Curvas de tensiones de pulso transferido en los cuatro tipos de transformadores analizados, para ondas tipo paso.

Para impulsos tipo rayo de onda 1.2/50 se utilizó un montaje como el que aparece en la figura 28.

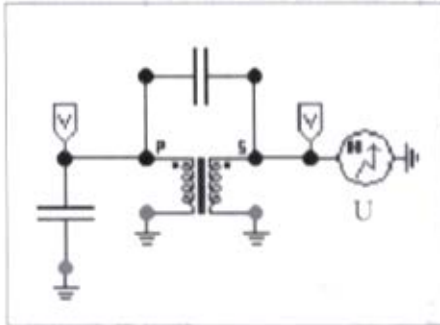


Figura 28. Modelo de transformador para análisis de pulso transferido.

La fuente de tensión utilizada para simular el impulso se obtuvo mediante la ecuación de Heidler. Se varió la magnitud del impulso desde 10 V hasta 100,000 V y se obtuvieron las curvas de tensión presentadas en la figura 29. Los resultados comparativos entre transformadores tipo estándar y "prototipo nuevo diseño" son similares a los presentados en el ítem anterior.

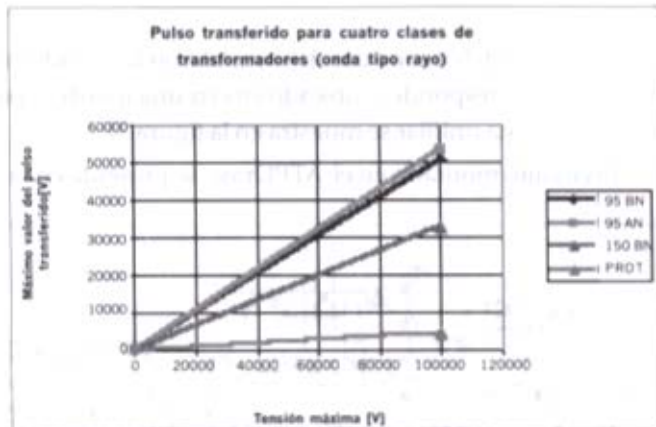


Figura 29. Pulso transferido para cuatro tipos de transformadores.

Una muestra de las formas de onda del pulso transferido se presenta en la figura 30.

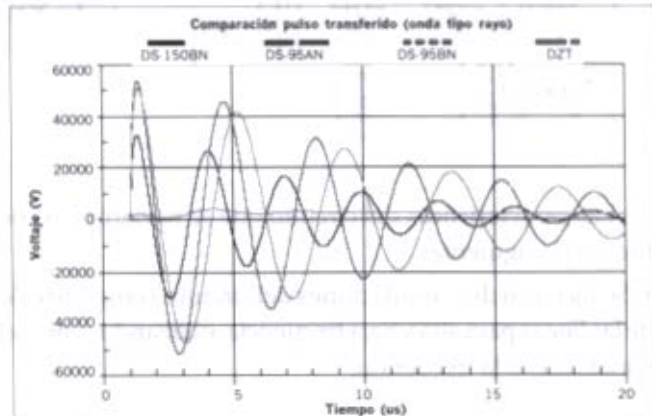


Figura 30. Curvas de tensiones de pulso transferido en los cuatro tipos de transformadores analizados, para ondas tipo 1.2/50.

Luego de la simulación individual de cada uno de los transformadores, se procedió a simular cada uno de los componentes del sistema (descargadores de sobretensión, puestas a tierra, líneas) y completamente el circuito experimental.

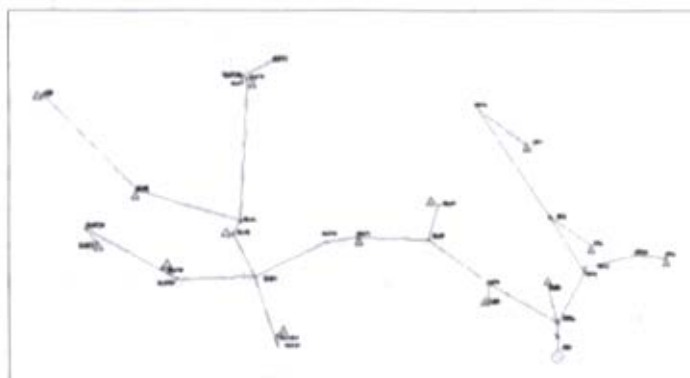


Figura 31. Diagrama unifilar del circuito experimental de Guachipay.

El modelo del circuito donde se instalaron los transformadores "prototipo nuevo diseño" corresponde al ubicado en el municipio de Topaipí, vereda Guachipay, cuyo diagrama unifilar se muestra en la figura 31.

El circuito montado en el ATPDraw se presenta en la figura 32.

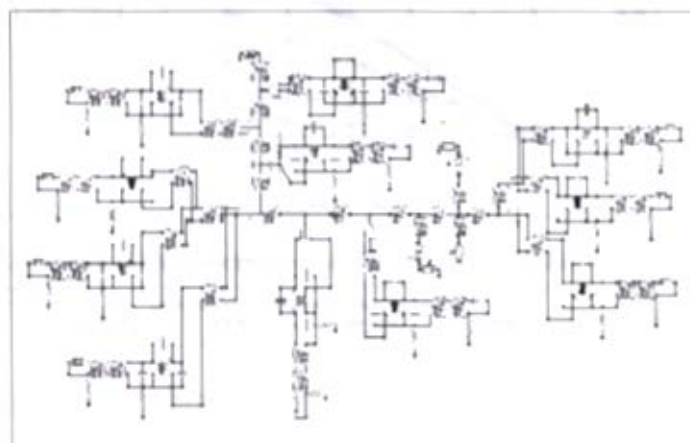


Figura 32. Circuito experimental montado en el ATPDraw.

Las características del circuito que se tuvieron en cuenta para la simulación fueron las siguientes:

- Se hicieron dos simulaciones del circuito completo calculando los parámetros de las líneas para alta y baja frecuencia, utilizando el modelo JMarti de parámetros variables con la frecuencia.

- Las estructuras que se utilizaron son de 12 m de altura y una separación entre conductores de 6 m en alta tensión. En baja tensión se simularon líneas monofásicas de 100 m de longitud y una separación de 40 cm entre los conductores.
- La resistividad del suelo se asumió de 500 Ωm constante en todos los sitios de la red.
- Los transformadores trifásicos conectados en la red se asumen de diseño estándar para todas las simulaciones.
- Se asumió que las cargas conectadas a cada una de las fases estuvieran aproximadamente balanceadas.
- La carga conectada a cada uno de los transformadores es igual a la que se colocó en las simulaciones del pulso transferido.

Las simulaciones que se realizaron son de eventos típicos que ocurren en las redes de distribución en zonas de alta actividad de rayos. Para cada uno de los casos se obtuvo la tensión en el lado de baja tensión del transformador ubicado en el nodo GUA5 y conectado entre las fases A y B. Los resultados de las simulaciones presentan valores de pulsos transferidos en los transformadores "prototipo nuevo diseño", muy por debajo de los valores de pulso transferido de los transformadores tipo estándar, ante descargas tipo rayo en una de las fases, como era de esperarse de acuerdo con los resultados de los modelamientos individuales. Durante los tres años que le hemos hecho seguimiento al circuito experimental de Guachipay, el resultado ha sido similar a lo modelado. Se ha logrado disminuir la tasa de falla de transformadores en este circuito de 50%, anterior a la instalación de los transformadores "prototipo nuevo diseño", a 0% en 1998, a 7% en 1999 y a 0% en el año 2000, con más de 130 descargas presentadas a menos de 100 metros del circuito.

Pruebas de laboratorio y campo

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de los elementos que componen el sistema de distribución rural de EEB (hoy Codensa), se realizaron pruebas de norma, así como pruebas especiales (fuera de norma, en las cuales se llevaron los elementos a condiciones de falla) en el Laboratorio de alta tensión de la Universidad Nacional de Colombia.

Los elementos ensayados fueron los siguientes:

- Cortacircuitos
- Aisladores
- Componentes de la estructura: aisladores, cortacircuitos y cruceta
- Descargadores de sobretensión y fusibles

- Transformadores

Los resultados obtenidos de las pruebas muestran que, en general, los elementos ensayados cumplen con los valores establecidos en las normas en lo referente a los niveles de aislamiento para condición normal y contingencia.

Respecto al circuito experimental de Guachipay se hizo limpieza de servidumbres y modificaciones de las protecciones empleadas, haciendo un estricto control sobre las variables involucradas (incluidos los procesos de transporte y montaje), de manera que los resultados de las soluciones pudieran atribuirse directamente a éstas y no a otros factores externos a ellas.

Se diseñó e implementó un nuevo diseño del sistema de puesta a tierra (figura 33), el cual ha garantizado no solamente un valor bajo (menor a 10Ω), sino también que se mantenga estable en el tiempo para las diferentes condiciones climáticas permitiendo así la correcta operación de los descargadores de sobretensión.

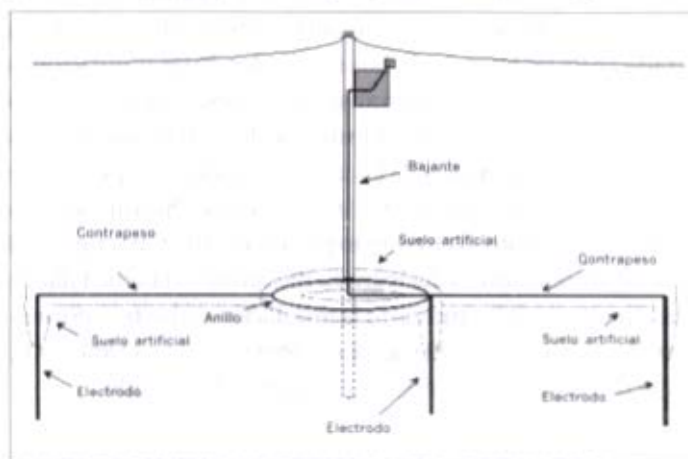


Figura 33. Nuevo diseño del sistema de puesta a tierra.

Control y monitoreo de variables

Ninguna inferencia o conclusión puede ser válida en la solución de un problema de ingeniería, si previamente no se ha tenido en cuenta el control del mayor número de variables involucradas. Para ello implementamos las siguientes actividades:

Puestas a tierra

Se realizaron mediciones de la puesta a tierra de cada uno de los transformadores instalados en el circuito piloto experimental de Guachipay antes y después del mejoramiento. Además, se han realizado tres seguimientos con el fin de verificar

que los valores en los cuales se dejaron las puestas a tierra se mantengan, como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18.
Valores de puesta a tierra [Ω] en transformadores y seguimiento en el circuito piloto experimental de Guachipay.

Transformador	$R_{inicial}[\Omega]$	Dic. 97	Mar. 98	May. 98	Sep. 98	Mar. 99
<i>Insp. Naranjal</i>	1088	3.30	2.56	2.33	206.00	2.02
<i>Ac. Naranjal</i>	158	17.70	17.99	10.04	6.97	11.58
<i>Jaime Ariza</i>	140	12.94	10.46	8.00	8.81	8.39
<i>Mard. Prieto</i>	107	6.84	7.08	6.35	10.40	7.54
<i>Ana de Torres</i>	231	11.80	10.81	10.41	10.67	9.65
<i>Pablo Bustos</i>	77	9.30	8.51	7.47	8.79	8.93
<i>Ant. Gaitán</i>	271	8.32	7.21	7.15	6.92	7.15
<i>Enr. Bustos</i>	208	11.45	11.81	10.49	11.61	10.47
<i>Reyes Anzola</i>	88	3.52	5.44	3.5	3.61	4.02
<i>Fid. Bustos</i>	225	5.31	5.12	5.19	5.39	4.88
<i>Mel. Virgúez</i>	15	6.94	4.77	5.3	4.48	5.81
<i>Ant. Álvarez</i>	262	-	-	-	11.73	14.04
<i>Marc. Olivares</i>	301	-	-	-	18.32	18.35
<i>Julio Beltrán</i>	260	-	-	-	23.13	21.25

Servidumbre

Con el fin de evitar las fallas de alta impedancia, se hizo una limpieza de la servidumbre de la línea del circuito piloto experimental y, en cada uno de los seguimientos, se ha verificado la ausencia de vegetación cercana a la red.

Descargas eléctricas atmosféricas en la zona

A partir de la instalación de los transformadores "prototipo nuevo diseño", se ha venido realizando un monitoreo de la actividad eléctrica (descargas nube-tierra) en el circuito piloto experimental de Guachipay, para poder evaluar la incidencia de descargas y, en caso de falla, si el origen fue una de ellas.

El circuito tiene una longitud aproximada de 7.5 km y está comprendido dentro de un área de 6 km x 3 km.

Al realizar un análisis temporal de la actividad eléctrica se encontró que las tormentas se presentan en las horas de la tarde y parte de la noche, como se puede apreciar en la figura 34.

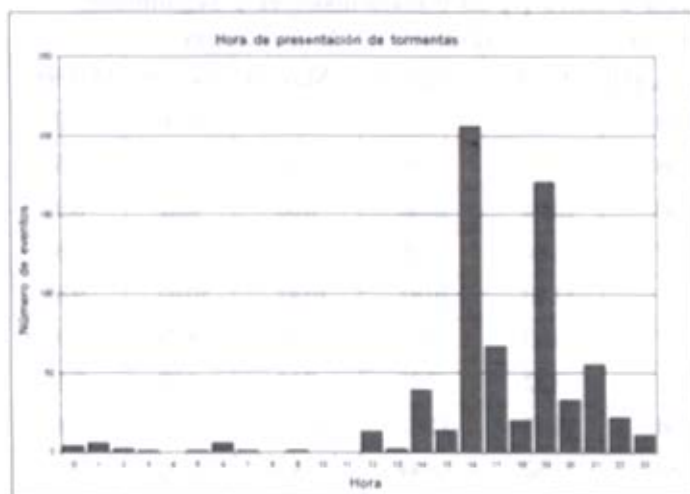


Figura 34. Actividad eléctrica atmosférica horaria en el circuito piloto experimental de Guachipay (Cundinamarca).

Se realizó un filtrado para identificar aquellas descargas que impactaron en un rango de menos de 100 m, alrededor del corredor de la línea, el cual se puede apreciar en la figura 35. La máxima corriente fue de -47.83 kA y 46.02 kA, para descargas negativas y positivas, respectivamente. Haciendo una proyección de los datos tomados hacia todo un año, la densidad de rayos a tierra por kilómetro cuadrado sería de 19 aproximadamente, lo cual es coincidente con los mapas de densidad de la zona. El seguimiento de la actividad eléctrica atmosférica para los años 1999 y 2000 se presentan en las figuras 36 y 37.

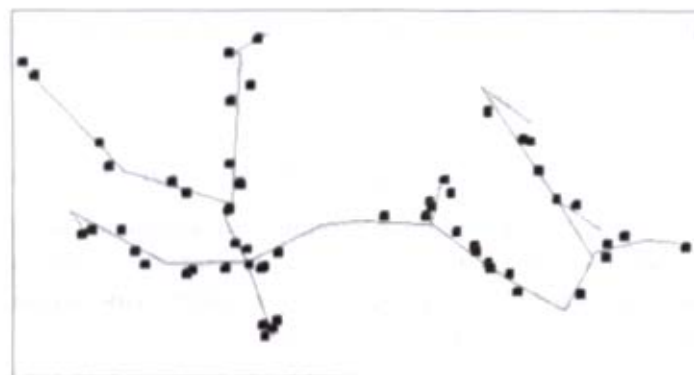


Figura 35. Actividad eléctrica atmosférica (58 descargas) 100 m alrededor del circuito piloto experimental, año 1998.

Figura 36. Actividad eléctrica atmosférica (44 descargas) 100 m alrededor del circuito piloto experimental, año 1999.

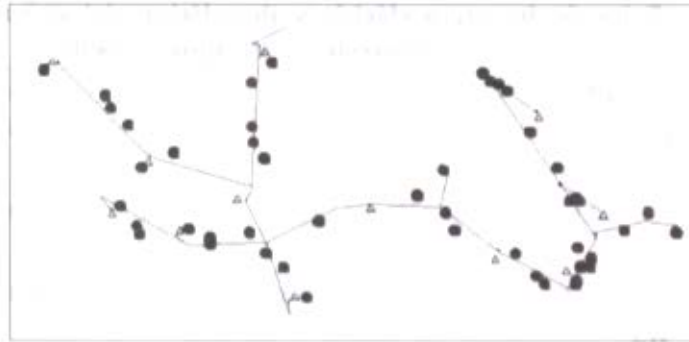
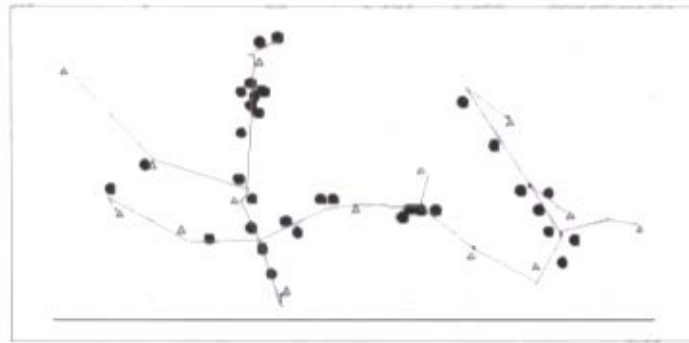


Figura 37. Actividad eléctrica atmosférica (35 descargas) 100 m alrededor del circuito piloto experimental, año 2000.



Casos en el circuito piloto experimental de Guachipay durante tres años

Desde finales de 1997 hasta diciembre de 2001 sólo han sido reportados dos casos de fallas: una salida de una de las líneas del circuito piloto experimental sin falla de ningún transformador y una falla de uno de los transformadores "prototipo nuevo diseño". Los casos se analizan a continuación:

Caso 1

Según conversaciones con el personal de la antigua EEB en la zona, en el circuito piloto experimental de Guachipay se presentó una salida de línea el día 1o. de abril de 1998.

Se realizó una correlación con el sensor de tormentas LLP TSS-420 del PAAS-UN, que arrojó los siguientes resultados:

- Datos coincidentes (en fecha y ángulo entre el sensor y la localización del circuito piloto experimental: 335° con respecto al norte):

**Datos de descargas eléctricas atmosféricas del sensor LLP TSS 420
miércoles 1° de abril de 1998:**

17:15:20.099	335.5	88.5	113	3	-43	3	
17:15:20.099	335.5	88.5	806	-367	1050	-226	1
WS							
20.174	335.6	326.6	2974	-1350	3850	-274	2
WS							
20.687	335.2	116.1	1054	-487	1418	-222	3
WS							
17:19:39.829	336.4	181.4	55	4	-19	3	
17:19:39.829	336.4	181.4	1662	-727	2122	-212	1
WS							
39.955	334.1	191.9	1726	-839	2314	-218	2
WS							
40.012	333.4	198.3	1774	-887	2378	-93	3
WS							
40.134	334.6	262.0	2366	-1126	3210	-167	4
WS							

Teniendo en cuenta la magnitud de campo eléctrico arrojada por el sensor y la distancia aproximada del circuito se puede calcular la corriente pico para cada *stroke*, mediante la utilización del modelo de corriente planteado por Rakov⁶:

$$E = 0.045 \times S$$

donde E es el campo eléctrico vertical en [V/m]

S en unidades LLP (se encuentra resaltado dentro de los datos del sensor)

$$I = 1.5 - 0.037 \times D \times E$$

donde D es la distancia en kilómetros al circuito piloto experimental (88.55 km).

Para cada uno de los *strokes* se calculó la corriente como se muestra a continuación:

$$E = 0.045 \times S = 0.045 \times 88.5 = 3.98 \text{ [V/m]}$$

$$I_{AI} = 1.5 - 0.037 \times D \times E = 1.5 - 0.037 \times 88.55 \times 3.98 = -11.5 \text{ [kA]}$$

6 D. Rondón, W. Briceño, "Modelos de la corriente de retorno del rayo a partir del campo eléctrico vertical", tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1996.

Para los otros dos *strokes* pertenecientes a la primera descarga:

$$I_{A2} = -46.7 \text{ [kA]}$$

$$I_{A3} = -15.62 \text{ [kA]}$$

En el caso de la segunda descarga se tiene:

$$I_{B1} = -25.2 \text{ [kA]}$$

$$I_{B2} = -26.78 \text{ [kA]}$$

$$I_{B3} = -27.74 \text{ [kA]}$$

$$I_{B4} = -37.13 \text{ [kA]}$$

Suponiendo que la forma de onda de estas descargas se asemeja a las de tipo normalizado 8/20 μs , se puede tener un equivalente de aproximadamente el valor pico de cada *stroke* durante los 20 μs con el fin de calcular la constante de energía I^2t como se muestra a continuación:

$$I^2t_{(A1)} = (11.5 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 2.645 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

$$I^2t_{(A2)} = (46.7 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 43.617 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

$$I^2t_{(A3)} = (15.6 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 4.867 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

Para la segunda descarga se tiene:

$$I^2t_{(B1)} = (25.2 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 12.700 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

$$I^2t_{(B2)} = (26.78 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 14.343 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

$$I^2t_{(B3)} = (27.74 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 15.390 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

$$I^2t_{(B4)} = (37.13 \text{ [kA]})^2 \times 20 \text{ [\mu s]} = 27.572 \text{ [A}^2\text{-s]}$$

El paso siguiente fue tomar las curvas de los fusibles entregadas por los fabricantes para, de allí, determinar el valor de la constante I^2t , que corresponde al valor de energía media en el cual opera el fusible.

Para un fusible tipo dual de 3.5 [A] se tiene:

$$4.500 \text{ [A}^2\text{-s]} \quad \text{tiempos cortos (del orden de los 50 milisegundos)}$$

$$7.225 \text{ [A}^2\text{-s]} \quad \text{tiempo medios (del orden del segundo)}$$

$$28.900 \text{ [A}^2\text{-s]} \quad \text{tiempos largos (del orden de los 100 de segundos)}$$

Para uno de 5.2 [A]:

$$10.125 \text{ [A}^2\text{-s]} \quad \text{tiempos cortos}$$

$$14.400 \text{ [A}^2\text{-s]} \quad \text{tiempo medios}$$

$$48.400 \text{ [A}^2\text{-s]} \quad \text{tiempos largos}$$

Como se puede verificar –y teniendo en cuenta que las descargas subsecuentes (*return strokes*) ocurren con diferencias muy cortas entre una y otra (del orden de

los 100 ms), lo cual no permite que la energía entregada al elemento, en este caso el fusible, se disipe-, en cualquiera de los casos se tendría que la energía entregada supera la capacidad de los fusibles y, por tanto, ocasionaría la fusión del elemento fusible. Este resultado estaría en concordancia con la salida de línea ocurrida en el circuito el día 1° de abril.

Adicionalmente, se introdujeron los valores de corriente de rayo calculados al modelo teórico del circuito piloto experimental, para estimar las sobretensiones que se presentarían.

De acuerdo con los cálculos desarrollados, se efectuó una simulación en el transformador más cercano a la incidencia de esta descarga, encontrándose un valor de tensión en el lado de alta de 33 kV con una correcta operación del descargador de sobretensión y, en baja tensión, un valor de 15.2 kV de sobretensión. Cabe anotar que el transformador es de BIL 150/45 kV; por tanto, con estas magnitudes sus aislamientos soportaron el impulso.

Caso 2

En febrero del año 1999 se presentó la falla de uno de los transformadores "prototipo nuevo diseño", el cual fue llevado a los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia, desencubado y analizado. El diagnóstico, de acuerdo con el informe presentado, se debió a cortocircuito entre espiras y entre la bobina de baja tensión, produciendo fundición, deformación y goteo del cobre. Según diagnóstico, basado en el análisis de la bobina y datos de actividad de rayos en la zona durante febrero, la falla fue del aislamiento interno, no originada por rayos.

El transformador de distribución "prototipo nuevo diseño" compatible y óptimo para zonas de alto riesgo por rayos

Siguiendo con la metodología planteada al inicio del documento, y en conjunto con empresas fabricantes de transformadores y empresas de energía, durante los últimos cuatro años se ha llevado a cabo el diseño, construcción y puesta en operación de transformadores "prototipo nuevo diseño", que sean compatibles y óptimos para zonas de alto riesgo por rayos.

Como fruto de las experiencias con el circuito piloto experimental de Guachipay y la Estación experimental de medición de rayos (Ilyapa) de la Universidad Nacional de Colombia, PAAS-UN, ubicada en el municipio de Samaná, Caldas, los siguientes son, en resumen, los ocho criterios básicos que hay que tener en cuenta para la óptima operación del transformador de distribución "prototipo nuevo diseño":

1. *Mayor robustez*: incremento del BIL del transformador
2. *Reducción del pulso transferido*: diseño bobina-núcleo
3. *Fácil manipulación*: modificación de los soportes mecánicos para transporte en zonas de difícil acceso
4. *Mejoramiento de las protecciones*: descargadores en AT y BT, autoprotección (CSP), protecciones adicionales en red, si es necesario
5. *Manipulación e instalación adecuada*: exigencia a los fabricante de un buen vacío y mínimo 12 horas de reposo antes de la energización
6. *Mejoramiento de puestas a tierra*: puestas a tierra de bajo valor óhmico
7. *Monitoreo y mantenimiento permanente del sistema-entorno* (red, protecciones, transformador, puestas a tierra, vegetación)
8. *Evaluación de la relación costo/beneficio*

Evaluación de la relación costo/beneficio

Respecto al último criterio, hemos evaluado la relación costo/beneficio para los transformadores instalados en el circuito piloto experimental de Guachipay. Hemos considerado el caso más desfavorable, es decir, un costo del transformador "prototipo nuevo diseño" 1.5 veces el costo de un transformador estándar. Hoy en día el costo del transformador "prototipo nuevo diseño" depende de varios aspectos, como el fabricante y el número de unidades para adquirir, pero puede llegar a tener un costo igual al de un estándar. Adicionalmente, el haber considerado un costo de 1.5 veces se hizo sobre la base de la construcción de un solo transformador; sin embargo, por economía de escalas, el costo disminuirá en la medida en que se construyan cientos o miles de los mismos. Los resultados obtenidos para el caso más desfavorable son los siguientes:

Se consideró un horizonte de tiempo de 10 años con una cantidad de 100 transformadores instalados en el año cero, un crecimiento anual de la demanda del 2%. Se estimó un valor unitario de 1000 para un transformador de diseño estándar y de 1.500 en el caso del transformador "prototipo nuevo diseño", para una potencia media de 15 k VA.

Los costos del "prototipo nuevo diseño" (1500) incluyen: costos de fabricación (CSP, protección por baja tensión, BIL mejorado en alta y baja tensión, adecuación de tanque, mejoramiento de tierras y limpieza de servidumbre). No se tiene en cuenta el costo de mano de obra por cambio del transformador. Este costo sería a favor de los costos del "prototipo nuevo diseño", pues tendría una vida útil mayor, y por tanto menor número de cambios.

Otro costo a favor del "prototipo nuevo diseño" es el aumento en la confiabilidad del sistema eléctrico de los circuitos que se implementen con este transformador, sobre todo ante las nuevas exigencias sobre calidad del servicio de energía eléctrica, según lo cual, a partir del año 2000 los indicadores DES y FES (resoluciones CREG: 070-98, 025-99 y 096-00) implican costos para el operador de red que no cumpla con estos indicadores de confiabilidad.

Se asumió que tanto las unidades falladas como las nuevas requeridas para satisfacer el crecimiento de la demanda se remplazarían con transformadores "prototipo nuevo diseño".

En la estimación de la cantidad de unidades falladas fueron empleadas las curvas de vida útil obtenidas para el período comprendido entre 1994 y 1997, con una muestra de más de 2500 unidades falladas de transformadores no reparados. La tabla 19 presenta los costos de reposición de transformadores tipo estándar por cada 100 transformadores estándar instalados en el año 0. La tabla 20 presenta los costos de reposición de transformadores "prototipo nuevo diseño" por cada 100 transformadores estándar instalados en el año 0.

Tabla 19. Costos de reposición de transformadores tipo estándar.

Nivel de riesgo por rayos	Índice de fallas (promedio anual %)	% transformadores fallados en 10 años	Costos reposición de trafos tipo estándar por cada 100 trafos estándar instalados en el año cero
Alto	12.86	3353	35,000
Medio	8.62	329	329,000
Bajo	4.82	160	160,000
De alto a medio	9.96	258	387,000
De alto a bajo	7.50	206	309,000

Considerando el equilibrio entre el valor actual de pérdidas por reposición de transformadores de diseño estándar y el "prototipo nuevo diseño" tenemos que:

- Para reducción del índice de riesgo alto a medio se admite un sobrecosto de máximo el 1.3 para el transformador "prototipo nuevo diseño" sobre el costo actual del transformador estándar.
- Para una reducción del índice de riesgo de alto a bajo se admite un sobrecosto del 1.62.

Considerando un sobrecosto del 1.3 y pasando de riesgo alto a riesgo bajo, tenemos que para esta condición el punto de equilibrio entre costos actuales e inversión se logra en el séptimo año. A partir del séptimo año, la empresa de energía obtendrá ganancias por disminución de fallas y mejoramiento de la cali-

dad de la energía eléctrica. Si el transformador "prototipo nuevo diseño" tiene un costo similar al de un transformador tipo estándar, las ganancias para la empresa de energía serán inmediatas.

Conclusiones, recomendaciones y perspectivas de la investigación

- Se han presentado en este ítem los resultados más significativos de una sistemática y exitosa investigación teórico-experimental de más de 12 años, cuyo propósito ha sido el de contribuir a la solución del costoso problema de la falla de transformadores de distribución instalados en zonas de alta actividad de rayos, que afecta la buena calidad de la energía eléctrica en Colombia.
- Los circuitos piloto experimentales de Guachipay (Cundinamarca) y Samaná (Caldas) localizados en una de las dos zonas de mayor actividad de rayos del mundo, muestran resultados promisorios para la solución al problema de falla de transformadores de distribución en Colombia. Por ejemplo, para el circuito piloto experimental de Guachipay, luego de instalados los transformadores "prototipo nuevo diseño", la rata de fallas pasó del 50% para el período 1990-1997, a 0% en el año 1998, 7% en 1999 y 0% en 2000.
- Los funcionarios de Codensa en la zona de Rionegro, los usuarios del circuito piloto experimental, así como los funcionarios de la CHEC en la zona de Samaná en Caldas, están de acuerdo en que la solución integral planteada por nuestro programa de investigación está respondiendo satisfactoriamente, pues hasta ahora sólo se han reportado dos eventos: la salida de una línea el 1o. de abril de 1998 por un rayo sin daño de ningún transformador "prototipo nuevo diseño" y la falla de un transformador "prototipo nuevo diseño" en febrero de 1999, el cual fue evaluado en los laboratorios de la Universidad Nacional, presentando falla interna y no por rayo.
- Sin embargo, es ético seguir insistiendo en que tres años es muy poco tiempo para inferir conclusiones definitivas, debido a las variaciones espaciales y temporales del fenómeno del rayo. Por esta razón, es recomendable continuar con la fase de monitoreo y control por lo menos otros cinco años y ampliar la solución integral a otras áreas de alto riesgo por rayos.
- Utilizar el BIL de los transformadores "prototipo nuevo diseño" en 125/30 kV y conexión alta tensión contra núcleo. Esta configuración presenta menores tensiones transferidas de primario a secundario, se refuerzan los aislamientos de alta y baja tensión del transformador y tiene un costo menor que la configuración baja contra núcleo.

- Mantener las tierras en valores menores a 20 ohmios. El efecto de la disminución del valor de tierra para altas frecuencias (de impulso) no tiene gran incidencia en las sobretensiones que recibe el transformador, aunque es deseable un valor menor a 20 ohmios, para garantizar una operación confiable del descargador de sobretensión.

- El fabricante del transformador debe garantizar un buen vacío del transformador para evitar combinación del dieléctrico aceite con el aire. Adicionalmente, una vez instalado en el poste, se recomienda dejar reposar el transformador por lo menos 12 horas, debido al zarandeo que experimenta en el transporte al sitio de instalación.

- Estas innovaciones, previo un diagnóstico integral como el aquí presentado, se pueden aplicar a circuitos ubicados en zonas de alto riesgo por rayos.

- Mediante la zonificación encontrada con el parámetro "riesgo por rayos" se proponen tres tipos de adecuación para los sistemas de distribución (bajo, moderado y alto), de modo que sean más acordes con las condiciones del entorno.

- Para las zonas de alto riesgo se instalarían transformadores "prototipo nuevo diseño", nuevos diseños de puesta a tierra y protecciones más robustas; en la regiones de bajo riesgo, el empleo de diseño estándar y para las regiones de riesgo moderado implementar una combinación de nuevo diseño y diseño estándar.

- Con un costo del transformador "prototipo nuevo diseño" similar al costo de un transformador tipo estándar, las ganancias por instalación de los primeros para una empresa de energía serán inmediatas con incrementos significativos en la buena calidad de la energía eléctrica.

Esta metodología contribuye a mejorar la calidad de la energía eléctrica y permite lograr una objetiva, eficaz, confiable y económica solución al gran reto de falla de transformadores de distribución en zonas de alta actividad de rayos, con una razonable disminución en los costos de reposición y penalizaciones por tiempo fuera de servicio que anualmente pagan las empresas de energía en Colombia.

Guía de seguridad personal durante tormentas eléctricas

Diariamente se presentan sobre la tierra cerca de ocho millones de rayos (100 rayos/segundo) desde 44.000 centros de tormenta, con una gran concentración entre las latitudes trópicas de Cáncer (23° 05'N) y Capricornio (23° 05'S), principalmente en tres zonas terrestres: Suramérica tropical, centro de África y el continente marítimo.

La figura 38 confirma la hipótesis que se ha planteado en este escrito sobre la concentración de la actividad de rayos en la zona tropical terrestre, debido esencialmente al incremento de temperatura de los polos al ecuador terrestre. Como se ha mostrado a lo largo de este libro, la actividad de rayos es mucho más predominante en la zona tropical que en otras latitudes, y en el caso colombiano la situación es aún más crítica pues poseemos los dos sitios de mayor actividad eléctrica atmosférica del mundo. Estas condiciones hacen necesario que se deban tomar medidas de protección de personas y equipos contra incidencias de rayos.

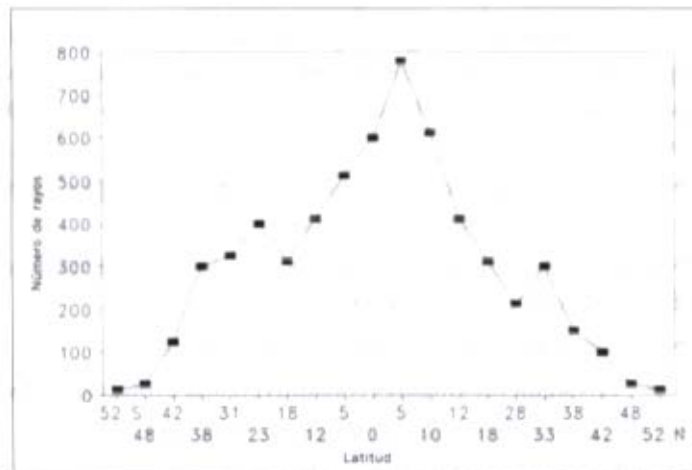


Figura 38. Actividad de rayos en función de la latitud terrestre⁷.

En los últimos 20 años ha muerto una media de 100 personas por año a causa de rayos en los Estados Unidos (1990), país con mucha menor actividad de tormentas eléctricas que Colombia.

Aunque no hay datos estadísticos disponibles a nivel nacional, son invaluableles las pérdidas en vidas humanas y bienes semovientes, los costos en equipos eléctri-

⁷ Mon. Orville, *Weather Review* No. 114, 1985.

cos y electrónicos domiciliarios, comerciales e industriales dañados y los altos valores en pólizas que anualmente pagan las aseguradoras, principalmente en las épocas de mayor actividad de rayos.

Aunque muchos han sido los estudios e investigaciones a nivel mundial y nacional sobre los rayos, en Colombia, a pesar de ser uno de los países con mayor actividad de rayos en el mundo, muy poca ha sido la aplicación que se le ha dado a los resultados de las investigaciones, principalmente a nivel de protección de vidas humanas, bienes semovientes, estructuras y equipos en general.

Es importante, entonces, resaltar que el riesgo de ser alcanzado por un rayo es mayor entre las personas que trabajan, juegan, caminan o permanecen al aire libre durante una tormenta eléctrica. Para la zona central colombiana (Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Caldas, Quindío, Risaralda, Valle y los Llanos) la actividad de rayos es más intensa durante los meses de abril, mayo, octubre y noviembre. En la zona caribe colombiana durante los meses de julio-agosto y en la zona sur (Amazonas, Cauca, Putumayo) durante los meses de diciembre-enero.

En las tres zonas descritas generalmente se presenta la actividad de rayos entre las 2 y las 6 de la tarde, y en algunas zonas especiales como el Magdalena Medio, en horas de la noche y la madrugada.

Con el ánimo de mitigar las probabilidades de riesgo por impactos de rayo, las siguientes son las recomendaciones mínimas para tener en cuenta por personas que trabajen o tengan actividades al aire libre, en caso de proximidad de tormentas eléctricas:

- ▲ A menos que sea absolutamente necesario, no salga al exterior ni permanezca a la intemperie durante las tormentas.
- ▲ Busque refugio en el interior de edificaciones, vehículos u otras estructuras que ofrezcan protección contra el rayo.
- ▲ Siga las órdenes de los brigadistas de emergencia.
 - Los siguientes lugares constituyen una protección adecuada contra el rayo:
- ▲ Edificaciones bajas que no tengan puntos sobresalientes.
- ▲ Contenedores totalmente metálicos.
- ▲ Viviendas y edificaciones con un sistema adecuado de protección contra rayos.
- ▲ Refugios subterráneos.
- ▲ Automóviles y otros vehículos cerrados, con carrocerías metálicas.

- De ser posible, evite los siguientes lugares, que ofrecen poca o ninguna protección:

- ▲ Edificaciones alejadas de otras viviendas.
- ▲ Construcciones que estén a menos de 40 metros de árboles altos.
- ▲ Tiendas de campaña y refugios temporales en zonas despobladas.
- ▲ Vehículos descubiertos o no metálicos.
- ▲ Torres de comunicaciones o de energía.

- En los siguientes lugares extreme precauciones:

- ▲ Terrenos deportivos y campos abiertos.
- ▲ Piscinas y lagos.
- ▲ Cercanías de líneas eléctricas, cables aéreos, cercas ganaderas, mallas eslabonadas, vías de ferrocarril y tendedores de ropa.
- ▲ Árboles aislados.
- ▲ Torres metálicas (de comunicaciones, de líneas de alta tensión, de perforación, etc.).

- Si debe permanecer en un lugar de alto riesgo de rayos:

- ▲ Busque zonas bajas.
- ▲ Busque zonas pobladas de árboles, pero evitando árboles aislados.
- ▲ Busque edificaciones y refugios en zonas bajas; evite edificaciones sin protección adecuada y refugios elevados.
- ▲ Si tiene que escoger entre una ladera y el filo de una colina, sitúese en el filo.
 - Si se encuentra aislado en una zona donde se esté presentando una tormenta eléctrica:
 - ▲ No se acueste sobre el suelo.
 - ▲ Junte los pies.
 - ▲ Adopte la posición de cuclillas.
 - ▲ No coloque las manos sobre el suelo.
 - ▲ No escampe bajo un árbol.

Referencias

Allibone T., Mckenzie D., Perry F., "The Effects of impulse voltage on transformer windings", *Journal IEE*, 1937, Vol. 80, p. 117.

Alternative Transient Program Rule Book, K. U. Leuven EMTP Center, July 1987.

Blume L., Boyajian A., "Abnormal voltages within transformers", *AIEEE Transactions*, Vol. 38, 1919, p. 577.

Castañeda M., Franco E., Garzón, M., "Método de simulación de cargas para el cálculo de campos electrostáticos en líneas aéreas de transmisión", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, 1989.

Castillo D., Quiñones H., Rodríguez E., "Evaluación analítica de las capacitancias entre devanados y entre éstos y tierra en transformadores de distribución", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1993.

Chua S., Keyhani A., Sebo S. A., "Maximum likelihood estimation of transformer high frequency parameters from test data", *IEEE Transactions on Power Delivery*, May 1990, pp. 858-865.

De León F., Semlyen A., "Efficient Calculation of Elementary Parameters of Transformers", *Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 376-383.

De León F., Semlyen A., "Reduced order model for transformer transients", *Transaction on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, January 1992, pp. 361-369.

Dick E. P., Erven C. C., "Transformer diagnostic testing by frequency response analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec 1978, pp. 2144-2153.

Domijan A., Embriz-Santander E., "A Novel Electric Power Laboratory for Power Quality and Energy Studies: Training Aspects", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, November, 1992.

Domijan A., Heydt G. T., Meliopoulos, A., Venkata, S., West, S., "Directions of Research on Power Quality", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, January 1993.

Erikson, J., *Las tormentas*, Serie McGraw-Hill de Divulgación Científica, 1991.

Fergestad P., Henriksen T., "Transient oscillations in multiwinding transformers", *IEEE Transactions*, Vol. PAS-93, March/April 1974, pp. 510-517.

- Fonseca T., Toro F., "Modelo matemático de transformador de distribución para el ATP", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1992.
- Grover, F. W., *Inductance calculations: Working formulas and tables*, Dover publications, Inc., 1962.
- Grupo nacional de investigación de descargas eléctricas atmosféricas, Seminario Taller, octubre 31 y noviembre 1° de 1991, Bogotá, Memorias.
- Janischewskyj, W. et al., "Lightning measurements in Canada", Canadian Electric Ass, Engineering and operating Division Meeting, Section VIII, Toronto, Canada, March 25, 1986.
- Janssen M. J., "The new lightning detection system in the Netherlands" Proc. 19 th. ICLP, Graz, 1988, pp. 41-49.
- Johnk, C., *Engineering Electromagnetic Fields and Waves*, New York, John Wiley, 1988.
- Lewis T. J., "The transient behavior of ladder networks of the type representing transformer and machine windings", *Proceedings IEEE*. paper No. 16915, Oct. 1954.
- Lightning Research Plan, EPRI EL-2289, Project 1980-1, Final Report, March 1982, USA.
- Medrano F., Palacio M., "Modelo matemático de transformador trifásico de distribución para el ATP", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, 1994.
- Miki, A., Hosoya, T., Okuyama, K., "A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings", *IEEE. Transactions on Power apparatus and Systems*, Vol. PAS.97, No. 3, May/June, 1978.
- Norma Británica BS6651-1992.
- Norma Colombiana NTC 4552.
- Norma Internacional IEC 61024.
- Norma Norteamericana NFPA 780.
- Panzer, P., "Praxis der Ueberspannungs-und Stoerspannungsschutzes", Vogel Fachbuch, 1986, p. 12.
- Romualdo, C. et al., "Progress on the lightning detection program in Mexico", Proc. 19 th. ICLP, Graz, 1988, pp. 51-56.
- Rüdemberg, R., "Performance reactance of traveling waves in coils and windings", *AIEE. Transactions*, Vol. 59, 1940, pp.1031-1040.
- Singer, H., Steinbigler, H., Weiss, P., "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields", *IEEE. Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, 1974, pp. 1660-1668.

Staff, E. E. - MIT, *Circuitos magnéticos y transformadores*, Editorial Reverté S.A., 1965.

Torres, H. Casas, F., "Diseño de protecciones contra descargas eléctricas atmosféricas en sitios de operación de BPX Colombia - CSU-3033-00", Informe final, octubre de 1993.

Torres, H. *et al.*, "Avances en el conocimiento de las descargas eléctricas atmosféricas en Colombia, para aplicaciones en Ingeniería", Premio Nacional ICEL. ACIEM, Bogotá, Colombia, febrero de 1990.

Torres, H. *et al.*, "Estudio espacio-temporal de las descargas eléctricas atmosféricas en Colombia", *Revista Energética* No. 8, Medellín, Colombia, 1992, pp. 69-80.

Torres, H., Barreto, L., "Modelos de transformadores de distribución", Curso de actualización, ACIEM Cundinamarca, Bogotá, abril de 1995.

Torres, H., Castaño, O., "Comportamiento ante descargas eléctricas atmosféricas de las líneas Torca-Calera-Circo 115 kV, EEEB", Premio Nacional ICEL. Mem. V Jornadas Nacionales de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, Bogotá, mayo de 1988.

Torres, H., Castaño, O., "Protección contra descargas eléctricas atmosféricas en la planta Descafecol-Manizales", Informe final, marzo de 1991.

Torres, H., Castaño, O., *El rayo*, Santa Fe de Bogotá, Icontec, 1994.

Torres, H., Fonseca, I., Toro, H., Trujillo, O., "Modelación matemática de transformadores de distribución", Conferencia Enerlac, Bogotá, 1993.

Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Programa de investigación sobre adquisición y análisis de señales PAAS - UN, Bogotá, 1993.

Vaessen, P.T., "Transformer model for high frequencies", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, Oct. 1988, pp. 637-647.

White, E. L., "An experimental study of surges and oscillations in windings of core-type transformers", *IEEE Transactions*, Vol. PAS-93, 1974.

Williams, E. R., "The Scumann Resonance: A Global Tropical Thermometer", *Science*, Vol. 256, May 22, 1992, pp. 1184-1187.

Wilson, C., "Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms", *Phil. Trans. A* 221, 73-115, England, 1920.

Wirgau, K. A., "Inductance calculation of an air-core disk winding", *IEEE Transactions*, Vol. PAS-95, No. 1, Jan/Feb 1976, pp. 394-400.

Sistemas localizadores y medidores de parámetros del rayo

Introducción

Para medir los impulsos de corriente tipo 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.

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 píxel, 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.

Principio de operación del sistema DF

El sistema DF, desarrollado por la firma LLP, descrito por Krider *et al.* (1976 y 1980), consta de dos partes: el sensor o antena receptora (*direction finder*) 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.

1. *Thunderstorm Sensor.*

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.

Principio de operación del sistema TOA

El sistema *Lightning Position and 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 antenna*). 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.

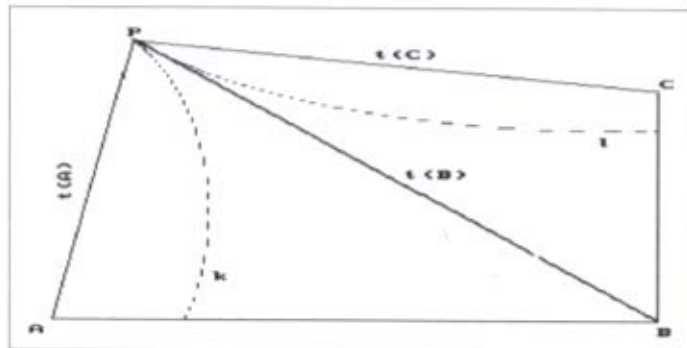


Figura 1. Principio del sistema *time of arrival*.

Por geometría, todos los puntos que tienen una diferencia constante en 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.

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 LLP. 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.

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. Éstos 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.

Exactitud y eficiencia del sistema DF

La firma francesa Meteorage que cubre totalmente el territorio francés con 16 estaciones DF, reporta (Le Boulch 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 1.

Tabla 1.
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.

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.

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.

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 2; 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 2 se presentan los sitios de ubicación de los sensores. Las distancias entre los sensores se muestran la tabla 3, y la distribución de los mismos se muestra en la figura 2.

Tabla 2.
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	Montelíbano (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

Tabla 3.
Distancias entre sensores LPATS.

	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

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

El sistema de medición y localización 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 4 presenta la ubicación de los sensores de tecnología LLP-DF, y la figura 2 su ubicación en Colombia.

Tabla 4. 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° 54' 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

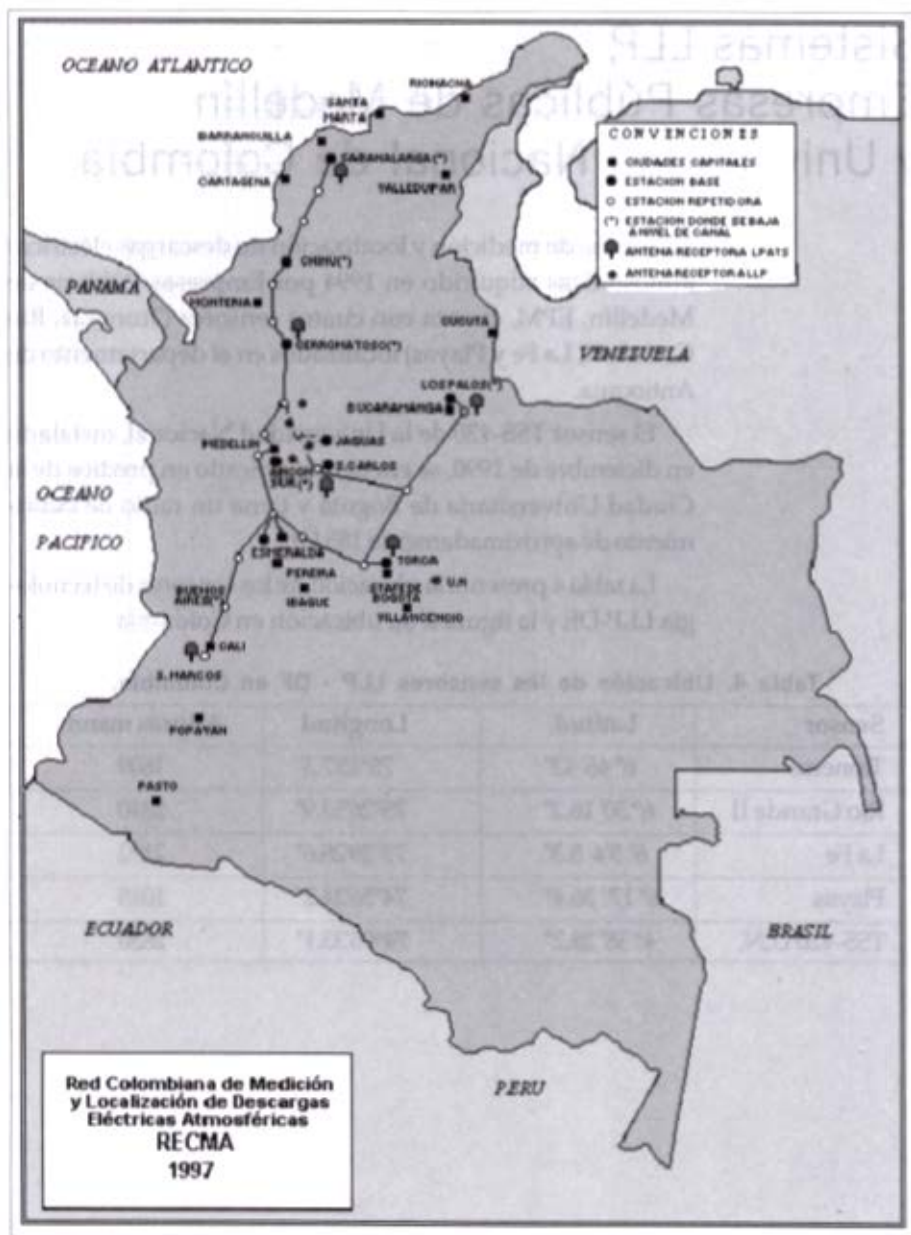


Figura 2. Red colombiana de medición y localización de descargas eléctricas atmosféricas, Recma, situación de 1997.

Descripción de los sistemas de medición directa

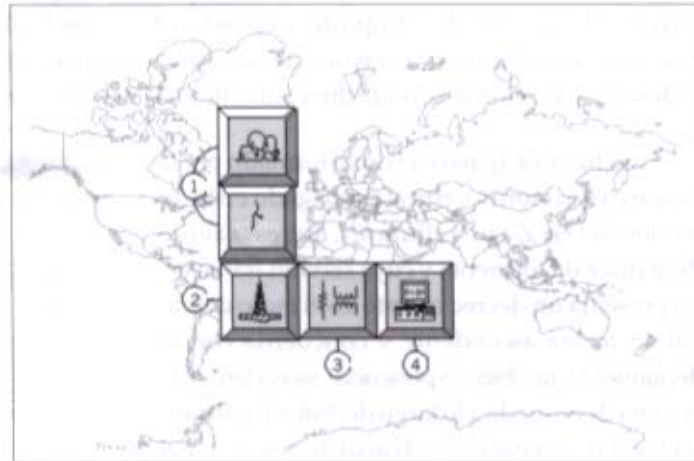


Figura 3.
Componentes del
sistema de medición
directa.

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 3 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.

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 4 aparece el canal formado por la 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 la base del canal en función del tiempo:

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

En la cual t_m 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:

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

en donde experimentalmente Amoruso obtiene un valor para k de $2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, ecuación en la cual se puede variar la altura del canal hN y utilizar la constante de propagación de la onda:

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

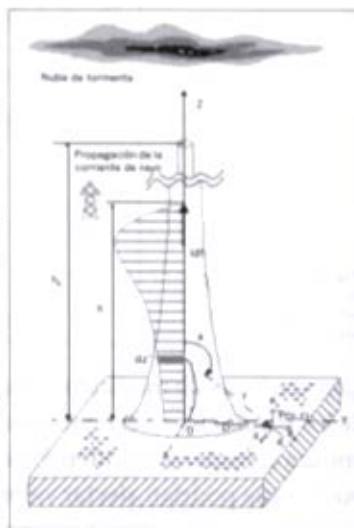


Figura 4. Representación del canal de descarga como una línea de transmisión no uniforme a lo largo de la línea del eje Z de un sistema de coordenadas cilíndricas.

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 5 se señala la variación de la corriente del canal con la altura del canal normalizada $(hN)^2$:

$$I_c(s, h) = I_0(s, h = 0) e^{-\gamma_0(z-h)} \quad (3)$$

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 6).

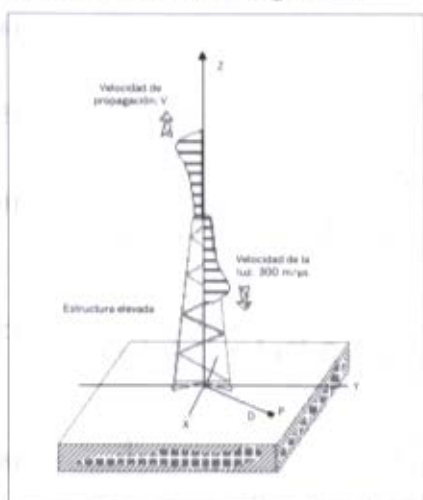


Figura 5. Viaje de onda sin reflexión en la base.

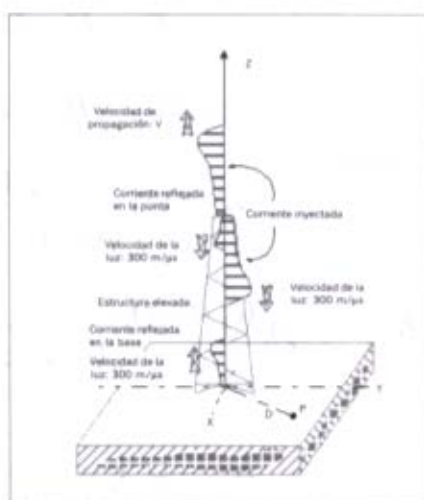


Figura 6. Viaje de onda considerando la reflexión en la base.

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 4, 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 re-

2 En la literatura especializada se encuentra que esta ecuación presenta el mismo comportamiento que el de la adaptación de la corriente en el canal según el modelo de líneas de transmisión.

flexión de la corriente, como se ve en la figura 5. Finalmente, considerar las reflexiones de corriente en la base de la estructura, como aparece en la figura 6.

De este modo, con la configuración de las figuras 4, 5 y 6, 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:

$$E_z = E'_z + E''_z \quad (4)$$

$$H_\Phi = H'_\Phi + H''_\Phi \quad (5)$$

donde:

$$E'_z = Q' \left[\frac{(1 - \beta_1^2)}{\sqrt{(c_1 \cdot t - z)^2 + (1 - \beta_1^2)r^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right] \quad (6)$$

$$H'_\Phi = (T/r) \left[\frac{(c_1 \cdot t - z)}{\sqrt{(c_1 \cdot t - z)^2 + (1 - \beta_1^2)r^2}} + \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right] \quad (7)$$

$$E''_z = Q'' \left[\frac{(1 - \beta_2^2)}{\sqrt{(c_2 \cdot t + z)^2 + (1 - \beta_2^2)r^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right] \quad (8)$$

$$H''_\Phi = (T/r) \left[\frac{(c_2 \cdot t + z)}{\sqrt{(c_2 \cdot t + z)^2 + (1 - \beta_2^2)r^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right] \quad (9)$$

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.

La torre de descarga

Entre las torres utilizadas en la medición directa se encuentran torres que fueron diseñadas para este fin y otras que fueron adaptadas para realizar estas mediciones, generalmente torres de comunicaciones. Las primeras estructuras con alturas hasta de 60 metros tienen una sección transversal en forma de triángulo equilátero igual en toda su estructura, mientras que las segundas, con alturas superiores a los 100 metros, conservan una geometría cónica.

Para hablar de una torre de un sistema de medición de corriente de rayos naturales, es preciso hacer de nuevo referencia al modelo de líneas de transmisión aplicado en descargas eléctricas atmosféricas, considerando además que los campos eléctrico y magnético radiados tienen la misma forma de onda que el impulso de corriente que se propaga hacia arriba del canal de descarga. Las formas de onda medidas, de la corriente del rayo que se desplaza en la estructura, se encuentran contaminadas con reflexiones de ondas producidas en la tierra y en la punta de la estructura o torre de adquisición (figura 6).

Las variaciones de impulsos en la punta de la estructura permiten después de transcurrido un tiempo determinado t , que la base experimente un pulso igual al de la punta, siempre y cuando no haya atenuación en la estructura. Si el impulso tiene un tiempo de duración t_1 , se pueden considerar dos casos fundamentales:

- Si $t_1 < t$: el tiempo de duración del impulso que penetra en la estructura es inferior al tiempo que es requerido para recorrerla, entonces mientras la punta experimenta determinada corriente, la base no experimenta corriente alguna, debido a que el impulso no ha llegado a ella. Este comportamiento es típico en sobretensiones de tipo atmosférico (1.2/50 μ s).
- Si $t_1 > t$: en este caso, el impulso, además de energizar la punta y toda la estructura, genera en el extremo receptor la misma tensión después de un tiempo, tiempo que depende únicamente de la velocidad de propagación del impulso. Este comportamiento es típico de las sobretensiones de tipo maniobra (250/2500 μ s), las cuales pueden llegar a energizar tramos de longitud apreciable en líneas de transmisión.

Por medio de la teoría de circuitos se puede llegar a obtener un modelo que represente el camino de la descarga y la torre. Para simplificar el análisis se parte de las siguientes presunciones:

- La velocidad de propagación de la corriente en el canal de descarga es constante.
- La velocidad de propagación de la corriente inyectada dentro de la estructura es igual a la de la velocidad de la luz.

- La distribución de la corriente de la descarga a lo largo del canal de la descarga y la estructura vertical es uniforme.
- La estructura y el camino de la descarga se encuentran libres de pérdidas, y la tierra es considerada como un conductor perfecto.
- La impedancia al impulso de la estructura (Z_0) y la del canal de descarga (Z_L) son constantes.
- La resistencia a tierra de la estructura es R_T
- El camino de propagación de la descarga es perpendicular a la tierra.

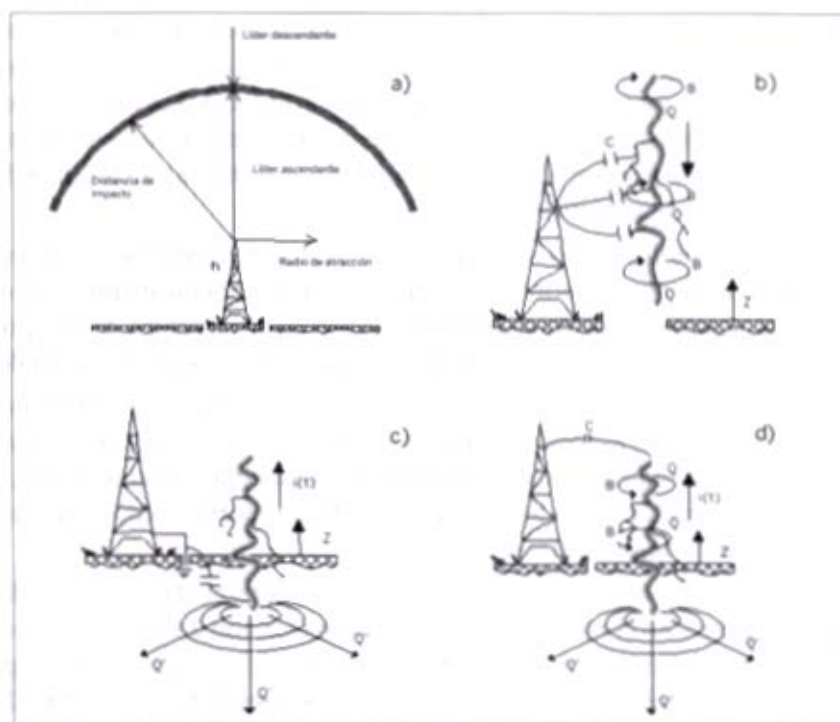


Figura 7. Impactos indirectos en la estructura vertical.

Puede suceder que la estructura no sea impactada directamente y, sin embargo, proyectar sobre el sistema de medida algún registro como si en realidad hubiera sido el resultado de un impacto directo. Cuando el líder descendente finalmente no encuentra el líder ascendente o la estructura, entonces finaliza en la tierra, pero de todos modos ocasiona una sobretensión atmosférica inducida (como se muestra en la figura 7 b, c y d) sobre la estructura y sobre los elementos circundantes, alterando su comportamiento.

Pero cuando el líder ascendente sale de la estructura con una velocidad v y el líder descendente de la descarga que proviene de la nube se encuentran, el rayo impacta la estructura puesta en tierra (figura 7a). De no estar presente la estructura, alcanzaría directamente la tierra como se muestra en la gráfica de la figura 7c. Si se considera un pico de corriente constante para un valor también constante de carga, puede ser calculado el radio de atracción o de impacto (r_s) de una estructura de altura h (figura 7a), distancia a la cual el líder ascendente se encuentra con el descendente.

Impedancia de la torre

Existen diferentes métodos para determinar la impedancia al impulso de estructuras verticales en donde los coeficientes de atenuación están directamente relacionados con la geometría de la torre. Estos elementos varían en la punta y en la base de la estructura, lo que implica que los valores óptimos para el cálculo de la impedancia de la torre al impulso sean determinados por un proceso de ensayo y error. La medición de la impedancia es bastante difícil debido a que la torre es un conductor vertical a la superficie de la tierra con una serie de elementos metálicos en su estructura y un tiempo de viaje de la onda desde la punta hasta la base ($t_v = h/c$) para alturas de 533 m de $1.7 \mu\text{s}$ y para 30 m de $0.1 \mu\text{s}$, estos tiempos son muy cercanos al tiempo de duración del impulso tipo rayo.

En este caso se opta por el uso de los cálculos recomendados por la IEEE y Cigre (1995). Estos modelos están diseñados para descargas verticales en la punta de la torre, basando los cálculos en la simple representación geométrica de la torre, cilíndrica y cónica (Almeida *et al.*, 1994), como en la figura 8. Estos factores empíricos utilizando la teoría de los campos electromagnéticos permiten un grado de

exactitud considerable para determinar una impedancia promedio de una estructura cónica vertical (ecuación 10). Algunos modelos admiten que la impedancia de la torre varía simultáneamente con el viaje de la onda, desde la punta a la base de la torre, comenzando con valores bajos en la punta de la torre e incrementando su valor durante el recorrido hacia abajo.

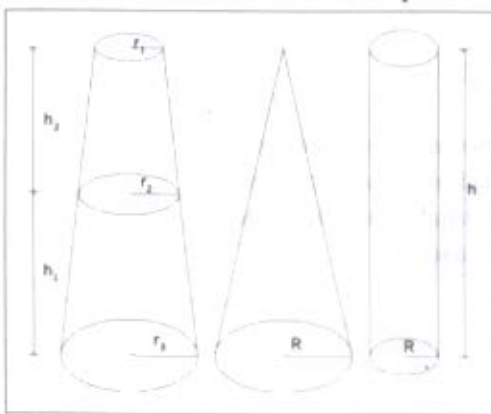


Figura 8. Radio equivalente de una estructura vertical.

Una primera aproximación, donde R es el radio equivalente de la estructura y h es la altura de la torre está dada por (10).

$$Z_0 = 60 \cdot \text{Ln} \cdot \left\{ \text{ot} \left[0.5 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{R}{h} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

Dependiendo de la configuración geométrica de la estructura, el cálculo del radio equivalente puede partir de asumir la torre como una combinación multietapa de conos truncados (figura 8) definido por (11) y aplicado en (10):

$$R = r_{eq} = \frac{(r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1)}{h} \quad (11)$$

Debido a que esta técnica ha reportado considerables desviaciones, han surgido métodos más aproximados que asumen la torre como un cilindro y como un cono truncado calculando la impedancia con la fórmula (12) en el cono truncado.

$$Z_0 = 60 \cdot \left[\text{Ln} \left(\frac{h}{R} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

para $R \ll h$

Se utiliza la fórmula (13) para calcular el radio equivalente (Yamada, 1995; Almeida *et al.*, 1994), mientras que Hara *et al.*, (1995) han reportado mayor exactitud en el cálculo de la impedancia de un cilindro vertical con la ecuación empírica (14).

$$R = r_{eq} = \frac{(r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1)}{2h} \quad (13)$$

$$Z_0 = 60 \left(\text{Ln} \frac{2h\sqrt{2}}{R} - 2 \right) \quad (14)$$

Otros trabajos adicionales han demostrado que para descargas horizontales, la impedancia de la torre es una sola desde la punta a la base, comportamiento totalmente diferente con un impacto vertical en la punta de la torre.

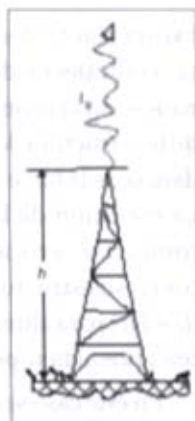


Figura 9. Canal de la descarga y estructura impactada

Distribución de la corriente de rayo en el canal de descarga y la torre

Para la aplicación del modelo de líneas de transmisión al fenómeno del impacto directo de un rayo en la estructura de medición, se inicia representando gráficamente el canal de la descarga y la torre (figura 9) y su posterior modelo circuital (figura 10). En el tratamiento de la onda viajera de corriente, se asume una primera

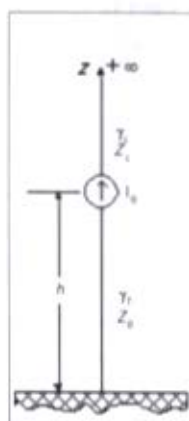


Figura 10. Modelo circuital de la torre y el canal.

reflexión de la corriente en la tierra IRB y otra reflexión de corriente en la punta de la torre IRP. La magnitud de la corriente reflejada en la tierra y en la punta puede ser tan grande como cualquier otra corriente reflejada (figura 12).

Una adaptación de la expresión de la corriente en el dominio del tiempo obtenida por Guerrieri *et al.* (1998) y su tratamiento en el dominio de la frecuencia (Matoyama *et al.*, 1996) describe la onda medida a una altura z a lo largo de la estructura de altura h , para la onda que viaja por la estructura con una constante de propagación γ_r , desde su nacimiento en la punta con un coeficiente de reflexión k_P , hasta su base con otro coeficiente de reflexión k_T , en donde inicia el proceso de reflexión con sucesivos viajes desde la base hasta la punta (ecuación 15):

$$i(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[k_P^n k_T^n i_0 \left(t - \frac{h-z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + k_P^n k_T^{n+1} i_0 \left(t - \frac{h+z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right], \forall 0 \leq z \leq h \quad (15)$$

También se presenta la expresión (15) en el dominio de la frecuencia (16) y posteriormente se calcula el límite de la sumatoria cuando n tiende a infinito, como se muestra en (17):

$$I(\omega, h) = \left[I_0(\omega) e^{-\gamma_r h} \left(e^{\gamma_r z} + k_T(\omega) e^{-\gamma_r z} \sum_{n=0}^{\infty} \left(k_P(\omega) k_T(\omega) e^{-\gamma_r 2h} \right)^n \right) \right] \quad (16)$$

$$I(\omega, h) = \left[I_0(\omega) \left(e^{-\gamma_r(h-z)} + k_T(\omega) e^{-\gamma_r(h+z)} \right) \left(\frac{1}{1 - k_P(\omega) k_T(\omega) e^{-\gamma_r 2h}} \right) \right] \quad (17)$$

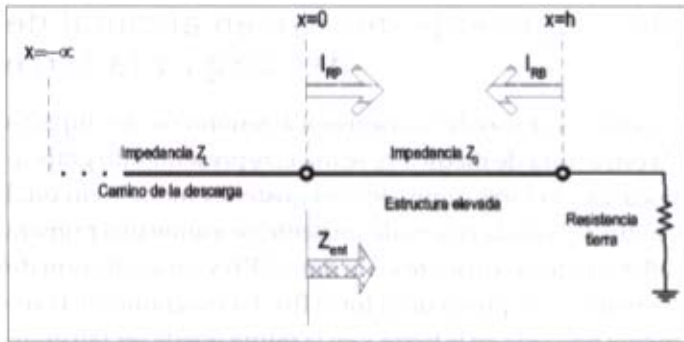


Figura 11. Circuito de la propagación de la descarga y la estructura.

A partir de este modelo del circuito de la figura 11 y un análisis de condiciones de frontera de la onda de corriente que impacta la estructura en la punta ($X = 0$), una parte de ella se propaga por la estructura de impedancia Z_L , la parte restante que se propaga por la estructura de impedancia Z_0 es reflejada en la tierra ($X = h$) y su comportamiento está dado por la ecuación (18) (Matoyama *et al.*, 1996), y para la onda que viene de ser reflejada en la base y de nuevo es reflejada en la punta está dada por la ecuación (19):

$$I_{RB} = - \frac{k_T e^{-\gamma_T h}}{1 - k_T e^{-2\gamma_T h}} I_P \quad (18)$$

$$I_T = I_P \frac{\{ e^{-\gamma_T (h-z)} - k_T e^{-\gamma_T (h+z)} \}}{1 - k_P k_T e^{-2\gamma_T h}} \quad (19)$$

donde:

γ_T es la constante de propagación de la corriente en la torre
 K_T es la constante de reflexión en la tierra (ecuación 20)

K_P es la constante de reflexión en la punta de la torre (ecuación 21)

I_{RB} es la corriente reflejada en la base de la torre

I_{RP} es la corriente reflejada en la punta de la torre

El circuito de la figura 12 es la representación del modelo del circuito de propagación de la figura 11, en donde se separan las fuentes para representar las ondas que se desplazan por el canal y por la estructura.

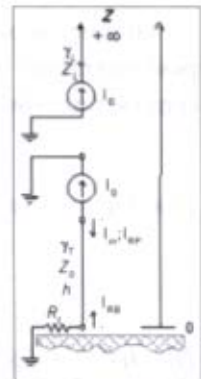


Figura 12. Modelo circuital de la torre y el canal de descarga separados.

El separar el circuito del canal no implica desprestigiar su efecto en la estructura, que es donde se quiere estudiar el efecto de la descarga.

En la figura 12 aparece una corriente reflejada en la base y otra en la punta; así, la corriente de rayo distribuida a lo largo de la estructura está dada por la suma de la corriente en la punta (I_o), la corriente reflejada en la base (I_{RB}) y la corriente reflejada de nuevo en la punta (I_{RP}), que para una primera reflexión en la base y otra en la punta es de la forma:

$$k_T = \frac{Z_0 - R_T}{R_T + Z_0} \quad (20)$$

$$k_P = \frac{Z_{ent} - Z_L}{Z_{ent} + Z_L} = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_0 + Z_L} \quad (21)$$

$$k_P = \frac{\left[Z_0 \left(\frac{1 + k_T e^{-2\gamma h}}{1 - k_T e^{-2\gamma h}} \right) - Z_L \right]}{\left[Z_0 \left(\frac{1 + k_T e^{-2\gamma h}}{1 - k_T e^{-2\gamma h}} \right) + Z_L \right]} \quad (22)$$

En la literatura se presentan las demostraciones de las ecuaciones (20) y (21), introduciendo en ellas la constante de propagación de la onda γ , con la cual es posible calcular la variación de este parámetro en la estructura.

Elementos de medición directa

Instrumento derivador

En cuanto a los elementos utilizados en la derivación de la señal proveniente del instrumento de adquisición se encuentran la bobina de Munich, la bobina de Rogowski, el transformador Pearson y la resistencia Shunt.

Bobina de Munich

Estos transductores son utilizados para obtener la pendiente de la corriente del rayo. Aunque no reciben directamente el impacto, se consideran seguros para el manejo de altas corrientes al aislar los equipos de medida. Típicamente soportan

corrientes hasta de 100 kA con tiempos de frente desde 1 μ s y un ancho de banda hasta de 200 MHz (Niño, 1989).

Bobina de Rogowski

Son bobinas toroidales en las cuales, por las corrientes alternantes inducidas, se produce un voltaje proporcional a la tasa de ascenso de la corriente. Debido a este comportamiento la tasa de ascenso de la corriente se mide con bobinas diferenciadoras, y la magnitud de la corriente con bobinas integradoras. Una de las principales propiedades de estos elementos es que presentan comportamientos lineales, que los convierten en los instrumentos preferidos para mediciones de altas corrientes a altas frecuencias. Según su aplicación encuentran rígidas con inductancias mutuas hasta de 300 nH y soportan magnitudes de corriente superiores a 1 MA, o bien rígidas que soportan menores corrientes (kA) y con inductancias de μ H.

Transformador Pearson

Es un transductor utilizado para obtener la magnitud y forma de onda de la corriente, con impedancias cercanas a 50 Ω ; presentan tiempos de ascenso cortos entre 2 y 100 ns en muchos de los casos. Una ventaja de estos elementos es que actúan totalmente aislados del circuito bajo prueba. Pueden soportar corrientes hasta de 500 kA y anchos de banda superiores a 2 MHz.

Resistencia Shunt

Se caracteriza por tener un valor óhmico del orden de m Ω , lo que limita los efectos de carga del circuito de medición y los efectos de disipación de calor en el elemento. Se puede utilizar para determinar la forma de onda del impulso de corriente, captando la caída de voltaje a través de la misma resistencia. Entre los diferentes modelos de resistencias Shunt de medición se encuentran el modelo bifilar, disco, jaula de ardilla y tubular coaxial. Esta última sobresale frente a las demás por presentar menores inductancias y menor influencia al efecto "skin" en condiciones similares de corriente. La selección de forma y un dimensionamiento apropiado permiten obtener una mínima componente inductiva en la respuesta de la misma.

Estos instrumentos deben ser capaces de operar a altas frecuencias, puesto que las ondas viajeras de rayo tienen componentes del orden de MHz, y si el sistema no responde adecuadamente se pueden obtener resultados erróneos. Sin importar el método utilizado en la adquisición de la onda, se requiere que los elementos

tengan características de transmisión definidas y constantes, así como ancho de banda suficiente. En algunos trabajos se recomienda, por ejemplo, que todos los instrumentos utilizados para medir corrientes tipo rayo dispongan de por lo menos 200 MHz en su ancho de banda para medirlas a cualquier frecuencia (Baracaldo, 1990).

Instrumentos de registro

Son los instrumentos que permiten visualizar el fenómeno transitorio, así como la forma de onda. Los pioneros en este tipo de exploraciones utilizaron oscilógrafos con claras diferencias junto a sus descendientes, los osciloscopios. Dependiendo del grado de tecnología de la torre instrumentada, se encuentran instrumentos análogos o digitales. En Suiza, aunque de los instrumentos allí instalados se sabe muy poco, se ubicó una de las primeras torres instrumentadas con elementos análogos. Estos instrumentos electromagnéticos, aunque tienen una inercia apreciable, son propicios para la mayor parte de las medidas prácticas de valores eficaces de corrientes y tensiones alternantes, mientras éstas no varíen muy rápidamente de forma. Se debe tener en cuenta que todos los instrumentos de este tipo no responden instantáneamente a las variaciones de señal e invierten cierta cantidad de energía en vencer el par regulador de los elementos móviles.

Oscilógrafo

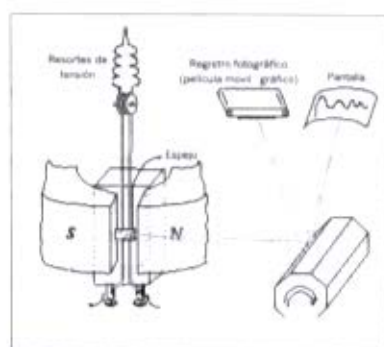


Figura 13. a) Oscilógrafo de Duddell (1893).

Dentro de los primeros intentos para perfeccionar las aplicaciones del principio del instrumento de registro de bobina móvil, surgió el oscilógrafo de bobina móvil de Blondel (1891) seguido poco después (en 1893) por el instrumento proyectado por Duddell, el cual utiliza una espira de hilo fino de bronce fosforoso como bobina móvil, indicando la desviación por un haz luminoso que se refleja en un pequeño espejo unido a ella³. Esta luz podía incidir, en una película fotográfica, para

obtener un trazo de la variación de tensión aplicada al instrumento en un período de tiempo determinado (figura 13a).

³ Para ampliar información visitar el Museo de Cambridge en http://www.physics.uq.oz.au/physics_museum/tour.shtml

Grandes mejoras se introdujeron desde entonces, hasta llegar al oscilógrafo de rayos catódicos, una valiosa herramienta de la época, que permitió la investigación de fenómenos eléctricos periódicos y transitorios de frecuencias relativamente elevadas. La aplicación del tubo de rayos catódicos al oscilógrafo de Duddell redujo en gran parte los efectos de la inercia que compensa el haz electrónico. La información registrada y representada en la pantalla por el oscilógrafo, era entonces susceptible de registro de varias formas: temporalmente para inspección inmediata, o fotográficamente, como registro permanente (figura 13b).



Figura 13. b). Oscilógrafo de rayos catódicos.

Un registro adecuado sólo podía conseguirse si el instante en el que comenzara el fenómeno transitorio y su duración eran conocidos, porque entonces se ajustaba la velocidad (frecuencia). Si no podía predecirse el instante en que se había de producir, ni su duración, bastaba entonces con hacer un examen visual y determinar una base de tiempo normal de frecuencia adecuada y tratar de usarla en un momento crítico del ciclo exploratorio.

Otra buena alternativa era aprovechar la llegada de la señal transitoria para disparar la base de tiempo en ese instante. Sin embargo, en la mayor parte de las investigaciones de fenómenos transitorios es preferible obtener un registro permanente, que en este caso se obtenía utilizando la técnica de película móvil a manera de pantalla del tubo de rayos catódicos, caso en el cual la base de tiempo se remplazaba por la película en desplazamiento.

Además del cuidadoso manejo, este tipo de elementos requiere el cuidado ante campos magnéticos dispersos que puedan proceder del entorno, los cuales llegan a penetrar en el tubo de rayos catódicos, dando lugar a interferencias en la desviación y la concentración del haz de electrones. Algunos valores característicos de estos instrumentos indican que poseen un factor de desviación en el amplificador vertical de 100 y 1 mV/cm y la frecuencia de la base de tiempo ajustable entre 20 Hz y 20 kHz. La impedancia de entrada variable entre 1 M Ω y 10 M Ω en paralelo con una capacidad entre 1 y 20 pF, se encuentra en promedio en 3 M Ω y 9 pF⁴. Según la bibliografía disponible, el instrumento registrador utilizado en Suiza por Berger era un oscilógrafo que tenía una frecuencia límite superior a 4 kHz con un tiempo de resolución de 0.5 μ s.

4 Adaptado de Harley Carter, *El oscilógrafo de rayos catódicos*, Biblioteca Técnica Philips.

Osciloscopio

A pesar de las posibles diferencias existentes, todos los osciloscopios presentan unos principios de funcionamiento comunes. Estos equipos electrónicos se dividen en dos tipos: analógicos y digitales. Los primeros trabajan con variables continuas mientras que los segundos lo hacen con variables discretas. Los analógicos trabajan directamente con la señal aplicada; ésta, una vez amplificada, desvía un haz de electrones en sentido vertical proporcionalmente a su valor. En contraste, los osciloscopios digitales utilizan previamente un conversor analógico-digital (A/D) para almacenar digitalmente la señal de entrada, reconstruyendo posteriormente esta información en la pantalla.

Ambos tipos tienen sus ventajas y desventajas. Los analógicos son preferibles cuando es prioritario visualizar variaciones rápidas de la señal de entrada en tiempo real. Su impedancia de entrada en promedio se encuentra entre $1\text{ M}\Omega - 21\text{ pF}$, variando según la calidad del instrumento desde $1-9\text{ M}\Omega - \text{pF}$ hasta $1-32\text{ M}\Omega - \text{pF}$. Su ancho de banda promedia los 200 MHz, encontrando elementos con anchos de banda desde 40 MHz hasta los 500 MHz. Su sensibilidad máxima se encuentra en promedio en 1.5 mV/div , variando desde 0.5 hasta 5 mV/div (Mundo electrónico, 1988, 1989).

Los osciloscopios digitales son adecuados para visualizar y estudiar eventos no repetitivos. Los valores digitales muestreados se almacenan en una memoria como puntos de señal.

El número de los puntos de señal utilizados para reconstruir y visualizar la señal en pantalla se denomina registro, y son tomados a una velocidad dada en muestras por segundo.

Su impedancia de entrada en promedio se encuentra en $1\text{ M}\Omega$ en paralelo con 15 pF o $50\text{ }\Omega$. Su ancho de banda en promedio puede variar dependiendo de si además soporta ancho de banda analógico en 55 MHz (entre 20 y 200 MHz), si soporta ancho de banda digital equivalente en 170 MHz (entre 20 y 1000 MHz) y si además soporta ancho de banda de evento único (que es el de nuestro interés y que no todos lo poseen) en 35 MHz (entre 0.4 hasta 250 MHz). La resolución vertical en estos instrumentos se encuentra en promedio en 8 bits variando desde 6 hasta 19 bits, y su frecuencia de muestreo real en promedio es de 90 MS/s (megamuestras por segundo) variando desde 1 hasta 1000 MS/s o bien en modelos avanzados en promedio hasta de 2 GS/s .

Técnicas de cálculo pueden aumentar la resolución efectiva del registrador y el ancho de banda (banda de paso), que especifica o bien el rango de frecuencias en las que el osciloscopio puede medir con precisión o la frecuencia máxima de la

señal visualizada en la que puede tenerse confianza absoluta en cuanto a la medida de sus valores cuantitativos y no de forma.

Por convenio, el ancho de banda se calcula desde 0Hz (continua) hasta la frecuencia a la cual una señal de tipo senoidal se visualiza a un 70.7% del valor aplicado a la entrada (lo que corresponde a una atenuación de -3dB). La atenuación o pérdida de amplitud comienza antes de llegar al límite de paso y aumenta hasta que la señal visualizada se atenúa 0.707.

La banda de paso debe ser equivalente a la máxima frecuencia de trabajo, y generalmente se utiliza como ancho de banda equivalente, en donde se usan las más altas componentes de frecuencia en señales periódicas y como ancho de banda de evento único, en donde se establecen las componentes más altas de frecuencia en una sola ocurrencia de la señal, y será como máximo la mitad de la frecuencia real de muestreo.

Tanto los osciloscopios analógicos como los digitales se encuentran limitados por su ancho de banda. Cuando se cuenta con un ancho de banda suficientemente alto, el muestreo de las señales por parte de los osciloscopios se ve acompañado de una sombra llamada *aliasing* (figura 14), envolviéndolos en una aura de incredulidad manifiesta. Podemos hacer un muestreo a señales con tiempos de elevación o de subida mucho menores que los que puede entregar el osciloscopio y, por ende, se registran señales con tiempos de elevación mayores. No basta con que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la frecuencia fundamental de la señal: tiene que ser superior al doble de la frecuencia de las componentes más altas de la misma.

Una causa del problema del *aliasing* es la capacidad del registrador. Para el caso de uno digital se habla de su memoria o longitud del registro de las muestras adquiridas, limitando la capacidad de memoria del osciloscopio.

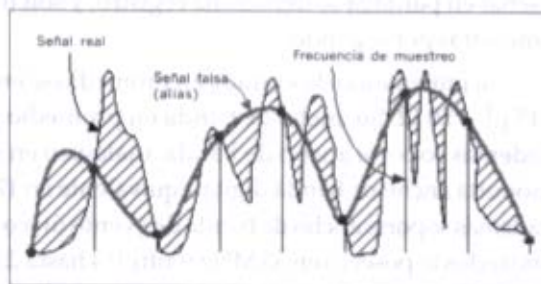


Figura 14. Efecto de aliasing en muestreo de señales.

Éste debe estar en la capacidad de almacenar el número de muestras realizadas en la cadencia de muestreo (Ms/s) durante el tiempo de duración de la señal. La característica práctica que diferencia los osciloscopios analógicos de los digitales, además del almacenamiento, es su capacidad para mostrar la información previa al disparo, que lo consigue capturando y almacenando constantemente la señal.

La resolución vertical (expresada en bits), en cambio, especifica cuántos niveles discretos puede digitalizar el osciloscopio, y si mirásemos un oscilógrafo, nos someteríamos a complicadas prácticas de ensayo y error.

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

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 15.

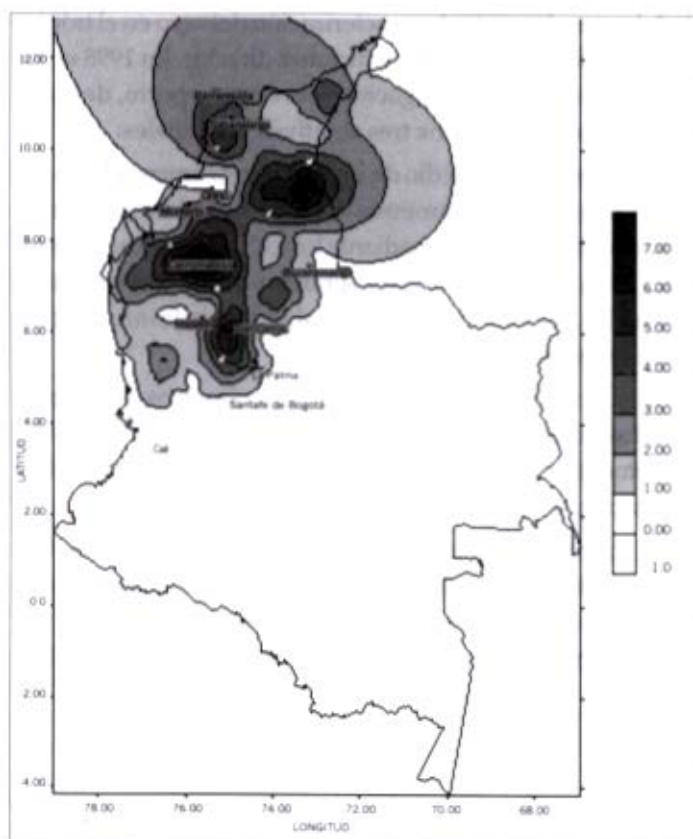


Figura 15. Mapa de DDT para Colombia (1996).

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.

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 Ilyapa⁵ 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 templetes 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 16 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.

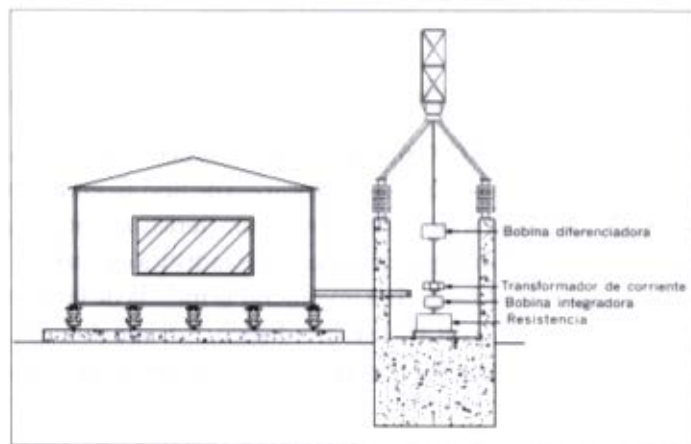


Figura 16. Esquema de la estación Ilyapa.

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 corriente del rayo.

⁵ En honor al dios inca 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.

Determinación de los parámetros de la estructura seleccionada

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 17 muestra la respuesta medida en la torre, cuando se inyecta una onda tipo paso.

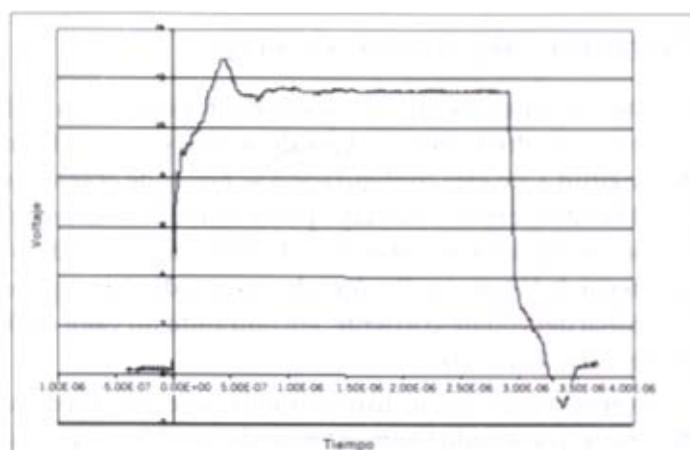


Figura 17. Onda de respuesta en la torre.

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 175Ω , con una velocidad de propagación de la onda en la torre de $275 \text{ m}/\mu\text{s}$.

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 (Jordan, 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 5 presenta los resultados de estas ecuaciones para la torre de la estación Ilyapa.

Tabla 5.
Impedancias de la torre de la estación Ilyapa para diferentes fórmulas.

Fórmula	Impedancia Ω
Jordan	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.

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 .

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 μ s.

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 18 y 19 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 18. Ondas incidente $i(t)$ y teórica $i_T(t)$ medidas en la torre, calculadas por el método simplificado de los dos puntos.

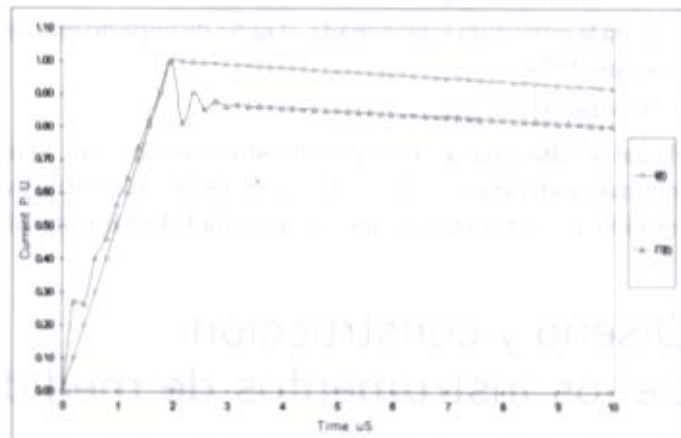
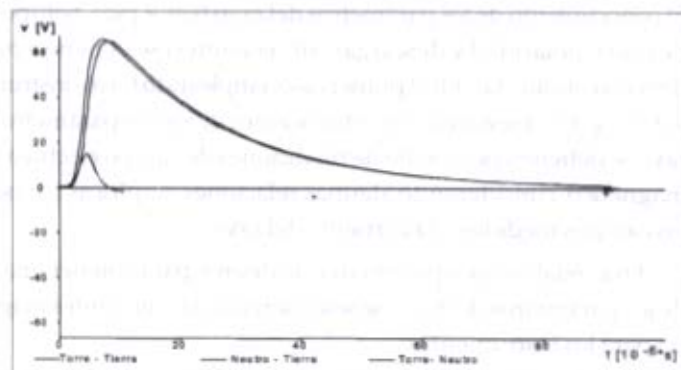


Figura 19. Onda incidente y medida con simulación en el EMTP.



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):

$$Nf = 0.04 \exp(0.015 Hs)$$

donde Hs es la altura de la estructura en metros.

Para la torre venteada de 35 m, esta magnitud resulta:

$$Nf = 0.04 \exp(0.015 \cdot 35) = 0.07$$

Considerando una dependencia "lineal" entre Nf 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 Nf 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):

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

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.

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 *triggered 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:

Máx. amplitud pico de corriente: 400 kA

Máx. tasa de crecimiento de la corriente: 200 kA/s

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

Mín. ancho de banda: 2 MHz

Máx. voltaje de salida: 200 V

Para cumplir con estos requerimientos se decidió fabricar algunos instrumentos aprovechando conocimientos adquiridos durante diferentes proyectos de investigación en la Universidad.

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

Bobinas 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:

$$\frac{1}{L} \cdot \frac{d\phi}{dt} = \frac{dI_c}{dt} + \frac{R}{L} \cdot I_c \quad (23)$$

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

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,

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{dI_c}{dt} \ll I_c \quad (24)$$

En la ecuación (24), el voltaje de salida de la bobina resulta ser $R I_c \cong \frac{d\phi}{dt}$.

Esta es una bobina diferenciadora dado que la corriente en la bobina es proporcional a: $\frac{d\phi}{dt}$

Las ventajas de este sensor del $\frac{d\phi}{dt}$ 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 20 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 21 muestra los resultados de la simulación.

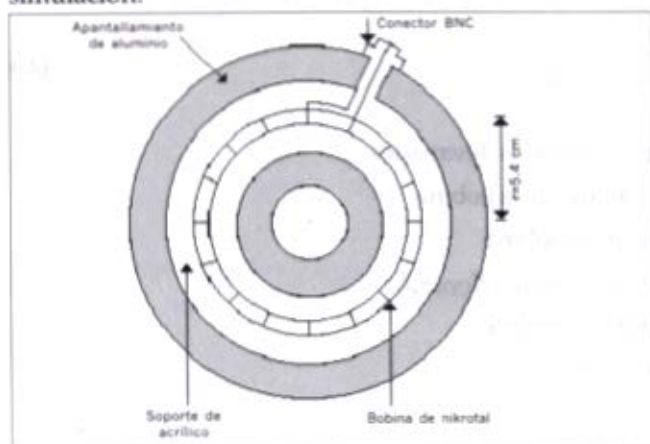


Figura 20. Sección transversal de la BRD.

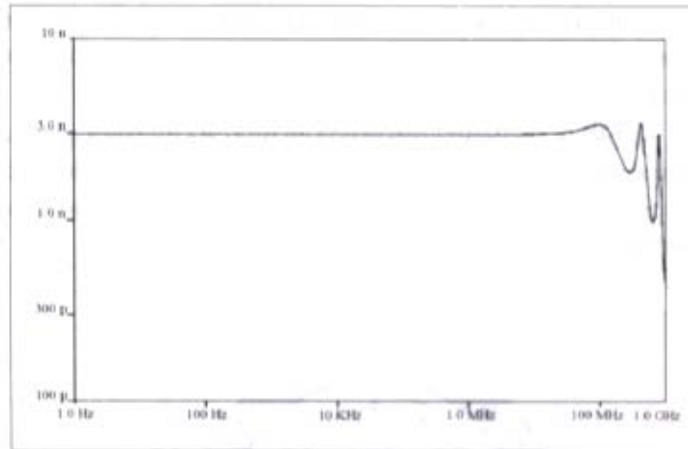


Figura 21. Simulación de impedancia vs. frecuencia de la BRD.

Los parámetros de la BRD construida son:

Autoinductancia de la bobina (L): 12 nH

Inductancia mutua (M): 0.6 nH

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

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:

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{dI_c}{dt} \gg I_c \quad (25)$$

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 $\frac{d\phi}{dt}$.

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 externo.

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 22 muestra la sección transversal de la BRI.

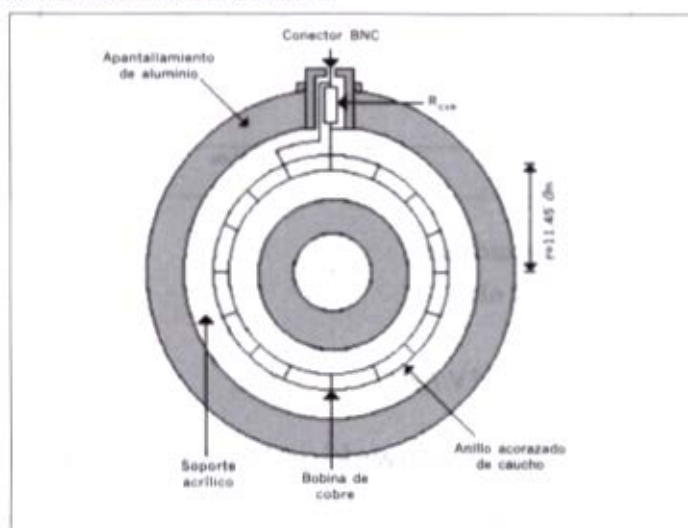


Figura 22. Sección transversal de la BRI.

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 23 muestra los resultados de la simulación.

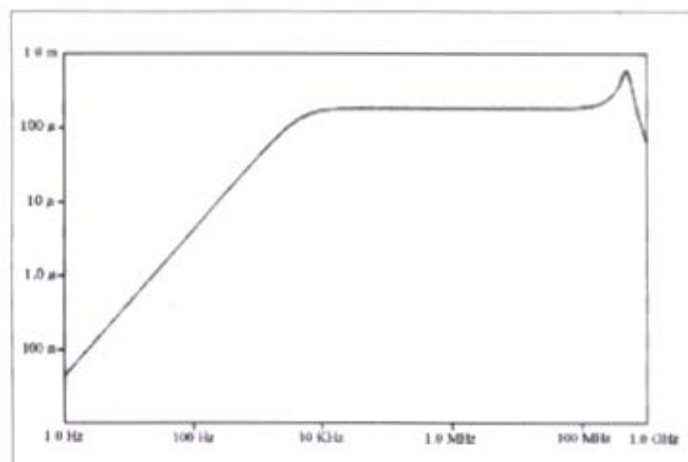


Figura 23. Simulación de la impedancia vs. frecuencia de la IRC.

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

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 24 muestra el diagrama esquemático de la RS. Con esta configuración, una integral de carga de 2.10^8 A²-s, elevaría la temperatura de la parte activa hasta en 350°C.

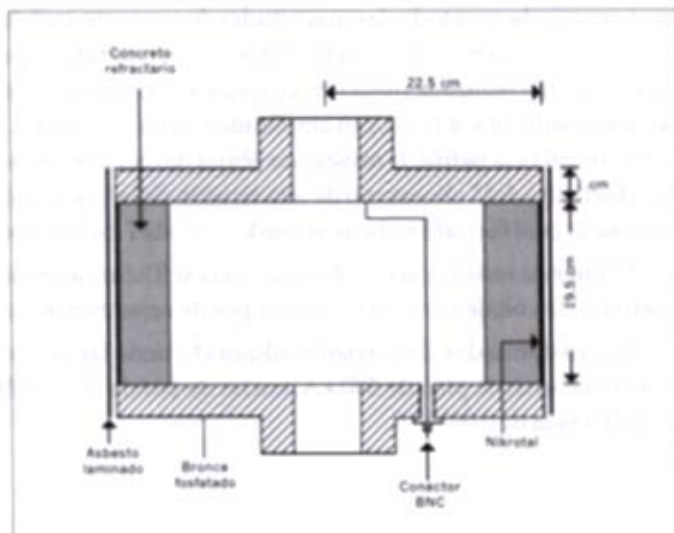


Figura 24. Diagrama esquemático de la RS.

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 25 presenta los resultados de la simulación para la RS.

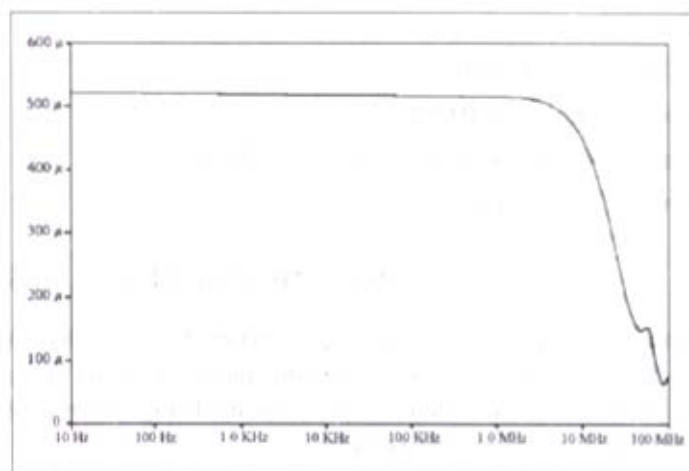


Figura 25. Simulación de impedancia vs. frecuencia de la RS.

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.

Estaciones de medición directa en el mundo

A continuación se describen varias estaciones que han contribuido notablemente en la investigación de los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica medidos en forma directa.

Estación de la torre de telecomunicaciones del Monte Hoher Peissenberg (Alemania)

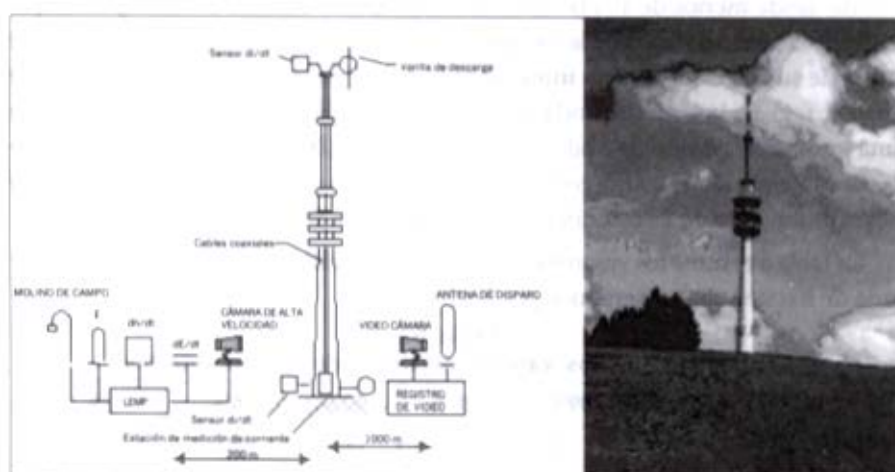


Figura 26. Esquema de la estación Peissenberg.

Las mediciones en la torre de telecomunicaciones de 160 m de altura en el monte Peissenberg en el sur de Alemania ($47^{\circ} 49'$ Norte, $11^{\circ} 05'$ Este), comenzaron en 1978 con el fin de investigar el frente de impulso de corriente a la torre, la derivada de la corriente en la punta de la torre y en la base de ella, y el campo electromagnético radiado durante la descarga. La corriente medida en dos diferentes sitios a lo largo de la torre (punta y base) permite la investigación del comportamiento transitorio de la torre. Este sistema de adquisición de datos tiene un límite de ancho de banda de 14 MHz. La medición de campo eléctrico se realiza por medio de un sistema de video de alta velocidad. Las formas de onda de la derivada de la corriente se registraron en un osciloscopio LeCroy 9430, con una resolución vertical de 10 bits, un intervalo de muestreo de 10 ns y un tiempo de registro de 50 μ s.

El límite del ancho de banda de esta configuración, incluidos el sensor, el cable coaxial y el sistema de adquisición, es de 15 MHz. El registro de la medición del LEMP (*Lightning Electromagnetic Impulses*) se realiza en una estación situada a 200 m de la torre; con una antena de lazo blindado y una antena de placas paralelas se detectan las derivadas del campo magnético y eléctrico (figura 26). La forma de onda de la corriente en la punta de la torre es medida por medio de un transformador Pearson (Tipo 2093). El transformador tiene una razón de transformación de 0.001 V/A^6 con un ancho de banda desde 0.15 Hz hasta 200 kHz. El ancho de banda de todo el sistema de medición de corriente está determinado principalmente por la corriente del transformador.

Se utiliza un registrador Le Croy en la base de la torre, que tiene un ancho de banda desde menos de 10 Hz hasta 20 MHz. Existe otro DSO LeCroy 9430 que registra la forma de onda de la corriente medida en la base de la torre y la forma de onda de su correspondiente integral de la punta de la torre. Otro DSO LeCroy 9310AL registra la forma de onda de la corriente medida en la punta de la torre con una resolución vertical de 8 bits y una memoria de 1,000,000 de puntos. Éste registra la corriente de descarga con un intervalo de muestreo de $1 \mu\text{s}$ y un tiempo de almacenamiento de 1 s con diferentes escalas en los dos canales.

La tabla 6 resume los valores mostrados en las gráficas de distribución acumulada de frecuencias presentados por Fuchs.

Tabla 6.
Estadísticas de los valores máximos de los parámetros.

	99%	95%	50%	5%	1%
$di/dt_{\text{Máx}}$ (kA/ μs)	-1	-3	-22	-151	-336
$I_{\text{Máx}}$ (kA)	-2	-3	-7	-20	-31
$dH/dt_{\text{Máx}}$ (A/m/ μs)	-2	-4	-22	-118	-237
$H_{\text{Máx}}$ (A/m)	-2	-3	-9	-24	-35
$dE/dt_{\text{Máx}}$ (kV/m/ μs)	0.4	0.9	6	39	84
$E_{\text{Máx}}$ (kV/m)	0.4	0.7	3	16	30

6 Es decir, que por cada amperio circulante en el circuito primario, obtenemos un voltaje de 0.001 V en el secundario, en circuito abierto.

Estación de medición en la torre nacional de Toronto CN en Canadá

La torre CN de Toronto, Canadá, ubicada a $43^{\circ}38'$ Norte $79^{\circ}23'$ Oeste (figura 27), con una altura de 553 m (sobre el nivel de la tierra, SNT), es la más alta estructura libremente soportada del mundo. Mientras la densidad de rayos en Toronto es de 50 rayos/ km^2 /año, en la torre CN es aproximadamente 40 a 50 rayos/año solamente. Éstos se consideran, en su mayor parte, rayos ascendentes inducidos. La derivada de la corriente (di/dt) se registra a través de una bobina de Rogowski de 3 m de radio de 40 MHz, un tiempo de ascenso de 8.7 ns, una sensibilidad de $0.32 \text{ V}/(\text{A}/\text{ns})$, con una precisión del 6%, la cual está instalada en la torre CN a 474 m SNT. La bobina está conectada a través de 146 m de cable triaxial (Belden RG-8/U 9888 - 50Ω) a un equipo de registro Sony Tektronix tipo 710A de 10 ns, y 2 canales de 10-bits, 128 kb de memoria, localizado a 372 m y un ancho de banda superior a los 100 MHz. Este sistema puede medir un di/dt de la corriente de descarga, con un tiempo de ascenso de 20 ns; además, posee un computador Tektronix PEP301 para el registro de la señal.



Figura 27. Características generales de la torre CN.

La torre CN es una estructura de acero con una sección transversal pentagonal. Se asume que el punto de impacto está bastante lejos de la bobina (en la punta de la torre 79 m por encima de la localización de la bobina) y así la corriente es dividida igualmente por los cinco lados del pentágono de la sección transversal antes de alcanzar el nivel de la bobina; además se considera realmente que la

bobina captura el 20% de la corriente de descarga. Los tres sensores de campo están conectados vía cable coaxial (50Ω) a dos canales dobles del osciloscopio (Sony Tektronix Tipo 710A) y al computador Tektronix PEP301. Todo el sistema de medición de campo tiene un tiempo de ascenso menor a 5 ns. La especificación del sistema de medición se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Sistema de medición de la torre CN.

	Equipo	Frecuencia	Sensibilidad
Corriente	Bobina de Rogowski	40 MHz	0.32 V/(A/ns)
Campo magnético	Lazo de antena	H : 697 Hz -150 MHz Hr : 635 Hz -134 MHz	0.421 V/(A/m)
Campo eléctrico	Monopolo hemisférico	47 HZ - 100 MHz	02.38 V/(A/m)
Equipo de registro	Sony - Tektronix RTD 710.A	DC -100 MHz	100 MS/s 16 bit/word

Descargas inducidas por medio de *rockets* en Alabama y Florida

Los rayos son inducidos algunas veces por líderes de movimiento ascendente que alcanzan los picos altos de las montañas o estructuras hechas por el hombre. Un líder ascendente puede ser inducido, bien en forma artificial, cuando un conductor aterrizado del orden de 200 a 300 metros de longitud es rápidamente arrojado hacia la atmósfera por un *rocket*, debajo de una nube cargada, o bien en forma natural, por la presencia de picos de las montañas, de altas estructuras o elementos.

La práctica de las descargas inducidas por medio de *rockets* se realiza entre otras estaciones en Florida y Alabama; trabajos realizados por el KSC (Kennedy Spacial Center) y los laboratorios nacionales Sandia (SNL), que son similares entre sí y con algunas variaciones con otro sistema desarrollado en el Laboratorio Langmuir, cerca a Socorro, Nuevo México.

Las descargas inducidas con líderes ascendentes presentan un comportamiento similar a las descargas naturales de líder ascendente. Los rayos inducidos en forma



Figura 26. Estructura de lanzamiento de los cohetes para obtener los rayos inducidos (triggered lightning).

ascendente *no* tienen "primera descarga de retorno" como la que generalmente se presenta en descargas normales nube-tierra iniciadas por un líder descendente.

Las corrientes permanentes que siguen los picos de corriente de la descarga de retorno pasados más de 10 ms muestran una gran variedad de formas de onda.

La corriente de las descargas fue medida por una resistencia coaxial Shunt (CVR)⁷ de 0.5 mΩ insertada entre la base de la varilla de contacto de la descarga y el sistema de puesta a tierra.

Las señales de la CVR se transmiten de la varilla de contacto al sistema de instrumentación por medio de dos sistemas diferentes de fibra óptica. Las grabaciones de las corrientes de retorno fueron hechas usando un sistema de fibra óptica de 200 MHz y un osciloscopio LeCroy 9400, el cual permitió capturar los primeros 200 μs, con un muestreo cada 80 ns de ocho registros, con amplitudes que excedieron el umbral de disparo de 1 kA.

Tabla 8.
Características del sistema de medición usado por la SNL en 1990 y 1991.

Experimento	Sensor de corriente (Shunt)	Parámetro	Digitalización				Registro de cinta	
			Umbral de trigger kA	Ancho de banda del sistema MHz	Intervalo de muestreo μs	Límite superior kA	Ancho de banda FM kHz	Límite superior KA
KSC, Florida, 1990	0.5-mΩ CVR	RS	1	2	0.08	100		
		CC	1	1	40.0	~1	Dc a 500 kHz	~1
	0.16-μs RT	CC	1	1	40.0	~0.08	Dc a 500 kHz	~0.08
Fuerte McClellan, Alabama, 1991	1.0-mΩ CVR	RS	2	6	0.02	48		
		0.06-μs RT	CC	2				Dc a 500 kHz

RT, tiempo de ascenso; RS, descarga de retorno; CC, corriente permanente; CVR, resistencia coaxial Shunt; dc, corriente directa.

⁷ También conocida como resistencia Shunt tubular o tubular coaxial, la cual puede llegar a tener mejor respuesta a la frecuencia que las demás convencionales.

Tabla 9.
Resumen de los parámetros registrados en Alabama y Florida.

Parámetro	GM	Probabilidad acumulada		
		95%	50%	5%
Primera descarga de retorno ⁸				
I_p, kA	12	4.7	13	29
$T-10, \mu s$	0.37	0.2	0.32	1.1
$T-30, \mu s$	0.28	0.14	0.24	0.96
TAN-10, $kA/\mu s$	-	-	-	-
S-10, $kA/\mu s$	28	5.4	34	83
S-30, $kA/\mu s$	28	4.6	31	91
TAN-G, $kA/\mu s$	-	-	-	-
CARGA TOTAL, C	2.5	>0.38	>2.1	>15
Integral de acción total, A^2s	3.5×10^3	> 0.4×10^3	> 3.8×10^3	> 20×10^3
Intervalo entre descargas, μs	47	5.0	48	215
Ancho del pico medio, μs	18	5.0	20	40
Duración total de la descarga, ms	12	1.4	11	140
Intervalo entre descargas sin corriente	24	1.4	34	103

Los valores aquí tabulados corresponden a los datos de Alabama (1991) y Florida (1990), previa aplicación de la media geométrica (GM) de cada parámetro registrado.

Las características importantes del sistema de medición empleado por la SNL en 1990 se muestran en la tabla 8, y la tabla 9 contiene los patrones generales de la descarga.

Estación de Pretoria en Suráfrica

En 1973 se construyó la estación de medición cerca de Pretoria en Sudáfrica, liderada por Eriksson ($25^{\circ} 50'$ Sur, $28^{\circ} 0'$ Este), con una estructura de 60 m construida a 175 MSNM y sobre un monte de 80 m allí. La estación construida por el NEERI (National Electrical Engineering Research Institute), es de características similares a la instalada en Suiza). La medida de la corriente se efectuó por medio de un transformador de impulsos de banda ancha. En principio, Eriksson encontró una influencia de la altura de la estructura sobre el mecanismo de descarga; además

⁸ Sabiendo que equivale a una descarga subsecuente en descargas naturales.

realizó la recopilación de mediciones en diferentes zonas de África del Sur, obteniendo en los resultados de la tabla 10 un resumen de los parámetros calculados por Anderson y Eriksson.

Los datos obtenidos en esta estación fueron adoptados por el comité Cigre.

Tabla 10.
Parámetros de la descarga registrados en Suráfrica

Parámetro	Muestra	Unidades	Probabilidad acumulada		
			95%	50%	5%
Primera descarga de retorno					
I_{Pico}	80	(kA)	14.1	31.1	68.5
T - 10	80	(μ s)	1.8	4.5	11.3
T - 30	80	(μ s)	0.9	2.3	5.8
TAN - 10	75	(kA/ μ s)	0.6	2.6	11.8
S - 10	75	(kA/ μ s)	1.7	5.0	14.1
S - 30	73	(kA/ μ s)	2.6	7.2	20
TAN - G	75	(kA/ μ s)	9.1	24.3	65
Descargas subsecuentes					
I_{Pico}	114	(kA)	5.2	12.3	29.2
T - 10	114	(μ s)	0.1	0.6	2.8
T - 30	114	(μ s)	0.1	0.4	1.8
TAN - 10	108	(kA/ μ s)	1.9	18.9	187.4
S - 10	114	(kA/ μ s)	3.3	15.4	72.0
S - 30	114	(kA/ μ s)	4.1	20	99
TAN - G	113	(kA/ μ s)	9.9	39	115

Estos valores son calculados por Eriksson a partir de los datos de Berger.
Son los parámetros adoptados por el Cigre.

Adicionalmente, en la tabla 11 se muestra una recopilación de investigaciones realizadas a nivel mundial de la corriente de rayo.

Tabla 11.
Investigaciones realizadas a nivel mundial sobre la corriente del rayo.

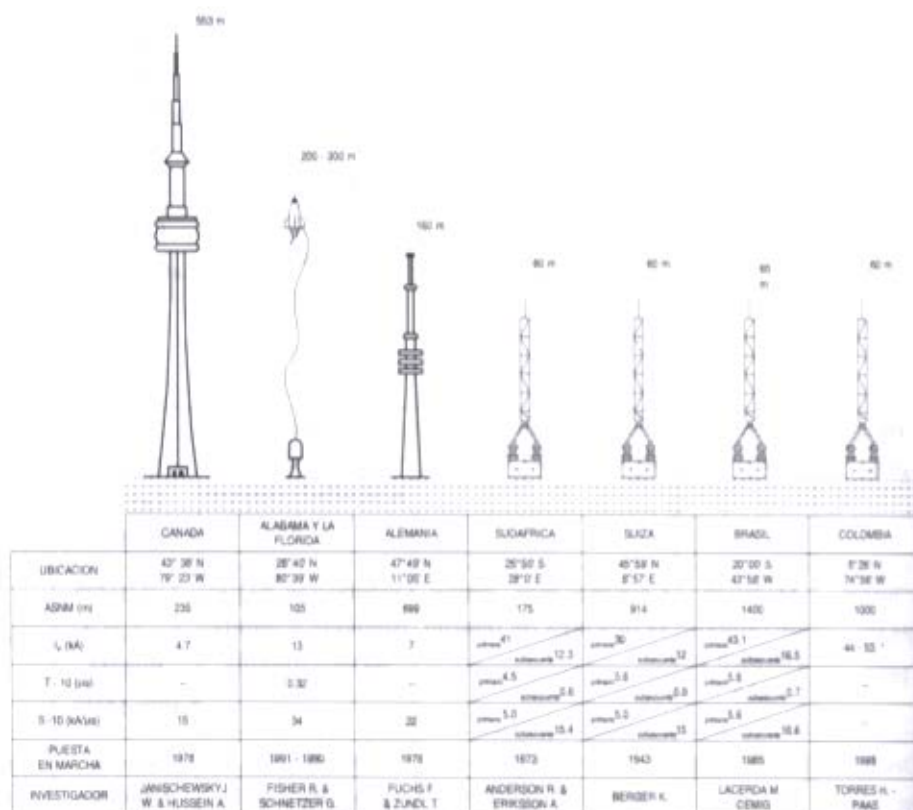
Investigador	Método	Parámetro registrado	Resultados disponibles	Lugar	Mediana (kA)
Berger 1955-1975	Oscilógrafo de rayos catódicos	Corriente pico - 101 primeras descargas de retorno negativas y 26 positivas	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Suiza Monte San Salvatore Latitud 47°N	30 35
Garbagnati 1975	Oscilógrafo de rayos catódicos	Corriente pico - 27 primeras descargas de retorno negativas	--	Italia Diferentes estaciones Latitud 45°N	28
Lee <i>et al</i> 1976	Medición de campo magnético por medio de estructuras aéreas	Corriente pico - 194 primeras descargas de retorno negativas	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Malasia Kuala Lumpur Latitud 4°N	36
Szpor 1966	Mecanismos magnéticos	Corriente pico - descarga de retorno más intensa	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Polonia Latitud 55°N	31
Anderson 1954	Mecanismos magnéticos	Corriente pico - descarga de retorno más intensa	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Rodesia Latitud 10°N	42
Norinder 1945	Medición de campo magnético por medio de estructuras aéreas	Corriente pico - primera descarga de retorno negativa	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Suecia Latitud 60°N	30
Rakov y Dulzon 1980 - 1986	Medición de campo eléctrico con oscilograma	Corriente pico - 662 descargas de retorno más intensas	Proporciona la mediana de 44 kA obtenida en Perú	Rusia Siberia Oriental Latitud 60°N	16
Eriksson 1978	Método directo	Corriente pico - primera descarga de retorno	---	Sudáfrica Latitud 30°N	41

Tabla 11.
Investigaciones realizadas a nivel mundial sobre la corriente del rayo.
(continuación)

Investigador	Método	Parámetro registrado	Resultados disponibles	Lugar	Mediana (kA)
Popolanski 1963 - 1985	Mecanismos magnéticos	Corriente pico - descarga de retorno negativas y positivas	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Checoslovaquia Latitud 47°N	22 29
Herodotou <i>et al.</i> 1989	Medición del campo eléctrico con sistema LLP	Corriente pico - primera descarga de retorno	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Canadá Ontario Latitud 44°N	Según Human 30 Según exponencial 44
Cemig 1998	Método directo	Corriente pico - 32 descargas de retorno	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Brasil Minas Gerais Latitud 20°S	43.1
H. Torres PAAS 1998	Medición de campo eléctrico y LLS	Corriente pico - primera descarga de retorno	Distribución de probabilidad acumulada descendente	Colombia Santafé de Bogotá Latitud 5°N	43
Orville 1988 - 1997	Medición de campo magnético con una red de medición de rayos	Corriente pico - 5,300,000 primeras descargas de retorno	Distribución geográfica de la corriente pico promedio	Estados Unidos Nueva Inglaterra, Latitud 45°N Florida, Latitud 30°N Nueva Guinea Papua, Latitud 4°S	Vr. medio Nueva Inglaterra, 25 Florida, 40-45 Papua, 25

Estaciones de medición directa de parámetros de rayo en el mundo

En la figura 29 se presenta un resumen de las estaciones de medición directa de parámetros del rayo actualmente en operación en el mundo, con su ubicación.



* Datos obtenidos a partir de registros tomados en la estación de un relámpago a 149 m de alto.

Figura 29. Resumen de las estaciones de medición directa de rayos en el mundo.

Referencias

- Almeida M. *et al.*, "Tower Modeling For Lightning Surge Analysis Using EMPT", *IEEE Proc. Gen. Trans. Distrib.*, Vol. 141, No. 6, 1994.
- Amoruso, V., "Lightning Originated Tangential Electric Field Across Air-soil Interfaces", *IEEE. Proc-sci. Meas, tecnolog.*, Vol. 141, No. 1, enero de 1994.
- Anderson, R. B., Eriksson, A. J., "Lightning Parameters for Engineering Application", *Electra* No. 33, Cigre Study Committee, 1979.
- Baracaldo, M., "Diseño y construcción de una resistencia para la medición de corrientes de impulso de gran magnitud", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, 1990.
- Baracaldo, M., Gutiérrez, J., "Design and construction of a resistance to measure impulse currents" (in Spanish), BSc. Thesis - National University of Colombia, 1990.
- Berger, K., Anderson, R. B., Kroninger, H., "Parameters of lightning flashes", *Electra* No. 41, 1975.
- Cardona, H., "Índices de fallas de transformadores calculados para la zona de Samaná - Caldas", tesis de especialización, Universidad Nacional, sede Manizales, octubre de 1998.
- Catálogos de fabricantes de Sistemas localizadores de rayos.
- Cherchiglia, L., Carvalho, A., Souza, V., "Lightning Program carried out by CEMIG", Int. Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte Brazil, April 1998.
- De la Rosa, F., Brito, F., Velázquez, R., "Lightning location in operation worldwide a review for power system utilization", paper Cigre WG33.11 TP-01, meeting in Brussels, Sept. 1992.
- EPRI, "Transmission Line Reference Book 345 kV and Above", 2nd edition, EPRI Inc., Palo Alto, Calif. USA, 1982.
- Guerrieri S. *et al.*, "On The Influence of Elevated Strike Objects on Directly Measured and Indirectly Estimated Lightning Currents", *IEEE. Trans. On Pow. Del.*, Vol. 13, 1998, pp. 1543-55.
- Guerrieri, S., Nucci, C., Rachidi, F., Rubinstein, M., "On The Influence of Elevated Strike Objects on Directly and Indirectly Estimated Lightning Currents" *IEEE. Transactions on Power Delivery*, 1998.
- Hara, *et al.*, "Modeling of a Transmission Tower For Lightning Surge Analysis", *IEEE. Pro. Gen. Trans. Distr.*, Vol. 143, No. 3, 1996.
- Lees, M. I., "Measurement of Lightning ground strikes in the UK", EA Technology Memorandum, London, England, June 1992.

Matoyama *et al.*, "Electromagnetic Field Radiation model for lightning strokes to tall structures", *IEEE. Trans. On Pow. Del.*, Vol. 11, No. 3 Jul, 1996.

Montandón, E., "Lightning positioning and lightning parameter determination experiences and results of the Swiss PTT research project", 21st. ICLP, Berlin, 1992, pp. 307-312.

Mundo electrónico, No. 188, octubre de 1988, y No. 191, enero de 1989. Network Characterization Studies, Lightning Location and Protection Inc., Catalog, 1992.

Niño, J., "Estudio y construcción de la bobina de Munich para la medición de corrientes de rayo", proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, 1989.

Orville, R. E., "Calibration of a magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak currents", *Jour. Geophys. Res.* 96, 1991, pp. 17135-17142.

Pellinen, D. *et al.*, "Rogowski coil for measuring fast, high level pulsed currents", *Rev. Sci. Instrum.* 51 (11), Nov. 1980.

Rakov, V. A. *et al.*, "On the empirical formula of Willett *et al.*, relating lightning return stroke peak current and peak electric field", *Jour. Geophys. Res.*, 1989.

Schwab, A., *Hochspannungsmesstechnik*, Berlin, Springer Verlag, 1972.

Servicio de Información de la NASA vía Internet:

<http://www.ghrc.msfc.nasa.gov/>

The Lightning People, Atmospheric Research System Inc., Catalog, 1992.

Thottappillil, R., Rakov, V. A., Uman, M. A. *et al.*, "Lightning Subsequent-Stroke, Electric Field Peak Greater than the First Stroke Peak and Multiple Ground Terminations", *Jour. Geogr. Res.*, 1992.

Torres, H., "Aspectos fundamentales para la definición del sistema de detección de descargas eléctricas atmosféricas", Documento Recma, Bogotá, marzo de 1992.

Torres, H., "Sistemas localizadores de rayos", Documento Recma, Grupo Nacional de investigación en descargas eléctricas atmosféricas, Santa Fe de Bogotá, abril de 1993.

Torres, H., "Variations of Lightning Parameter Magnitudes within Space and Time", Int. Conf. Lightning Prot 24th, ICLP, Birmingham, UK, Sep. 1998.

Torres, H. *et al.*, "Metodología para la solución de un gran reto tecnológico: Las fallas de transformadores de distribución", EEB, Informe final, marzo de 1998.

Torres, H., Barreto, L., Enciso, L., "Multiple Time Series Analysis In Tropical Lightning Research", Int. Conference on Lightning Protection 22nd ICLP, Budapest Hungary, September 1994.

Torres, H., Barreto, L., Rondón, D., Briceño, W., "Spatial and Temporal Analysis of Ground Flash Density in Tropical Zone", Int. Symposium on High Voltage Eng. 10th ISH, Montreal, Canada, Sep. 1997.

Torres, H., Castaño, O., *El rayo*, Santa Fe de Bogotá, Editorial Icontec, 1994, p. 154.

Torres, H., Ruales, L. K., Barreto, L., Herrera, F., "Experience and first results of Colombian Lightning Location Network" Proceedings 23rd. International Conference on Lightning Protection - ICLP, Florence, Italy, Sept. 1996, pp. 186-190.

Uman, A. M., "Value of Measured Remote Electric and Magnetic Field Waveforms from Lightning Return Strokes in Determining Return Stroke Characteristics" (comunicación personal), 1992.

Uman, M. A., and Krider, E. P., "Natural and Artificially Lightning", *Science*, 1989, pp. 246, 457-464.

Uman, M. A., "The Lightning Discharge", Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1987.

Ward, D. A., Exon, J., "Using Rogowski coils for transient current measurements", *Engineering Science and Education Journal*, June 1993.

Whipple, F. J. W., "On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorms over the globe", *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 55, 1929, pp. 1-17.

Willet, J. C. *et al.*, "An experimental test of the 'transmission-line model' of electromagnetic radiation from triggered lightning return strokes", *Jour. Geophys. Res.*, 1988.

Willet, J. C., *et al.*, "Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model", *Jour. Geophys. Res.*, 1989.

Williams, E., Boccippio, D., Petersen, W., Rutledge, S., Ishii, M., Hidayat, S., Torres, H., Jayaratne, R., Yair, Y., Levin, Z., Mackerras, D., "Latitude Dependence of Ground Flash Density in the Tropics and Subtropics", American Geophysical Union, Meeting, San Francisco, 1996.

Wilson, E. R., "Precise Time is needed to determine sequence of events", *Transmission and Distribution*, 46-49, December, 1988.

Yamada, T., "Experimental Evaluation of a UHV Tower Model For Lightning Surge Analysis", *IEEE. Trans. On Pow. Del.*, Vol. 10, No. 1, 1995.

Glosario de términos relacionados con el rayo

Introducción

A continuación se presentan algunos términos relacionados con el rayo que se encuentran a lo largo del libro. La pretensión con este pequeño glosario no es presentar un diccionario de términos relativos a los rayos, sino compartir con el lector aquellos conceptos que en idioma español pueden llevarnos a erróneas interpretaciones. Algunos términos, como *stroke*, se ha preferido dejarlos en idioma inglés, pues su traducción al español, como muchas otras palabras técnicas, traería confusión en vez de aclaración.

Este glosario puede ser complementado con las referencias presentadas en cada uno de los capítulos del libro, pero especialmente con el libro *Lightning Discharge*, del profesor Martin Uman y la enciclopedia *Climate and Weather*, de la editorial Oxford University Press.

Los términos no se encuentran ordenados alfabéticamente. Primero se presentan los relacionados con la descarga eléctrica atmosférica, y a continuación los términos relacionados con la física de la atmósfera. Entre paréntesis y en cursiva se encuentra el correspondiente término en inglés.

Sobre términos relacionados con el rayo

- Descarga eléctrica atmosférica o rayo (*Lightning discharge*) se define como la transferencia de carga positiva o negativa dentro de la nube, de nube a nube, de nube a tierra o de tierra a nube. Recientemente, en esta década, investigadores, principalmente norteamericanos de la NASA, han reportado y comienzan a investigar las descargas nube-ionosfera, bautizadas con nombres en inglés como *Red Sprites* y *Blue Jets*.

- El rayo tipo nube-tierra (*Cloud-to-Ground C-G discharge*) es el más dañino y peligroso. Aunque no es el más común, es uno de los más estudiados y mejor entendidos. La mayor parte de ellos se origina cerca del centro de carga negativo de la nube de tormenta y libera carga negativa hacia la tierra. En menor proporción (aunque depende de variaciones espacio-temporales) se transporta carga positiva hacia la tierra. Las descargas positivas ocurren generalmente durante la etapa de disipación de una tormenta. El rayo tipo nube-tierra está compuesto típicamente de una secuencia de descargas de retorno (*return strokes*) individuales, que transfieren carga eléctrica de la nube a la tierra. Cada *stroke* presenta corrientes de retorno pico dentro de un rango típico de 1 kA a 400 kA.

- El rayo intranube (*Intra-Cloud discharge*) es el tipo más común de descarga. Ocurre entre centros de carga opuestos dentro de la misma nube de tormenta. Usualmente el proceso se realiza dentro de la misma nube, y al observarlo desde la parte externa de la nube se ven destellos muy difusos. Sin embargo, la descarga puede salir de los límites de la nube y un canal brillante, similar al de una descarga nube - tierra, puede ser visible a varios kilómetros de distancia.

- El rayo entre nubes (*Inter-Cloud discharge*), como su nombre lo indica, ocurre entre centros de carga en dos diferentes nubes con la descarga puenteando el espacio de aire entre ellas.

- Antes de 1990, la literatura especializada en descargas eléctricas atmosféricas reportaba ocasionales descargas luminosas que aparecían a grandes alturas en la estratosfera sobre nubes de tormenta. En 1926, el científico Boys creyó que tales eventos se presentaban una sola vez en la vida. Sin embargo, en 1956, Wilson especuló que una descarga entre la parte alta de una nube y la ionosfera podría estar acompañada de una descarga a tierra. El fenómeno, ahora conocido como espectro (*sprite*), primero fue accidentalmente documentado con base en grabaciones de video en la noche del 6 de julio de 1989. En 1994, una firma norteamericana editó un video con el nombre *Red sprites and Blue Jets*, con lo cual se popularizaron los nombres y ofrecieron un vocabulario de términos para describir los atributos visuales. Un tercer fenómeno fue descubierto con grabaciones de video en octubre de 1990, en la parte baja de la ionosfera, directamente sobre una tormenta activa. Éste consistía en un gran resplandor horizontal de varios cientos de kilómetros. En 1995, la firma norteamericana Lyons confirmó la existencia de este tipo de destellos breves a los que llamaron *Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations From Electromagnetic Pulse Sources* (ELVES). Debido a que los *sprites*, *jets* y ELVES han estado desde hace miles de años, su descubrimiento era inevitable. Un evento típico de estos tres fenómenos se caracteriza por filamentos simples o múltiples que se extienden 30 o 40 kilómetros sobre una tormenta. Los ejemplos

de grabaciones fueron encontrados en zonas templadas y tropicales, sobre los océanos y sobre la parte continental.

Los detalles de por qué una descarga ocurre dentro de una nube o llega a tierra no están aún entendidos. Quizás una descarga se propaga hacia la tierra cuando el gradiente de potencial eléctrico en las regiones bajas de la nube es más fuerte que en la dirección de descenso.

Dependiendo de la altura de la nube sobre la tierra y cambios en la magnitud del campo eléctrico entre nube y tierra, la descarga se realiza dentro de la nube o hace contacto directo con tierra. Si la magnitud del campo eléctrico es mayor en las regiones bajas de la nube, una descarga descendente puede ocurrir de nube a tierra.

Hay muchos otros nombres y descripciones que la literatura le ha dado a los rayos en diferentes idiomas. Algunos pueden ser ilusiones ópticas o mitos. Algunos bellos términos populares dados en el idioma español son: centella, destello, chispa, relámpago, exhalación.

Un *flash* se compone de uno o más *strokes*, con una duración de 20 a 50 microsegundos y con una separación típica entre cada uno de 20 a 100 milisegundos.

Según investigaciones a nivel mundial (incluido Colombia) un *flash* se compone, en promedio, de 2 a 3 *strokes*, pero se tienen referencias de máximo veintiséis. En Colombia, con el sensor de tormentas TSS 420 de la Universidad Nacional de Colombia se han detectado hasta 14 *strokes/flash*. El número de *strokes/flash* se refiere más comúnmente al término multiplicidad.

Para la mayor parte de *flashes*, las descargas subsecuentes (*strokes* que ocurren después del primero) impactarán en la tierra en el mismo punto que el primero, debido a que ellos viajan a través del canal establecido por la primera descarga. Sin embargo, aproximadamente una tercera parte de todos los *flashes* pueden contener *strokes* con diferentes puntos de impacto a tierra, separados por unos cuantos cientos de metros hasta varios kilómetros.

Además de los rayos nube-tierra, hay numerosos tipos de rayos entre nubes que no encuentran su camino a tierra. Algunos de estos rayos preceden a eventos individuales de rayos nube-tierra, mientras que otros son grandes rayos entre o intranubes, que no tienen relación específica con rayos nube-tierra.

Es razonable definir la localización de un rayo nube-tierra con base en su punto de impacto a tierra (o el punto de impacto del primer *stroke* de un *flash*), pero no es precisa la localización de un rayo entre o intranubes. Un rayo típico entre nubes puede tener una extensión horizontal de 10 a 20 km.

Debido a lo anterior y al hecho de que los rayos nube-tierra son los eventos más importantes para el hombre y su entorno, los sistemas localizadores de rayos han trabajado históricamente para identificar y eliminar rayos entre o intranubes de los eventos reportados por los sistemas. Sin embargo el potencial de conocimiento de los rayos entre o intranubes en aplicaciones como "prevención temprana" (*early warning*) puede cambiar esta perspectiva en el futuro.

Sobre términos relacionados con la física de la atmósfera

Ionosfera

Las características geofísicas que tienen las dimensiones globales de la forma esférica de la tierra se denominan con el sufijo en español *sfera*. Un *ion* es un átomo o configuraciones de grupos de átomos que han sido cargados por la pérdida o ganancia de uno o más electrones de carga negativa. La medición de la densidad electrónica de un gas ionizado (llamado *plasma*) en la atmósfera puede ser usado para indicar el grado de ionización del gas. El nombre ionosfera es dado a la región de la atmósfera que se extiende desde cerca de los 60 hasta los 1000 kilómetros sobre la superficie de la Tierra¹; aquí la densidad electrónica es suficientemente alta como para afectar la transmisión de ondas electromagnéticas de radiofrecuencia.

Corriente eléctrica de buen tiempo (*Fair-weather electric current*)

Es equivalente a una corriente dispersa que ocurre entre dos electrodos esféricos. Es decir, la carga espacial se mueve hacia abajo a través de la atmósfera (dieléctrico) entre la ionosfera y la Tierra (electrodos). El transporte neto de carga positiva ocurre con una corriente entre 1300 y 1800 amperios sobre la superficie total de la Tierra. Los estudios sobre electricidad atmosférica plantean la hipótesis que los rayos son la causa de la corriente eléctrica de buen tiempo, transportando carga negativa a tierra (manteniendo la capacidad esférica cargada). Si los rayos no ocurren continuamente, la capacidad Tierra-ionosfera perdería su corriente en menos de 10 minutos.

¹ Para efectos de estimación del potencial ionosférico se considera una altura entre la superficie de la Tierra y la ionosfera de alrededor de 100 kilómetros.

Campo eléctrico de buen tiempo (*Fair-weather electric field*)

Tiene un valor promedio medido de 120 voltios por metro dirigido hacia la Tierra. Su valor decrece exponencialmente con la altura y con la densidad del aire (debido a la reducción del esfuerzo dieléctrico, causando el incremento de la conductividad atmosférica).

Inestabilidad condicional (*Conditional Instability*)

Cuando la variación del intervalo atmosférico está entre la variación del intervalo adiabático y la variación del intervalo adiabático saturado, ocurre inestabilidad condicional. La inestabilidad condicional es usada como herramienta de predicción de la existencia y naturaleza de nubes cúmulus y cumulonimbus.

Procesos adiabáticos (*Adiabatic Processes*)

El concepto de procesos adiabáticos es parte esencial de la ciencia termodinámica. Procesos adiabáticos son aquellos que no implican ganancia o pérdida de calor. La palabra adiabático viene de una palabra griega que significa "impasable". Entonces, un sistema que soporta un proceso adiabático puede ser imaginado como rodeado de una barrera por donde no puede pasar calor.

Procesos adiabáticos saturados (*Saturated Adiabatic Processes*)

Suponga que el aire dentro de un balón imaginario está inicialmente saturado con vapor de agua, tal que la humedad relativa es 100%. Entonces, si el balón es movido verticalmente hacia arriba, hasta que el aire dentro de él comience a enfriarse, éste se supersaturará. Si el exceso de vapor de agua se condensa hasta mantener la humedad relativa al 100%, el calor latente será liberado. Este calor latente tendrá el efecto de calentar el aire dentro del balón hasta el punto de impedir el enfriamiento adiabático (condensación).

La variación a la cual la temperatura decrece con la altura, en una atmósfera saturada, es llamada la variación del intervalo adiabático saturado (*Saturated Adiabatic Lapse Rate*).

Convección (*Convection*)

Se refiere a los movimientos verticales de masas. Estos movimientos, debidos a fluctuaciones o fuerzas mecánicas, dan un medio eficiente de transporte vertical de calor, masa y *momentum* en la atmósfera. La convección causada por fuerzas de fluctuación resulta de diferencias de temperatura y densidad dentro de la atmósfera. El aire caliente es menos denso que el aire circundante frío, lo cual hace que el primero se eleve.

Convección profunda (*Deep Convection*)

Cuando el aire húmedo se eleva en una atmósfera potencialmente inestable, hay una energía potencial convectiva disponible (CAPE, por su sigla en inglés) para que éste suba su nivel de fluctuación neutra, usualmente a algún lugar de la troposfera superior. Esta elevación y la atmósfera inestable dan como resultado la formación de nubes, precipitación y células convectivas de elevación profunda.

Efectos orográficos. Las montañas de la Tierra afectan el tiempo (atmosférico) de diferentes formas, en escalas espaciales desde 1 kilómetro o menos hasta la circulación global, y en escalas de tiempo que van desde unos cuantos minutos hasta días, semanas, meses o años. Los efectos acumulativos de todos estos procesos constituye el clima. La importancia para el tiempo (atmosférico) de los efectos orográficos (forma de las montañas) es comparable con la diferencia entre las dos superficies de la Tierra: océanos y continentes. Las montañas modifican el flujo atmosférico a gran escala, cambiando el curso y la evolución de los sistemas de tormentas, generando su propio patrón de circulación de aire, y alterando la distribución de la formación de nubes y la precipitación.

Estudios sobre terrenos montañosos, realizados por Banta en 1987² han demostrado que hay sitios preferidos en las montañas donde las tormentas tienden a formarse. Otros investigadores como Wilson y Schreiber³ han investigado los fenómenos de convección diurna y nocturna usando datos de satélite y radar.

Los mecanismos que pueden producir convección profunda en las montañas son los siguientes:

- Convergencia por sotavento (*Leeside convergence*). El mecanismo por sotavento forma vientos descendentes tras las montañas, las cuales actúan como barreras.

2 R. Banta, et al., "Thunderstorm Genesis Zones in the Colorado Rocky Mountains as Determined by Traceback of Geosynchronous Satellite Images", *Monthly Weather Review*, Vol. 115, No. 2, February 1987.

3 J. Wilson, W. Schreiber, "Initiation of Convective storms at radar-observed boundary layer convergence lines", *Mon. Wea. Rev.*, 1986.

Esto es causado por la convergencia de fuerzas térmicas que fluyen monte arriba y los vientos opuestos al otro lado de la montaña. Véase figura A.1.

- Efectos de vela (*Wake effects*). En los efectos de vela, las corrientes de aire ascendentes son generadas por turbulencia. En este caso, la montaña actúa como obstáculo y los vientos fluyen alrededor de la montaña produciendo confluencia. Véase figura A.2.

- Flujo en valles convergentes (*Channeling*). Los valles con paredes laterales convergentes también producen confluencia de flujos (acanalados). Véase figura A.3.

- Elevaciones orográficas (*Orographic lifting*). En este caso, el aire puede ascender hasta lograr la saturación y desestabilizar la columna atmosférica, de tal manera que esto puede mejorar la formación de tormenta convectiva. Véase figura A.4.

Existen otros mecanismos que pueden producir convección profunda, pero no dependen de la topografía.



Figura A1. Convergencia por sotavento.



Figura A2. Efectos de vela.



Figura A3. Flujo en valles convergentes.



Figura A4. Elevaciones.

Clasificación de las nubes

La difícil tarea de clasificar objetivamente las principales formas y tamaños de las nubes fue realizada por el boticario inglés Luke Howard, en 1803.

Howard ideó un esquema para la clasificación de las nubes donde, al igual que los que ponían a punto los biólogos para clasificar las plantas y los animales, usaba nombres latinos para identificar cada tipo y describir sus principales características visuales. El esquema comprendía diez tipos básicos o géneros y a cada uno de ellos le correspondían varias especies.

Howard y el naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck observaron que había tres sistemas básicos de nubes: nubes altas compuestas de trozos de hielo, a las cuales Howard llamó *cirros* (del latín filamento de cabello); nubes laminares, que llamaron *estratos* (una capa), y nubes con una fuerte arquitectura vertical, a las cuales él llamó *cumulus* (un montón o una pila). Howard también introdujo el término *nimbos* (del latín, nube de lluvia) para nubes de precipitación.

Con los años, la clasificación de Howard fue gradualmente aceptada, reformulada y desarrollada, hasta alcanzar su forma moderna hacia 1880, con diez tipos de nubes:

Cirros (*ci*): nubes pequeñas con forma de manchas o bandas blancas, a veces sedosa. Suelen tener aspecto de filamentos plumosos con los extremos acabados en ganchos.

Cirroestratos (*Cs*): velo blanco transparente suave y uniforme o fibroso. Normalmente genera halos.

Cirrocumulus (*Cc*): capa fina continua o fragmentaria formada por pequeños elementos. Normalmente produce "cielos aborregados".

Altoestratos (*As*): capa de nube gris, sin características particulares; puede ser fibrosa o uniforme. El sol la atravesará débilmente, pero ese tipo de nubes no produce efectos ópticos.

Altocumulus (*Ac*): de forma muy variable, continua o fragmentada. Si predominan las formas onduladas, como de lente, se le denomina lenticular, mientras que si presenta protuberancias verticales como las almenas de un castillo, se llama "*castellatus*" o "*castellanus*".

Nimboestratos (*Nb*): nube de lluvia, gris oscura, densa.

Estrato (*St*): se forma de capas grises uniformes, continuas o fragmentadas; suele producir lluvia o nieve.

Estratocumulus (*Sc*): capa gris o blanca con áreas oscuras. Normalmente en rizos, ondulaciones y masas redondeadas. Suele presentar una distribución regular.

Cumulus (Cu): nubes densas, blancas y sueltas con forma bien definida y una evolución marcadamente vertical.

Cumulonimbus (Cb): extremo desarrollo de una nube *cumulus*. Con aspecto de gran torre, es oscura en la base y está asociada con precipitación y rayos.

Las especies son:

Fibratus: filamentos, sin ganchos o penachos en Ci y Cs.

Uncinus: un *cirrus* que acaba en gancho o penacho.

Spissatus: *cirrus* denso que forma a menudo la cima del Cb.

Nebulosus: en forma de fino velo, en Cs y St.

Stratiformis: en una amplia capa Ac y Sc.

Lenticularis: lente bien definida o almendrada en Cc, Ac y Sc.

Castellanus: como la almena de un castillo en Ci, Cc, Ac y Sc.

Floccus: en pequeños penachos cumuliformes con la parte inferior rasgada en Ci, Cc, Ac y a veces en Sc.

Fractus: en pedacitos rasgados, irregulares en St y Cu.

Humilis: *cumulus* con muy poco crecimiento vertical.

Mediocris: *cumulus* moderado con cimas deformadas.

Congestus: *cumulus* grande completamente "coliflor".

Calvus: Cb con las partes superiores empezando a convertirse en fibrosas.

Capillatus: Cb con características de *cirrus* en la parte superior.

La altura de las nubes está expresada como la altura de su base sobre el nivel de la tierra. Las nubes "altas" (cirros, cirroestratos y *cirrocumulus*) son aquellas con bases sobre los 5 kilómetros, y por tanto son las nubes más frías. Las nubes "medias" (altoestratos y *altocumulus*) tienen bases entre 2 y 8 kilómetros, y nubes "bajas" (nimboestratos, *estrato-cumulus*, estratos, *cumulus* y *cumulonimbus*) son nubes hasta o por debajo de 2 kilómetros.

Las nubes *cumulus* y *cumulonimbus* son también llamadas *nubes convectivas*, porque las fuertes corrientes verticales de aire ascendente en estas nubes son muy efectivas en calor convectivo y húmedo. Las nubes convectivas son el medio dominante de transporte de calor y aire ascendente húmedo en la mayor parte de la atmósfera.

Curvas de probabilidad de nivel ceráuneo y densidad de descargas a tierra para Colombia

Variación espacial del nivel ceráuneo

El NC fue evaluado en áreas de 30 x 30 km², encontrándose zonas con valores entre 11 y 289 días tormentosos-año. La figura B1 muestra la variación de estos valores en la geografía colombiana para el año 1999.



Figura B1. Mapa de NC para Colombia, 1999.

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 B1 y en la figura B2. Se presentan variaciones en valores desde 0.0012 hasta 11.4, con un valor de media aritmética de 3 [*strokes*/ km^2 -año].

Tabla B1.
Actividad de rayos en la geografía colombiana entre 1997-1999. Área = $1393 \times 900 \text{ km}^2$.

Año	Total <i>strokes</i>	DDT media [<i>strokes</i> / 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 $30 \times 30 \text{ km}^2$, se encuentran en la geografía colombiana, zona tropical, valores de DDT de 35 [*strokes*/ km^2 -año] como se muestra en la figura B3. Si se hace una evaluación local, tomando áreas menores de $3 \times 3 \text{ km}^2$, 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*/ km^2 -año (1997). Para este último caso la multiplicidad *m* fue de 1 *stroke/flash*.

¹ Williams, H. Torres, E. Boccippio, D. Petersen, W. Rutledge, S. Ishii, M. Hidayat, S. Jayaratne, R. Yair, Y. Levin, Z. D. Mackerras, "Latitude Dependence of Ground Flash Density in the Tropics and Subtropics", *American Geophysical Union, Meeting, San Francisco, 1996*.



Figura B2. DDT Colombia 1999 (áreas 300 x 300 km²).

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:

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

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:

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

$$DDT = 176 \cdot LAT^{-3.8} \cdot NC \tag{2}$$

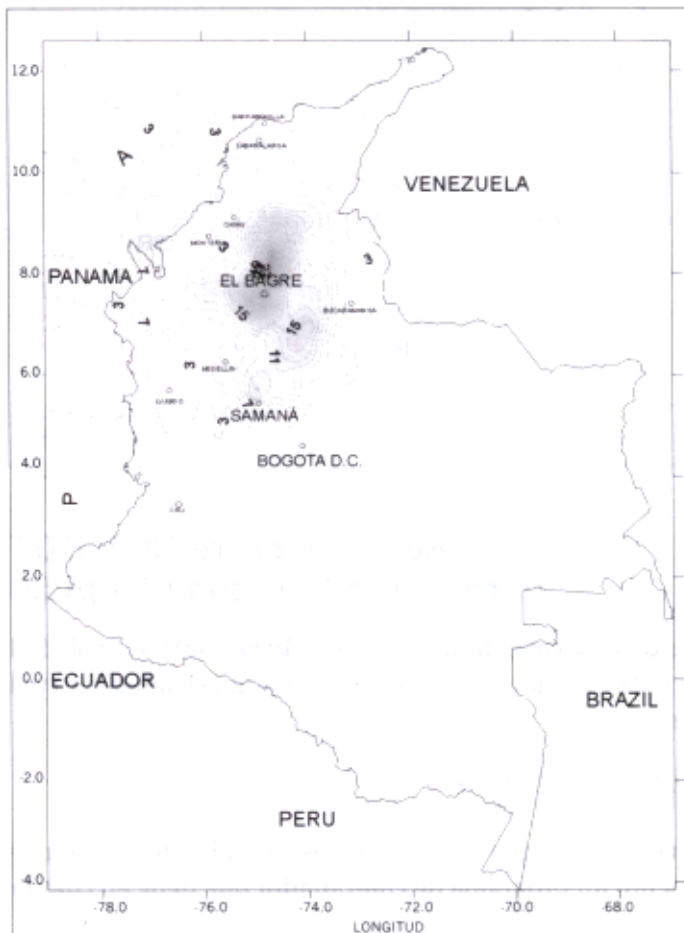


Figura B3. DDT Colombia 1999 (áreas 30 x 30 km²).

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 B2 presenta los resultados. La evaluación de DDT usando las fórmulas 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 B2 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. Éstas 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.

2 GFD: *Ground Flash Density*.

3 M. Darveniza, "Some Lightning Parameters Revisited", 25th ICLP, Rhodes, Greece, 2000, pp. 881-888.

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 B2 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 Himat⁴, 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.

4 Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.

Tabla B2.
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	18.12	46.2	35.2	27	49	71	31
	Samaná	5.26	74.5	251	7.68	40.0	30.3	6	22	567	405
	Medellín	6.07	75.26	263	10.85	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: $DDT = 0.04 \cdot TD^{1.25}$ Cigre/IEEE/IEC, fórmula para $m = 1$

EQ3: $DDT = 0.023 \cdot TD^{1.25}$ 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:

$$\varepsilon = \left[\frac{\text{Real} - \text{Calculado}}{\text{Calculado}} \right]$$

Tabla B3.
NC para 34 estaciones sinópticas colombianas (1974-1990).

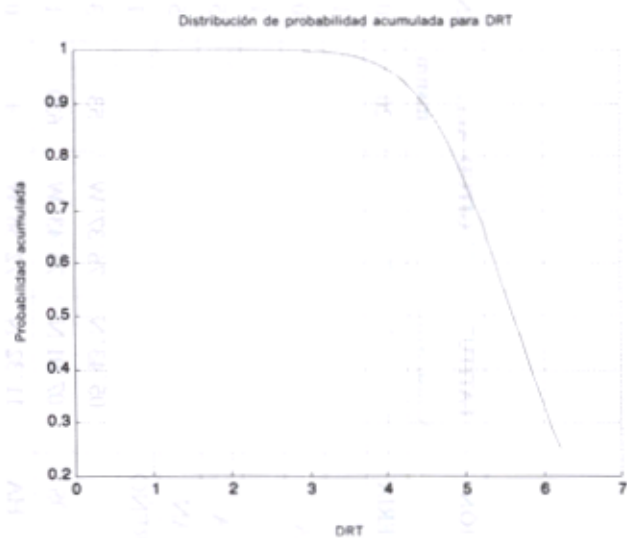
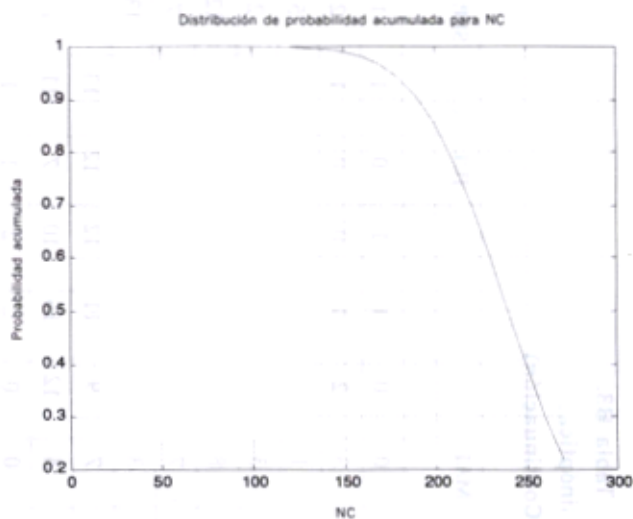
ESTACIÓN	LATITUD Grad. Min.	LONGITUD Grad. Min.	ALTITUD msnm	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	NC PROM.
ARMENIA	04°27'N	75°46'W	1204	1	3	3	5	4	2	2	2	3	6	5	3	39
B/BERMEJA	07°01'N	73°48'W	126	2	4	6	10	11	9	10	11	11	11	7	4	96
B/QUILLA	10°53'N	74°47'W	14	0	0	0	1	5	7	4	8	10	9	4	1	49
BOGOTÁ	04°43'N	74°09'W	2547	5	7	9	10	9	4	2	3	8	14	11	6	88
B/MANGA	07°08'N	73°08'W	931	1	3	4	8	6	5	6	7	6	7	5	2	60
CALI	03°33'N	76°23'W	961	6	7	9	12	13	7	7	7	10	15	11	7	111
CARTAGENA	10°27'N	75°31'W	2	0	0	0	3	9	12	12	14	15	13	7	2	87
COROZAL	09°20'N	75°17'W	166	0	1	1	3	4	4	4	5	7	5	3	1	38
CÚCUTA	07°56'N	72°31'W	250	0	0	0	1	3	1	1	3	3	4	2	0	18
EL BANCO	09°04'N	73°59'W	34	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2
GIRARDOT	04°17'N	74°48'W	286	3	5	5	6	5	2	1	3	5	6	5	3	49
IBAGUÉ	04°26'N	75°09'W	928	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3	3	2	24
IPIALES	00°49'N	77°38'W	2961	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	8
LETICIA	04°09'S	69°57'W	84	3	3	3	2	2	1	3	5	5	7	6	3	43
MAGANGUÉ	09°16'N	74°49'W	18	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	0	0	7
MANIZALES	05°02'N	75°28'W	2080	1	1	3	4	4	2	1	1	3	5	3	1	29
MEDELLÍN	06°07'N	75°26'W	2140	4	7	11	15	16	11	9	9	15	18	14	8	137

Tabla B3.
 NC para 34 estaciones sinópticas colombianas (1974-1990).
 (Continuación)

ESTACIÓN	LATITUD Grad. Min.	LONGITUD Grad. Min.	ALTITUD msnm	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	NC PROM.
MONTERÍA	08°49'N	75°51'W	20	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	6
NEIVA	02°58'N	75°18'W	439	1	2	3	2	1	0	0	1	2	4	3	2	21
OCAÑA	08°19'N	73°22'W	1435	0	1	1	2	4	2	2	3	5	5	2	1	28
PASTO	01°25'N	77°16'W	1796	1	1	3	3	4	1	0	1	2	5	2	2	24
PEREIRA	04°49'N	75°44'W	1342	5	5	8	10	10	10	8	8	12	13	10	7	106
POPAYÁN	02°26'N	76°35'W	1730	5	7	7	7	8	5	3	4	7	10	10	7	80
P. CARREÑO	06°11'N	67°29'W	50	1	2	3	8	10	9	8	11	13	14	9	3	91
QUIBDÓ	05°43'N	76°37'W	53	3	5	7	9	11	12	12	13	12	10	9	6	109
REMEDIOS	07°01'N	74°43'W	630	1	2	4	12	16	10	7	11	11	14	8	4	100
RIOHACHA	11°32'N	72°56'W	4	0	0	0	0	2	2	1	1	3	3	2	0	14
S. ANDRÉS	12°35'N	81°43'W	1	0	0	0	0	2	8	7	7	9	7	5	1	46
S. JOSÉ OC.	04°33'N	70°55'W	171	0	2	4	9	9	7	6	8	11	13	9	2	80
S. MARTA	11°08'N	74°14'W	4	0	0	0	4	14	16	16	18	21	18	8	1	116
TUMACO	01°49'N	78°45'W	3	1	2	4	5	4	4	3	2	2	1	1	1	30
TURBO	08°07'N	76°44'W	1	1	1	2	4	10	7	7	11	11	9	4	2	69
VALLEDUPAR	10°26'N	73°15'W	138	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	7
V/VICENCIO	04°10'N	73°27'W	423	0	1	2	4	3	1	1	3	5	6	4	2	32

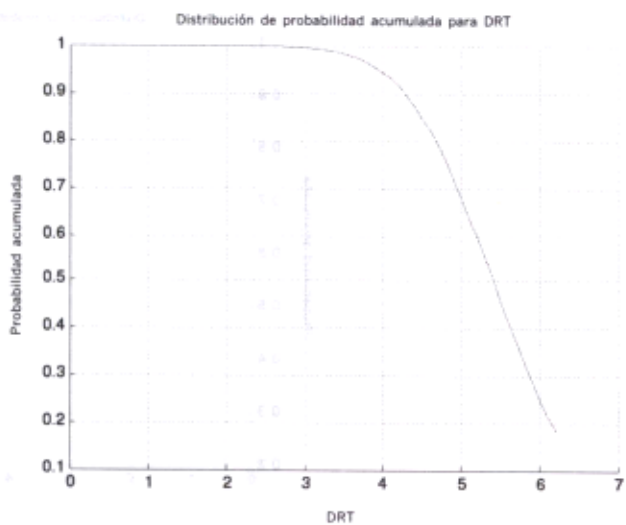
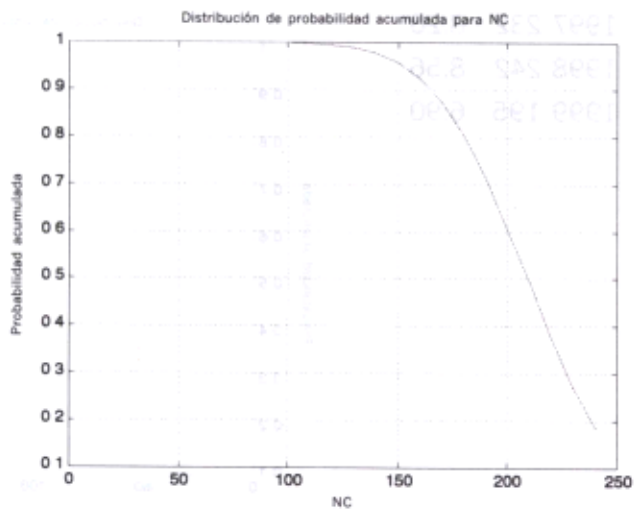
SITIO: Barranquilla
LATITUD: 10°53'N
LONGITUD: 74°47'W
ALTITUD: 14 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	263	6.15
1998	261	6.10
1999	196	4.58



SITIO: Cartagena
 LATITUD: 10°27'N
 LONGITUD: 75°31'W
 ALTITUD: 2 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	217	5.60
1998	239	6.17
1999	172	4.44



SITIO: Corozal

LATITUD: 9°20'N

LONGITUD: 75°17'W

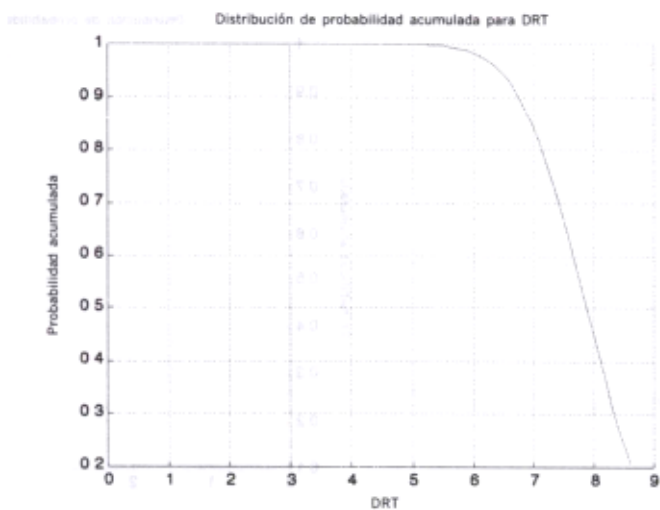
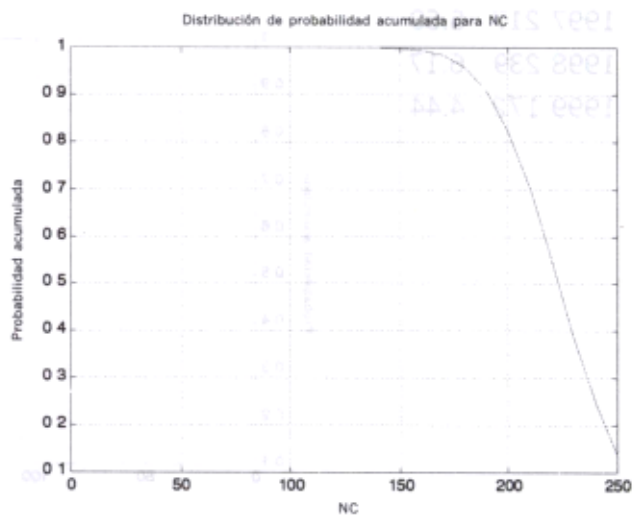
ALTITUD: 166 msnm

AÑO NC DRT

1997 232 8.20

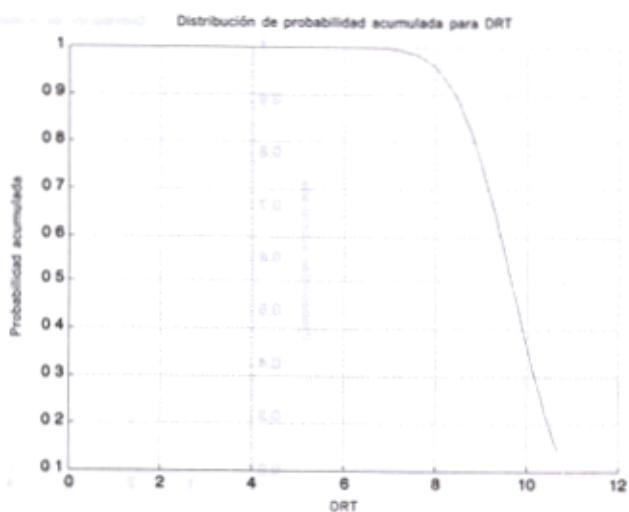
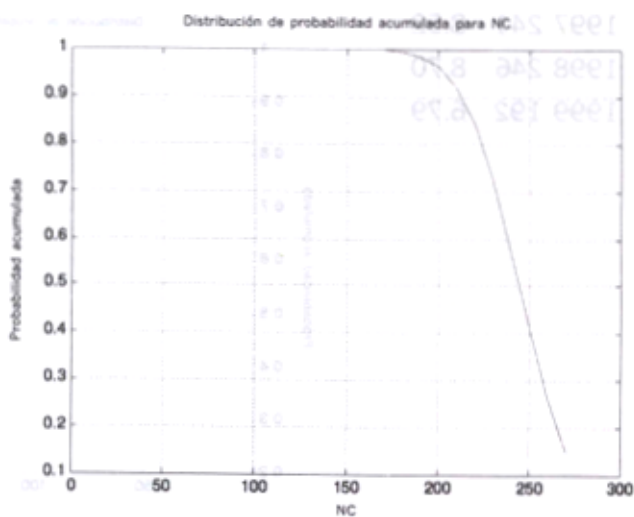
1998 242 8.56

1999 195 6.90



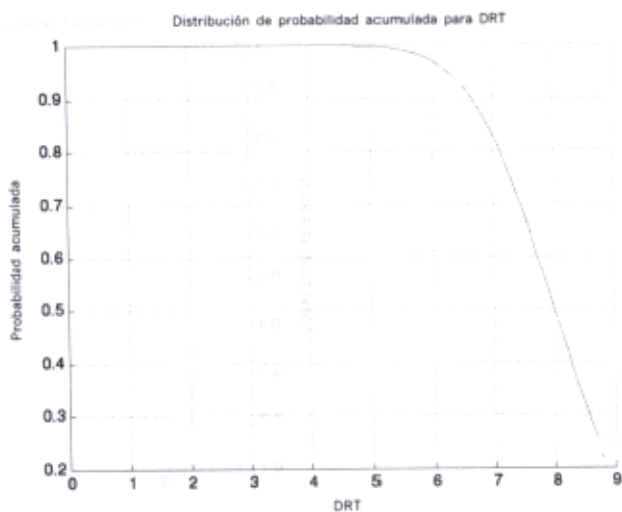
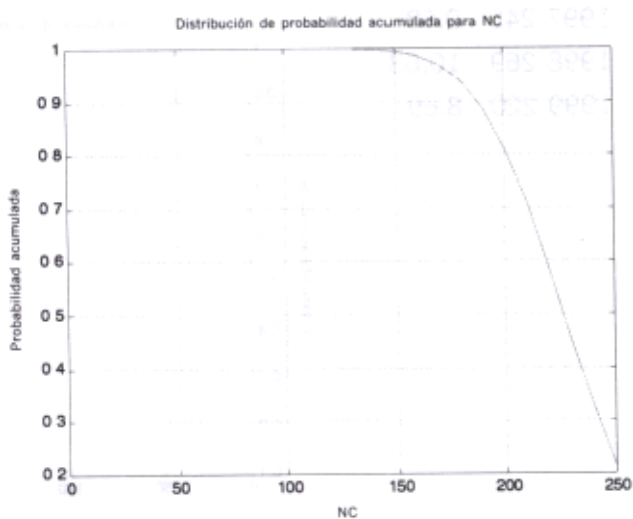
SITIO: El Banco
 LATITUD: 9°04'N
 LONGITUD: 73°59'W
 ALTITUD: 34 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	245	9.68
1998	269	10.63
1999	220	8.69



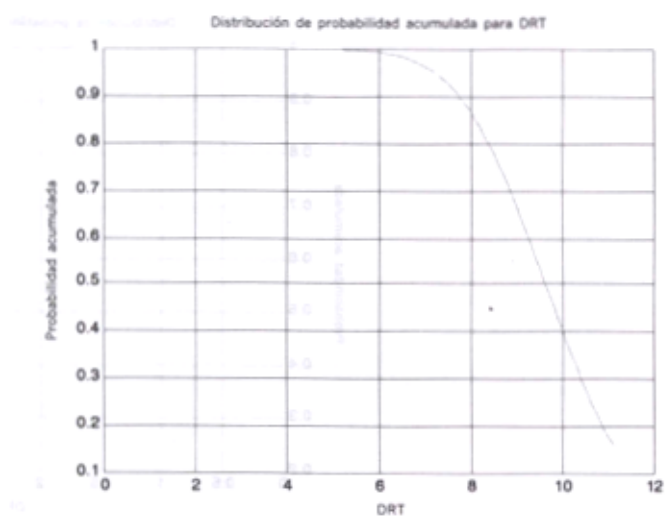
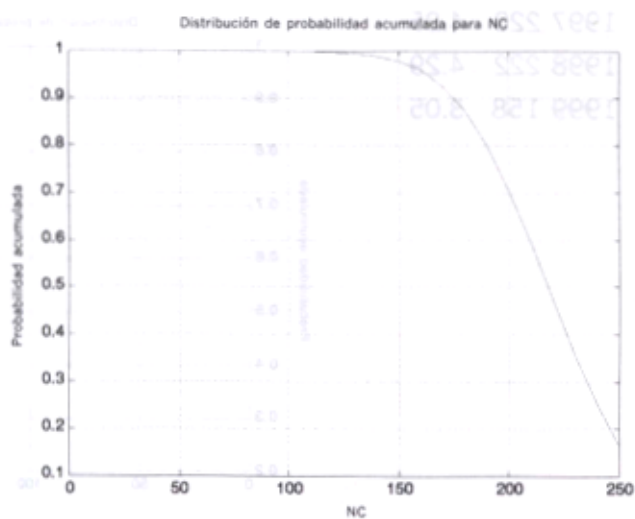
SITIO: Magangué
LATITUD: 9°16'N
LONGITUD: 74°49'W
ALTITUD: 18 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	241	8.52
1998	246	8.70
1999	192	6.79



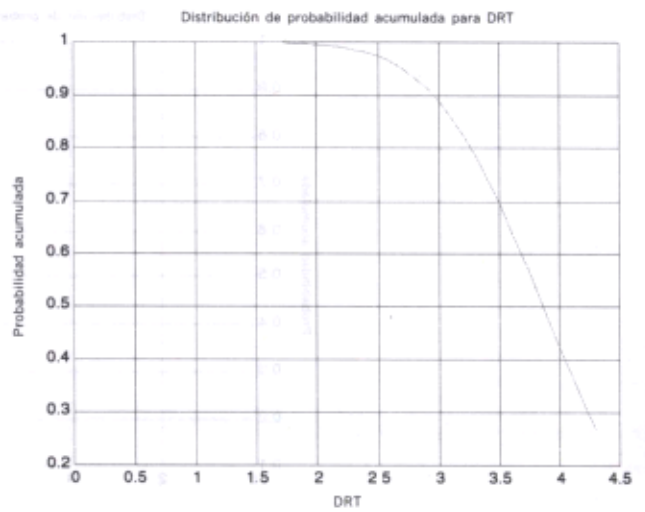
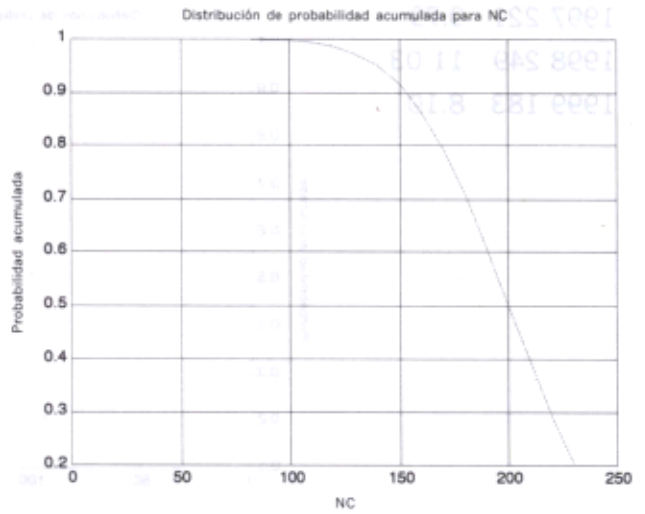
SITIO: Montería
 LATITUD: 8°49'N
 LONGITUD: 75°51'W
 ALTITUD: 20 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	221	9.79
1998	249	11.03
1999	183	8.10



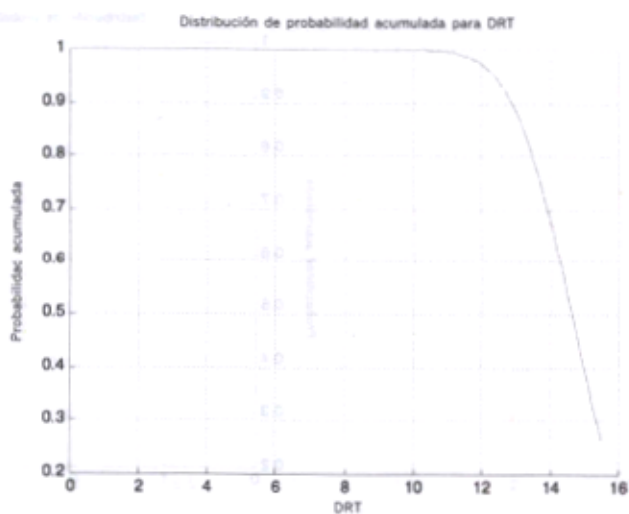
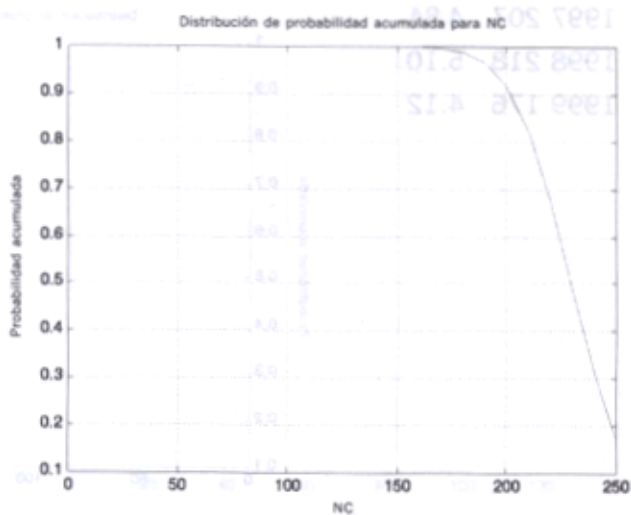
SITIO: Santa Marta
LATITUD: 11'08'N
LONGITUD: 74'14'W
ALTITUD: 4 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	220	4.25
1998	222	4.29
1999	158	3.05



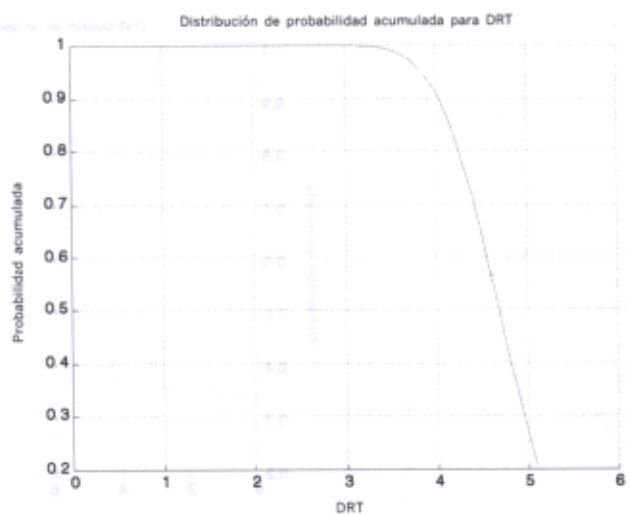
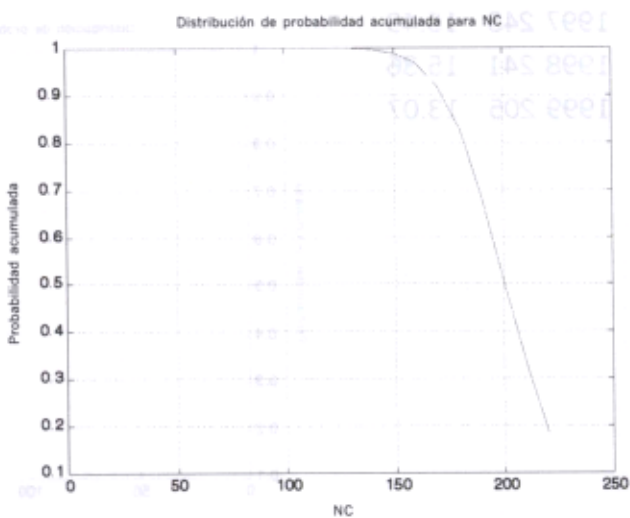
SITIO: Turbo
 LATITUD: 8°07'N
 LONGITUD: 76°44'W
 ALTITUD: 1 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	243	15.49
1998	241	15.36
1999	205	13.07



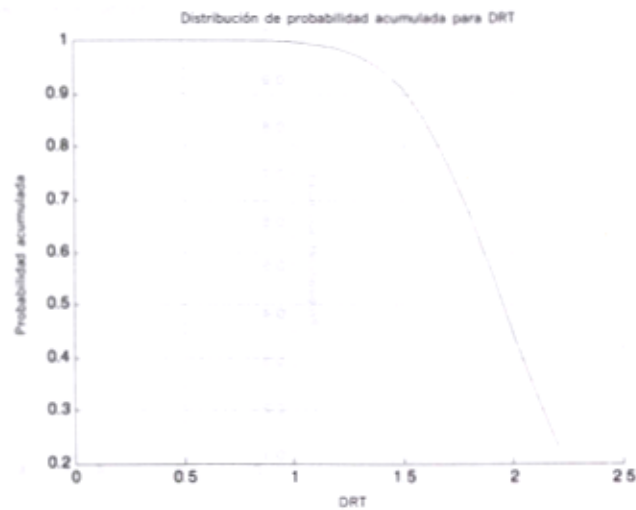
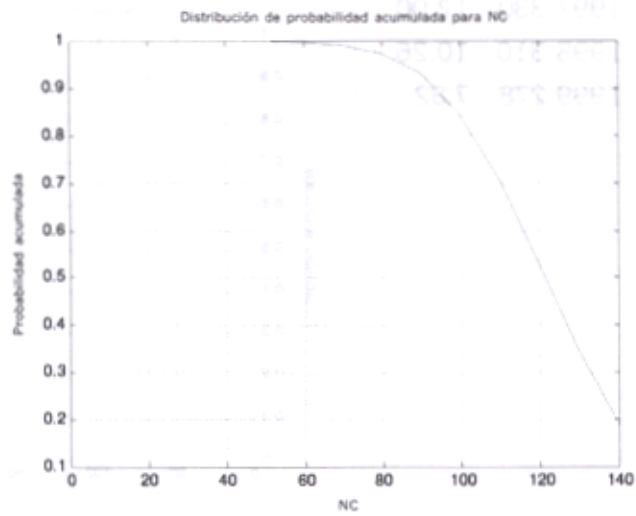
SITIO: Valledupar
LATITUD: 10'26'N
LONGITUD: 73'15'W
ALTITUD: 138 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	207	4.84
1998	218	5.10
1999	176	4.12



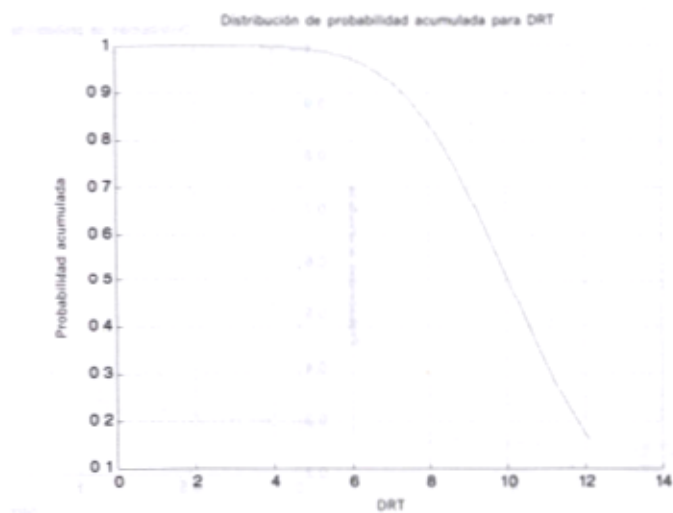
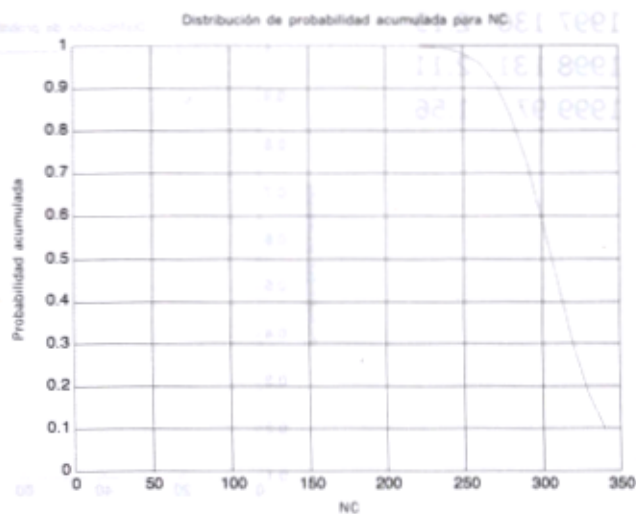
SITIO: Riohacha
 LATITUD: 11°32'N
 LONGITUD: 72°56'W
 ALTITUD: 4 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	136	2.19
1998	131	2.11
1999	97	1.56



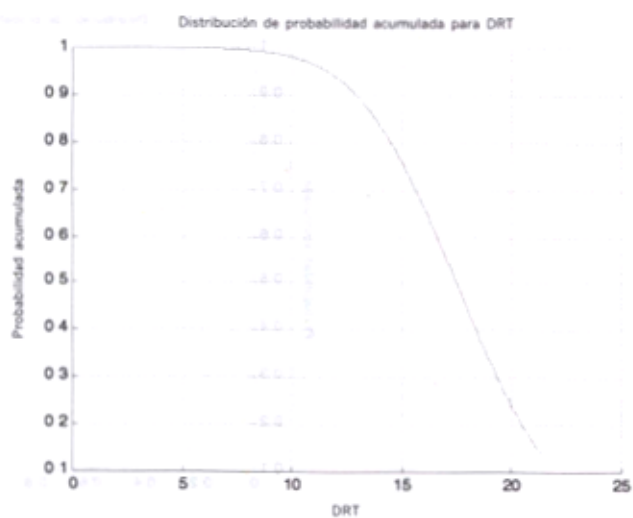
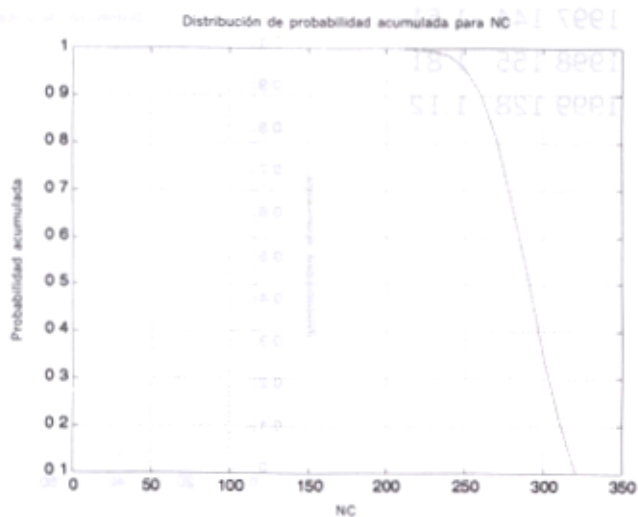
SITIO: Armenia
LATITUD: 4°27'N
LONGITUD: 75°46'W
ALTITUD: 1204 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	330	12.00
1998	310	10.26
1999	278	7.82



SITIO: Barranca
 LATITUD: 7°01'N
 LONGITUD: 73°48'W
 ALTITUD: 126 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	289	17.11
1998	315	21.22
1999	268	14.17



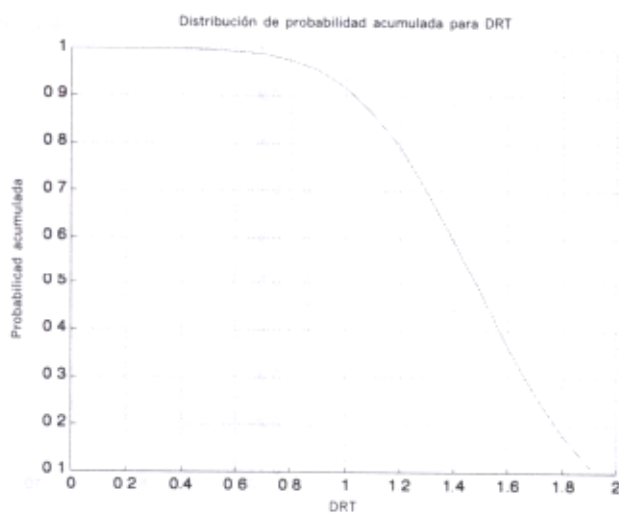
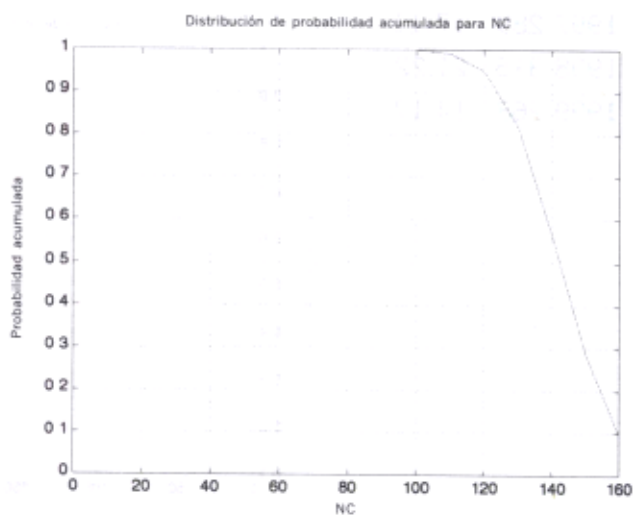
SITIO: Bogotá

LATITUD: 4°43'N

LONGITUD: 74°09'W

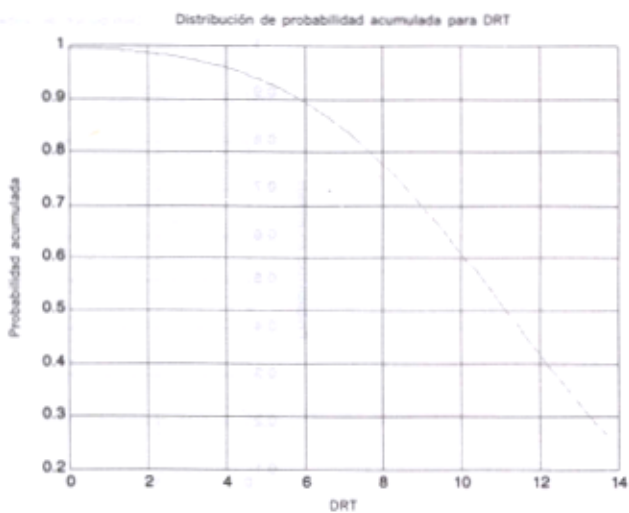
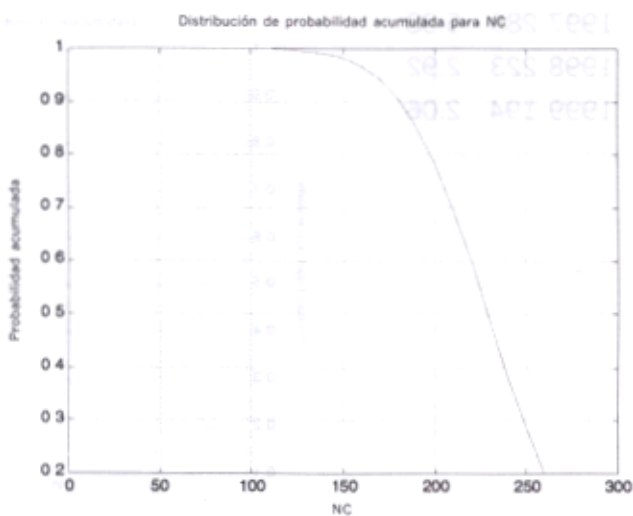
ALTITUD: 2547 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	144	1.51
1998	155	1.81
1999	128	1.12



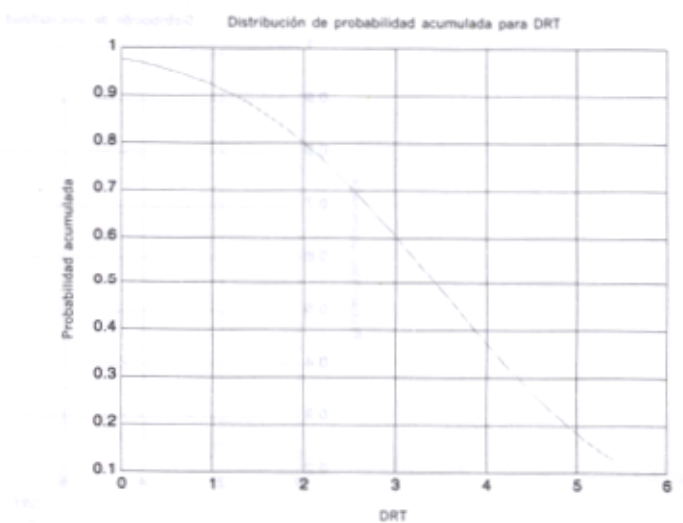
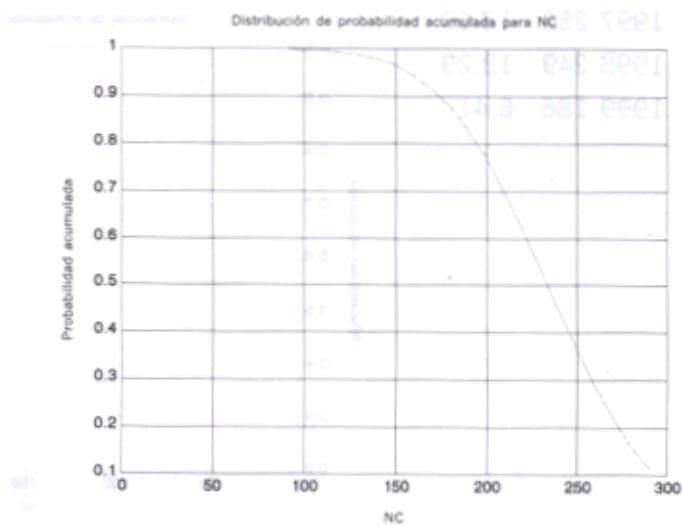
SITIO: Bucaramanga
 LATITUD: 7°08'N
 LONGITUD: 73°08'W
 ALTITUD: 931 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	252	13.69
1998	249	13.29
1999	186	6.41



SITIO: Cali
LATITUD: 3°33'N
LONGITUD: 76°23'W
ALTITUD: 961 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	285	5.38
1998	223	2.92
1999	194	2.06



SITIO: Cúcuta

LATITUD: 7°56'N

LONGITUD: 72°31'W

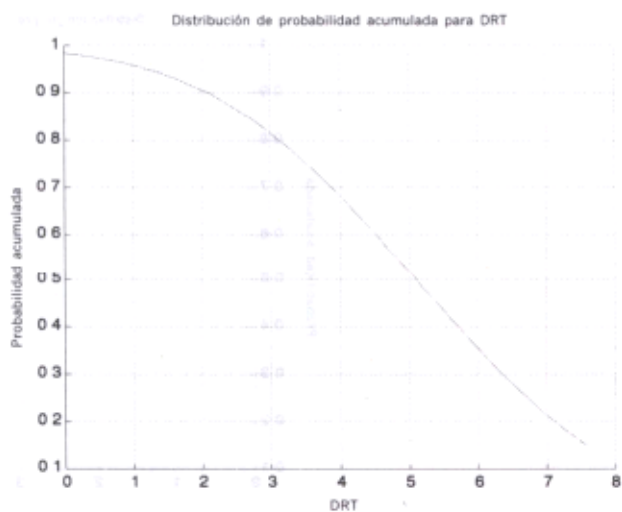
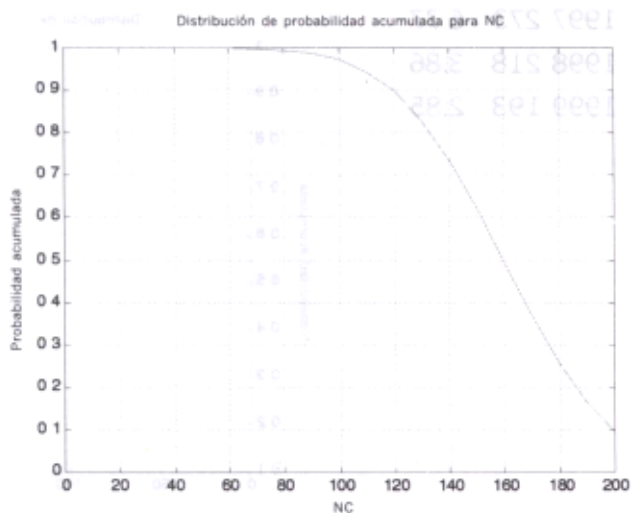
ALTITUD: 250 msnm

AÑO NC DRT

1997 190 7.55

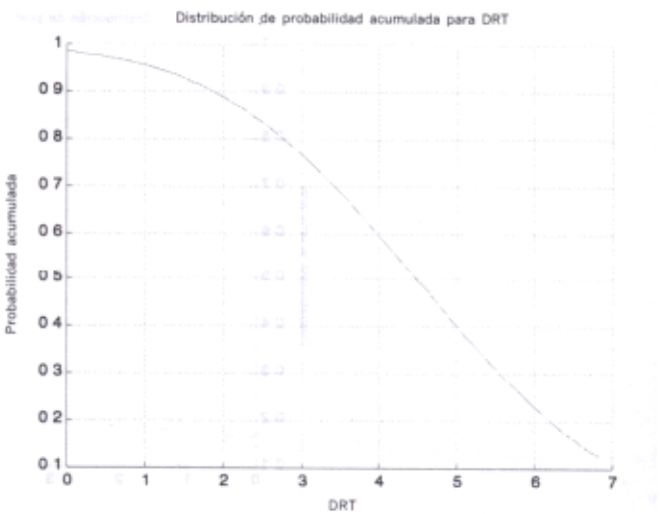
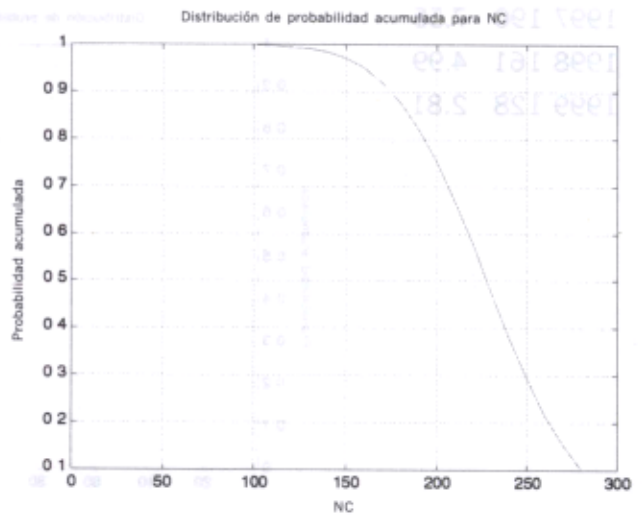
1998 161 4.99

1999 128 2.81



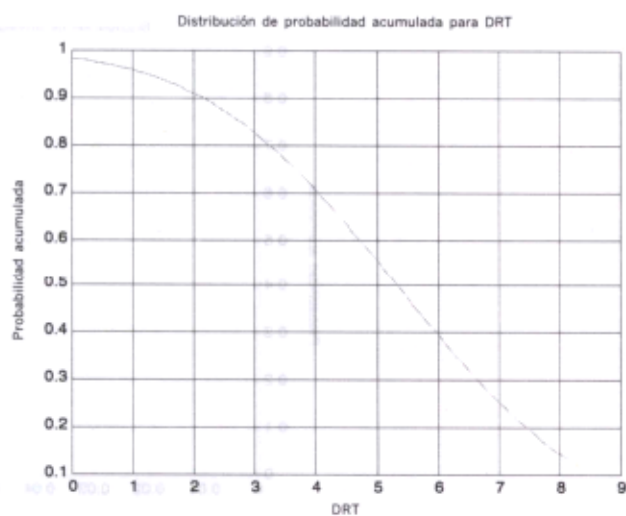
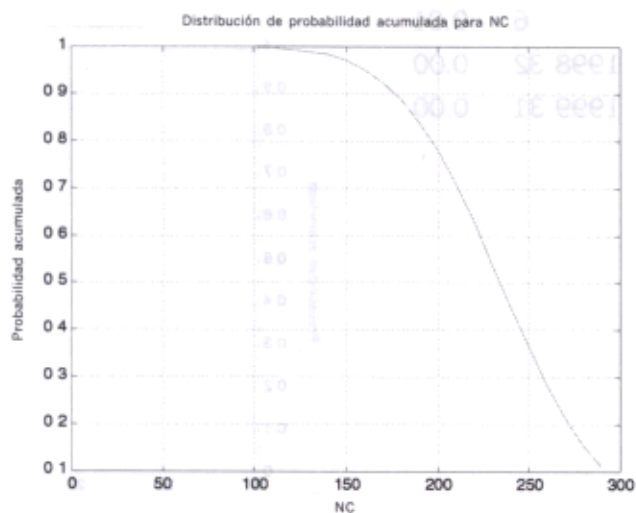
SITIO: Girardot
LATITUD: 4°17'N
LONGITUD: 74°48'W
ALTITUD: 286 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	273	6.77
1998	218	3.86
1999	193	2.85



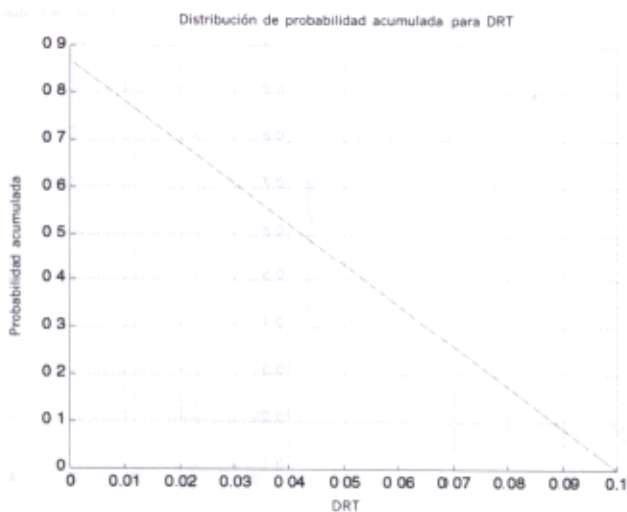
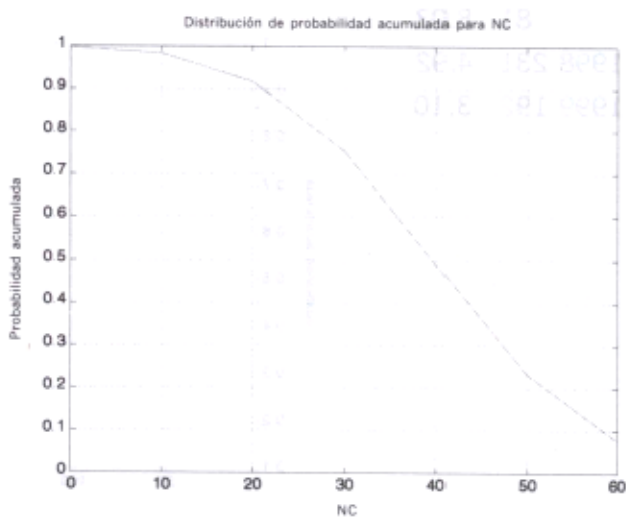
SITIO: Ibagué
 LATITUD: 4°26'N
 LONGITUD: 75°09'W
 ALTITUD: 928 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	281	8.03
1998	231	4.92
1999	192	3.10



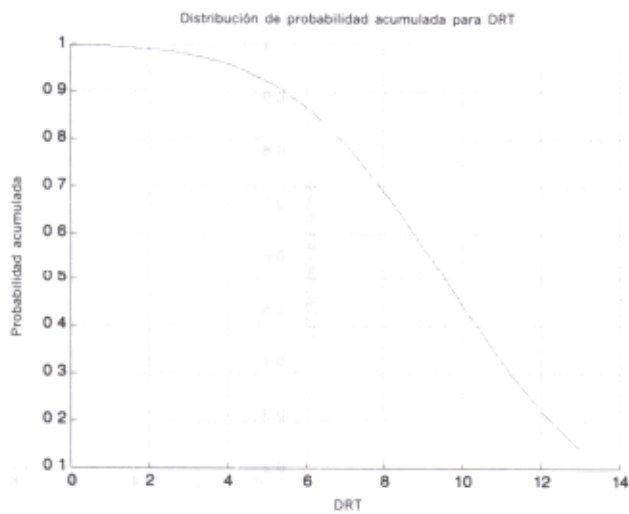
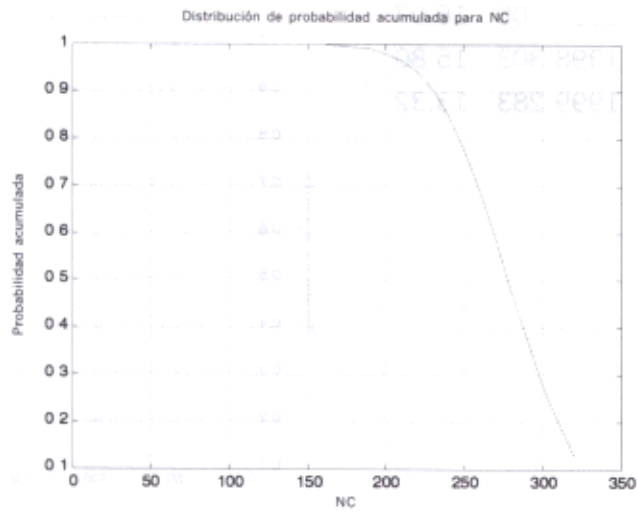
SITIO: Ipiales
 LATITUD: 00'49'N
 LONGITUD: 77'38'W
 ALTITUD: 2961 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	56	0.01
1998	32	0.00
1999	31	0.00



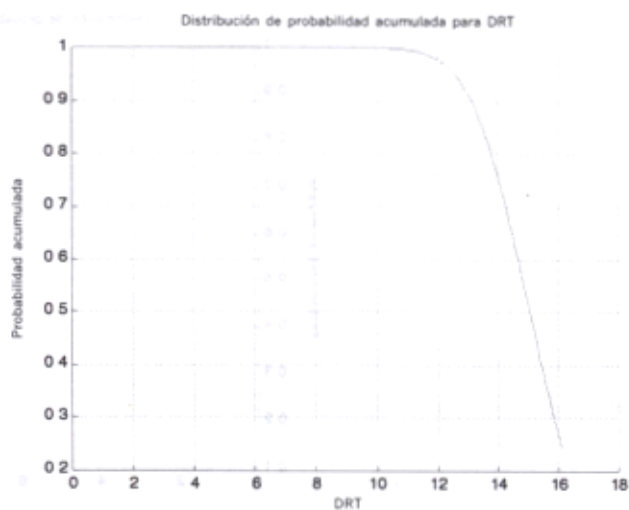
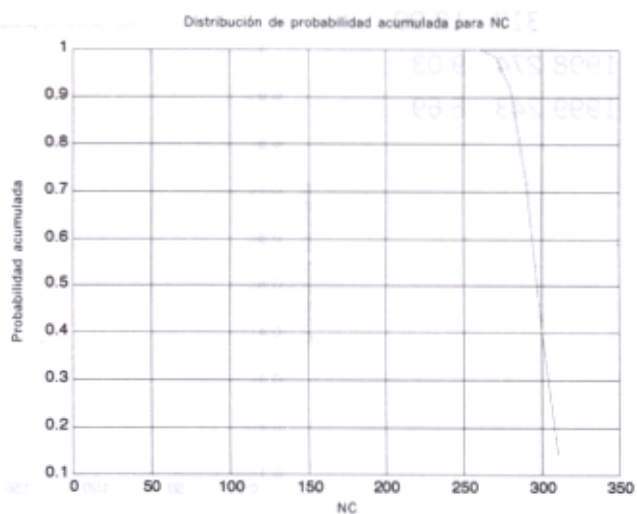
SITIO: Manizales
 LATITUD: 5°02'N
 LONGITUD: 75°28'W
 ALTITUD: 2080 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	317	12.99
1998	274	9.03
1999	243	6.69



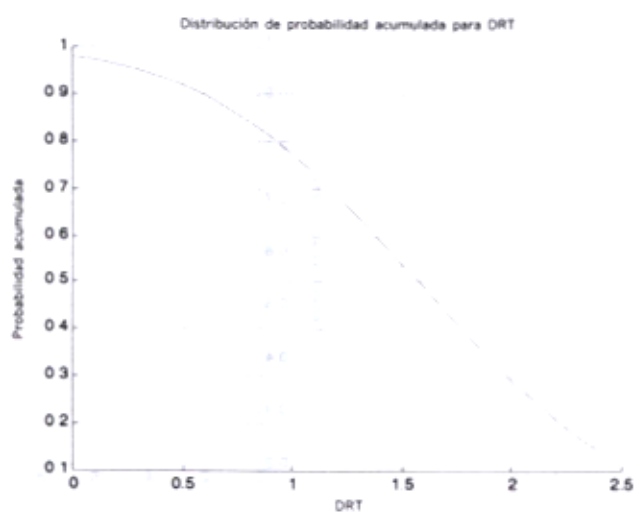
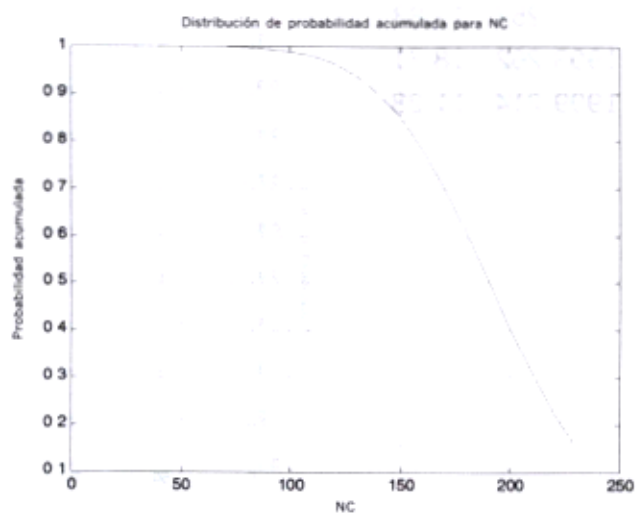
SITIO: Medellín
LATITUD: 6°07'N
LONGITUD: 75°26'W
ALTITUD: 2140 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	305	16.07
1998	303	15.80
1999	283	13.32



SITIO: Neiva
 LATITUD: 2°58'N
 LONGITUD: 75°18'W
 ALTITUD: 439 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	229	2.37
1998	192	1.53
1999	151	0.84



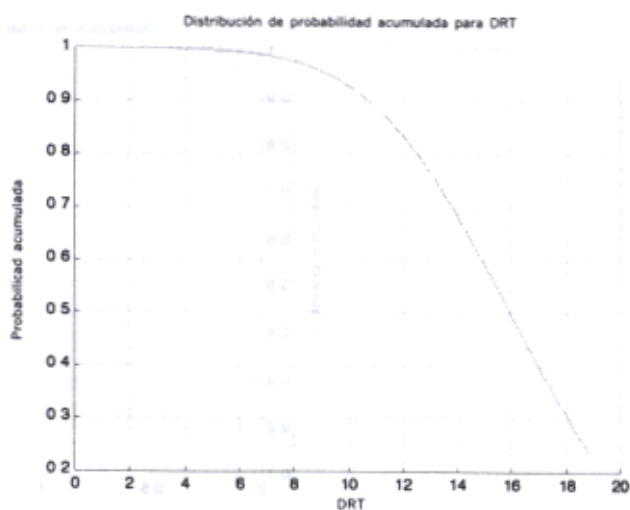
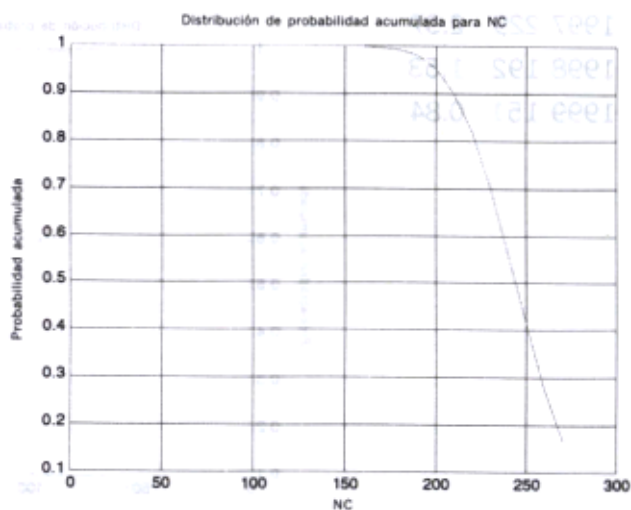
SITIO: Ocaña

LATITUD: 8°19'N

LONGITUD: 73°22'W

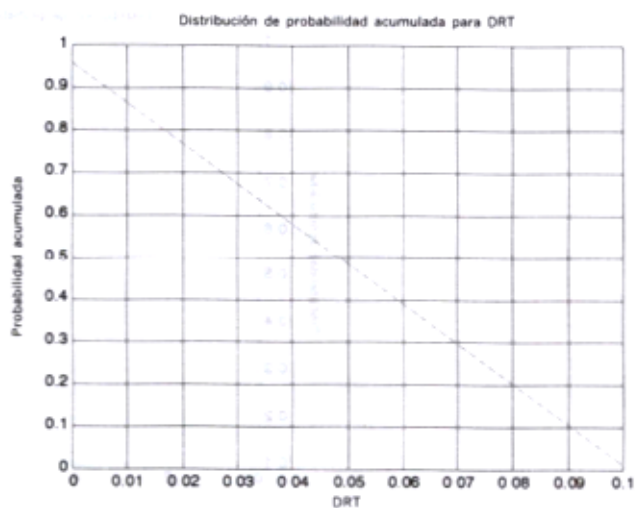
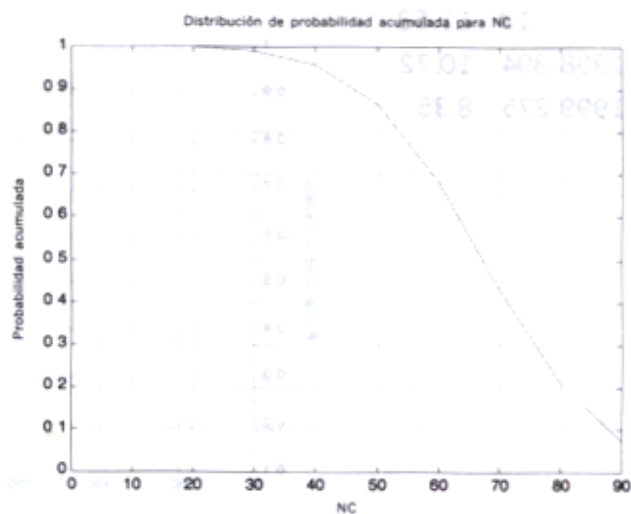
ALTITUD: 1435 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	257	17.83
1998	262	18.71
1999	214	11.28



SITIO: Pasto
 LATITUD: 1°25'N
 LONGITUD: 77°16'W
 ALTITUD: 1796 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	84	0.07
1998	65	0.04
1999	53	0.02



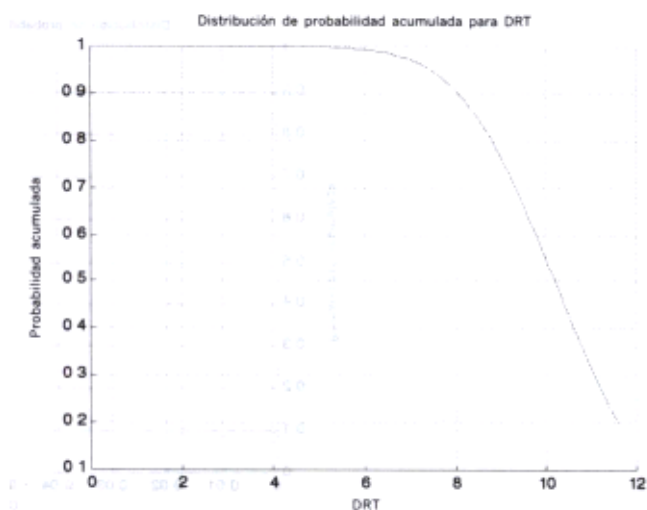
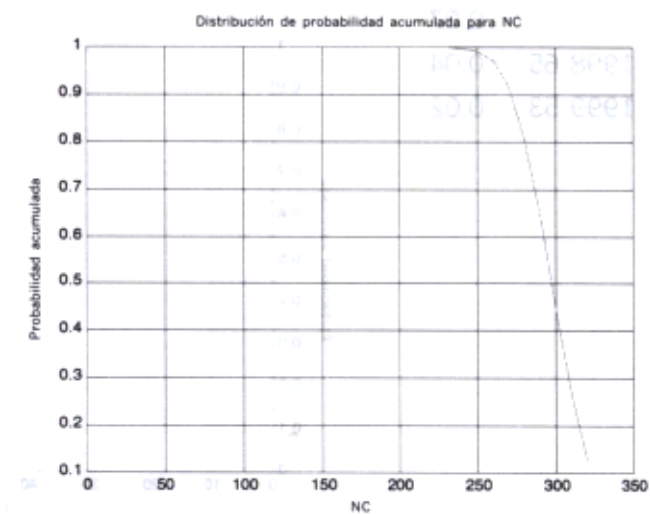
SITIO: Pereira

LATITUD: 4'49'N

LONGITUD: 75'44'W

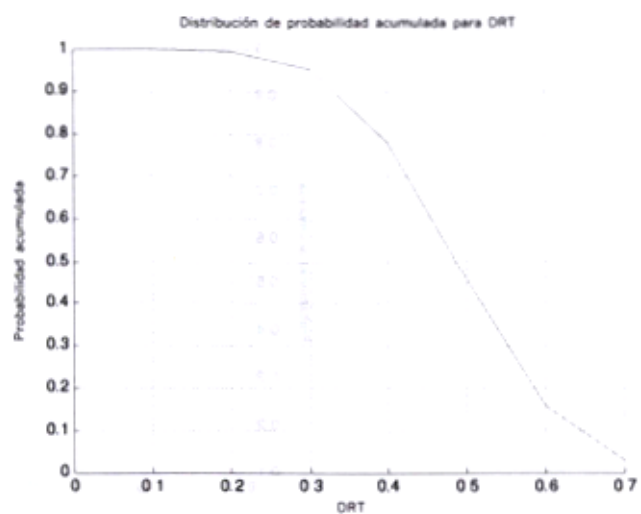
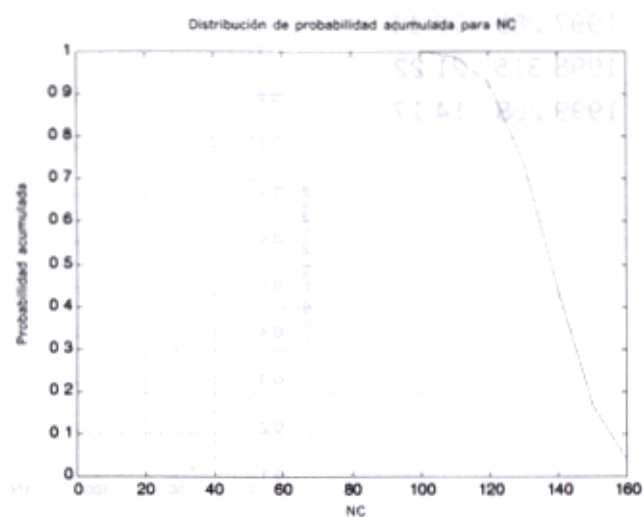
ALTITUD: 1342 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	313	11.53
1998	304	10.72
1999	275	8.35



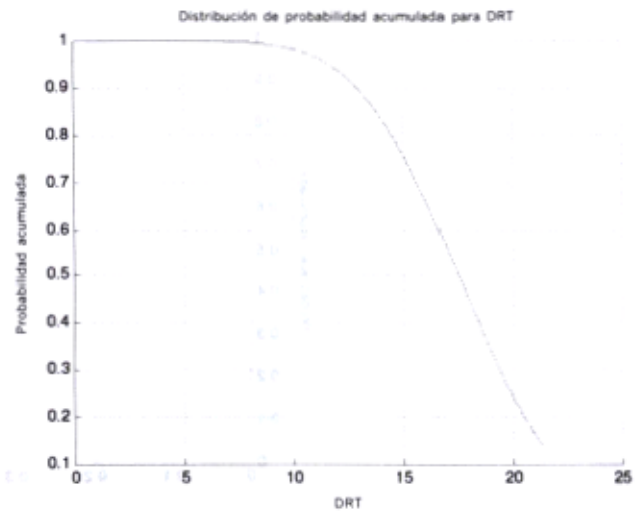
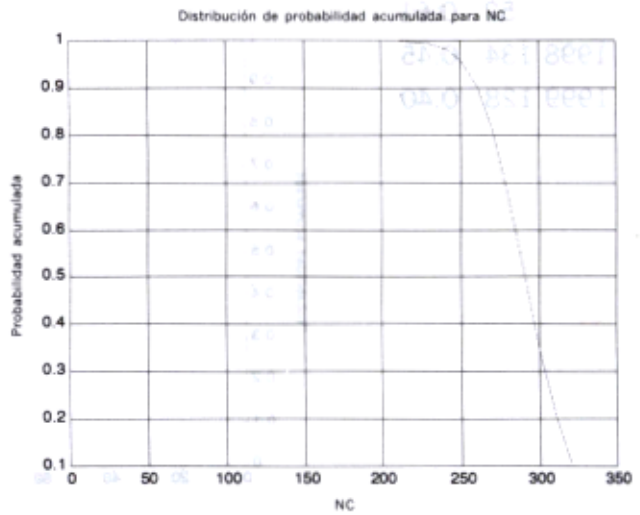
SITIO: Popayán
 LATITUD: 2°26'N
 LONGITUD: 76°35'W
 ALTITUD: 1730 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	152	0.61
1998	134	0.45
1999	128	0.40



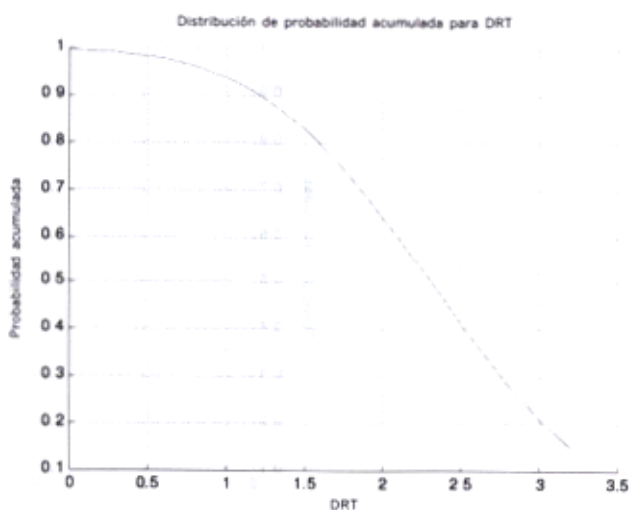
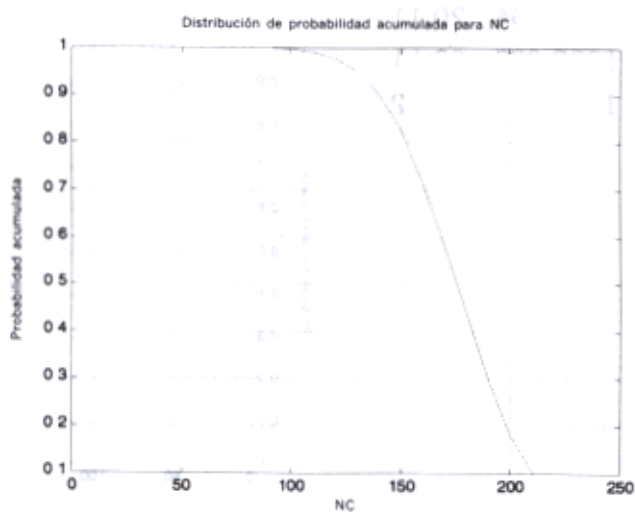
SITIO: Remedios
LATITUD: 7°01'N
LONGITUD: 74°43'W
ALTITUD: 630 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	289	17.11
1998	315	21.22
1999	268	14.17



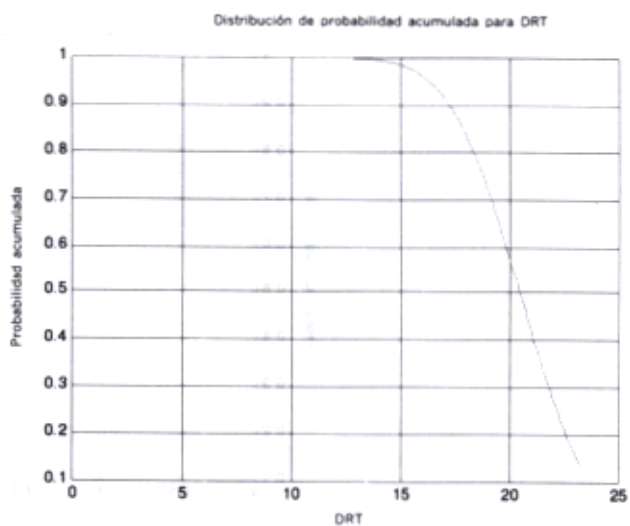
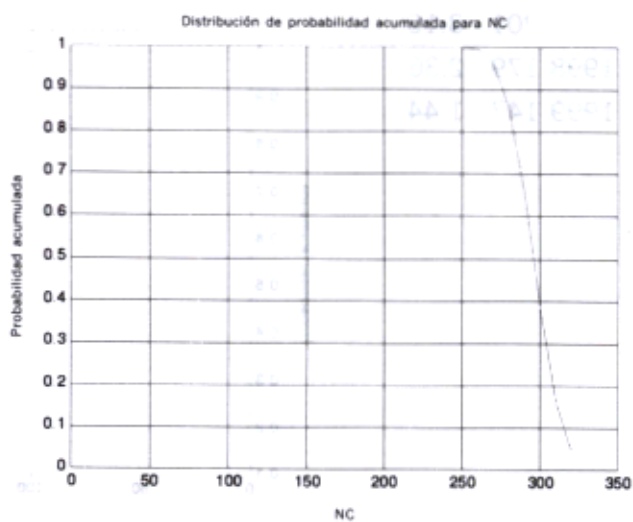
SITIO: Villavicencio
 LATITUD: 4'10"N
 LONGITUD: 73'27"W
 ALTITUD: 423 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	201	3.15
1998	179	2.36
1999	147	1.44



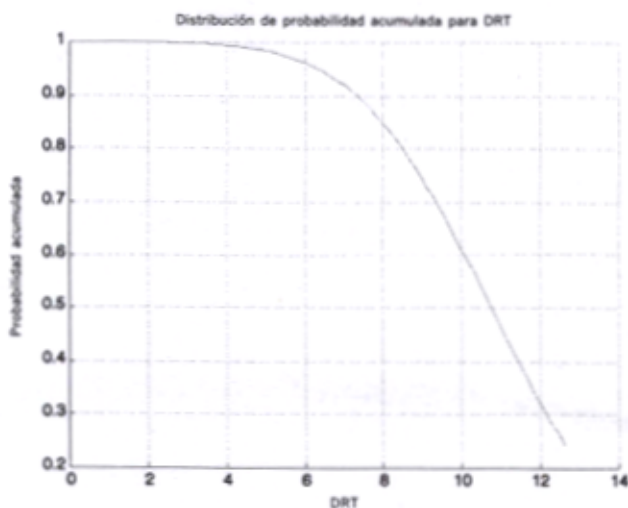
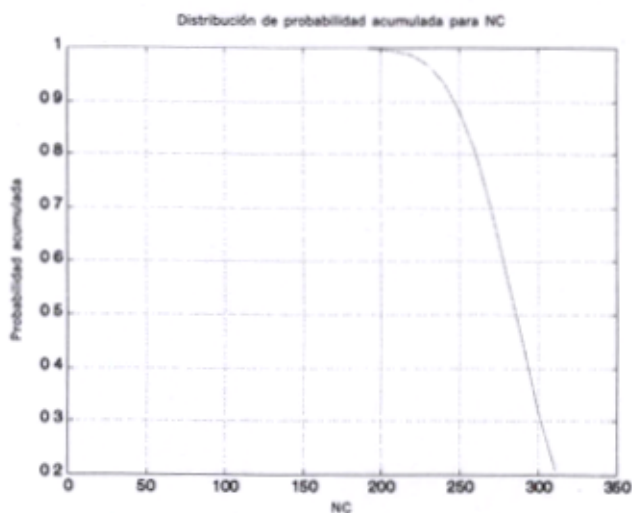
SITIO: El Bagre
LATITUD: 7°30'N
LONGITUD: 74°4'W
ALTITUD: 423 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	294	20.11
1998	282	23.14
1999	311	18.12



SITIO: Samaná
 LATITUD: 5°26'N
 LONGITUD: 74°56'W
 ALTITUD: 1000 msnm

AÑO	NC	DRT
1997	306	13.25
1998	300	12.61
1999	251	8.08



Este libro se terminó de imprimir
en el mes de septiembre de 2002
Universidad Nacional de Colombia
UNIBIBLOS
Correo electrónico: unibiblo@dnic.unal.edu.co
Bogotá, D.C., Colombia

OTRAS PUBLICACIONES DE INGENIERÍA

Acción del viento sobre las estructuras.

Gabriel Valencia Clement.

Estructuras de concreto I.

5 edición.

Jorge Segura Franco.

Redes hidráulicas y sanitarias en edificios.

Jorge Armando Granados Robayo.

El libro que usted tiene en sus manos está escrito en un lenguaje sencillo, técnico, académicamente riguroso y dirigido a tres tipos de público de habla hispana:

Personas interesadas en conocer sobre la interpretación que las diversas culturas le han dado al fenómeno del rayo, las modernas teorías sobre como es el fenómeno y aprender a protegerse del rayo en diversas situaciones.

Profesores y estudiantes universitarios de ingeniería eléctrica, geofísica y meteorología de pregrado y posgrado, como soporte teórico de asignaturas y temas como aislamiento eléctrico, coordinación de aislamiento, descargas eléctricas atmosféricas, sobretensiones, alta tensión, apantallamiento de líneas de transmisión.

Ingenieros de diseño y mantenimiento de sistemas eléctricos, electrónicos o de comunicaciones que deben conocer sobre las nuevas teorías y modelos de sistemas de protección contra rayos.

ISBN 958-701-213-5

